



Universitat de Girona

METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LA FABRICACIÓN DE ANHIDRITA EN HORNO ROTATIVO MEDIANTE ELEMENTOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Xavier GIRONÈS GÜELL

Dipòsit legal: GI. 218-2013

<http://hdl.handle.net/10803/101468>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



Universitat de Girona

TESIS DOCTORAL

**METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LA FABRICACIÓN DE ANHIDRITA EN HORNO
ROTATIVO MEDIANTE ELEMENTOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

Xavier Gironès Güell

2012



Universitat de Girona

TESIS DOCTORAL

**METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LA FABRICACIÓN DE ANHIDRITA EN HORNO
ROTATIVO MEDIANTE ELEMENTOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

Xavier Gironès Güell

2012

PROGRAMA DE DOCTORADO:

TECNOLOGÍA

Dirigida por: Dr. Joaquim de Ciurana Gay

Memoria presentada para optar al título de doctor por la Universitat de Girona

*A mis tres razones,
las cuáles hacen que
incluso cuando llueve,
salga en casa el sol
cada mañana*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer especialmente a Quim de Ciurana, cómo director de esta tesis, su ímpetu, su apoyo y pedagogía en todas las revisiones de la misma.

Por otra parte debo agradecer a la empresa Yesos Ibéricos las facilidades obtenidas para la realización de este trabajo, e igualmente a las empresas Monterde, AEtech y Qnorm, en especial a Mireia Gallego, Remei Aldrich y Salvador Riu por su apoyo al proyecto.

Quiero agradecer también la ayuda de Lluís Juncà, quizás el mejor jefe de mantenimiento que exista, a Pere Rubirola con su conocimiento del yeso y a Federic Reig por su carisma y por ser culé. A Enric Badosa por aguantar mis rollos de las nueve de la mañana, a Maite Martín, a Pere Sobreviela, a Josep Antoni García y a todos los demás, por dejar que pilote esta nave en plena tempestad coyuntural, la cual nos permitirá salir de ella con mucha más fuerza, después de lo vivido. También me han apoyado los gerentes Carlos Lillo, un verdadero maestro alicantino del yeso, Antonio Dávila, desde Pamplona, David Sáenz desde Madrid y Félix Alcañiz, adoptado por Jaén desde hace algunos años.

No quiero pasar por alto esta oportunidad para agradecer todo lo que me han dado mis compañeros de trabajo durante todos estos años, a los que son buenos, de los que he aprendido un mundo y a los malos, que me han enseñado muchísimo más. Especialmente al director general de Hutchinson, Roger Sánchez, que en “otra vida”, como él dice, me abrió los ojos y nunca más los cerré. Y a todos mis futuros compañeros que serán los mismos pero con nombres diferentes.

A mis maestros, que les debo la vida. Desde la guardería hasta los que vendrán, sobretodo los que me han aportado cosas más importantes que lo que dice un libro, a los que me han hecho pensar y los que me han dado un motivo para dormir poco, y especialmente a los que no confiaron en mí, ya que me dieron ese empujoncito vital para cambiar el paso y seguir adelante.

A mis amigos, siempre firmes, siempre ahí. A mi amplia familia a la que quiero y que sabe que pueden confiar en mí. A mi desaparecido “avi” Xicu, porque, en silencio, me enseñó tantas y tantas cosas. A Llorenç por que lo quiero y por qué sin saberlo, es el artífice de esta tesis, a M^aÀngels por darme la vida el primer día en que nos conocimos y por el símbolo infinito detrás del verbo dar. A Josep por enseñarme que esos monstruos eran sólo molinos de viento. A Quim por ser mi media naranja y a Marta por haber malgastado su niñez jugando conmigo. A Dolors, Tere y a todas las que me habéis permitido vivir intensamente la vida.

Por último quiero agradecer a Marta que haya decidido, con dudoso acierto, pasar su vida conmigo. Por aguantar los días y años duros de esta tesis, por los relevos, por los ya casi estoy, por los cafés con magdalena, por estar siempre ahí y por hacerme feliz. A Júlia sólo puedo decirte que luches por lo que quieres, mirando adelante, pero también mirando hacia atrás y a Núria confirmarle que los sueños sólo se cumplen si se sueña despierto y que me hace feliz el saber que su futuro, será exactamente el que ella desee con todas sus fuerzas.

LISTA DE ACRÓNIMOS

AM	Aditivación manual
AN	Anhídrita
BA	Báscula
D	Controlador derivativo
DG	Depósito de granel
DH	Dihidrato
ERP	Sistemas de planificación de recursos empresariales (Enterprise Resource Planning)
GAD	Gráfico acíclico dirigido
I	Controlador integrador
IA	Inteligencia artificial
INJ	Inyector
IP	Inferencia probabilística
IP	Índice de pureza
MDL	Longitud de descripción mínima
MES	Sistemas de ejecución de manufactura (Manufacturing Execution System)
MOAC	Media para todos los casos analizados
MZ	Mezclado
P	Controlador de acción proporcional
PD	Controlador proporcional derivativo
PI	Controlador proporcional integral
PID	Controlador proporcional integral derivativo
PLC	Controlador lógico programable (Programmable logic controller)
RNA	Redes neuronales artificiales
RO	Rendimiento operativo
RP	Red probabilística
RRHH	Recursos humanos
SCADA	Control y adquisición de datos de supervisión (Supervisory control and data acquisition)
SCG	Red conectada de forma sencilla
SE	Sistemas expertos
SH	Semihidrato o hemihidrato
TM	Torre de mezclas
TO	Tolva
TR	Transporte de material
TRS	Tasa de rendimiento sintético
v.a.	Variable aleatoria

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ambientes de formación de yesos y tipos de precipitados más comunes en ellos (Rouchy, 1982).....	32
Figura 2. Ciclo geológico (profundo) del sulfato cálcico (Ortí & Rosell, 1991).	33
Figura 3. Estructura cristalina del yeso según (Schofield, Knight, & Stretton, 1996). Tomada del sitio web de Mineralogy Database (Mineralogy Database, 2009).....	34
Figura 4. Morfología de los cristales de Yeso (Ortí, 1989).	35
Figura 5. Variedades de yeso. Tomada de la Guía Interactiva de minerales y rocas (Rubio, 2000).	36
Figura 6. Estructura cristalina de la anhidrita según (Hawthorne & Ferguson, 1975). Tomada del sitio web de Mineralogy Database (Mineralogy Database, 2009).....	36
Figura 7. Anhidrita. Tomada de la Guía Interactiva de minerales y rocas (Rubio, 2000)	37
Figura 8. Muro pintado en edificio. Imagen tomada de la página web oficial de Catalhoyuk Research Project (Catalhoyuk Research Project, 2012).	38
Figura 9. Ejemplo de paño de yesería en la Alhambra de Granada (Fachada de Comares). Imagen tomada de la página web oficial del Patronato de la Alhambra y el Generalife (Patronato de la Alhambra y el Generalife, 2012).	39
Figura 10. Principales zonas de yesos en España. Imagen tomada de Regueiro & González-Barros (1997).	41
Figura 11. Producción minera de yeso de los últimos años (2006-2010). Productos de cantera. Gráfico elaborado a partir de datos de la Estadística minera anual 2010 (Ministerio de Industria, 2010).	43
Figura 12. Distribución de la Producción nacional de yeso por Comunidades. Año 2009. Gráfico elaborado a partir de datos de Estadística minera de España 2009 (Merchán & Regueiro, 2009).....	44
Figura 13. Producción minera de yeso en el mundo para 2011. Imagen tomada de Maps of World (2012).	44
Figura 14. Influencia del agua de amasado en la dureza. Imagen tomada de (Hugon & Serre, 1982).	54
Figura 15. Relación entre la densidad, el agua de amasado y la porosidad. Tomada de (Villanueva & García, 2001).....	55
Figura 16. Relación entre la densidad, el agua de amasado y la porosidad. Tomada de (Arredondo, 1980).....	56
Figura 17. Fases de proceso en una planta de fabricación de yeso en polvo.....	65
Figura 18. Esquema del proceso para la fabricación de productos en base yeso (Universidad de Alicante, 2002).....	65
Figura 19. Cantera de yeso en Beuda (Girona).....	66
Figura 20. Tecnología utilizada en una explotación a cielo abierto (Cerulla, 1997)	66
Figura 21. Fotografía perforadora trabajando en Llinars del Vallès (Barcelona).....	67
Figura 22. Vehículos trabajando en una cantera.....	68
Figura 23. Flujograma general de la planta de trituración. 1) alimentador, 2) machacadora de mandíbulas, 3), 5), 6) y 7) cintas transportadoras, 4) criba. (Cerulla, 1997)	68
Figura 24. Molinos de barras y bolas (Lynch, 1977).....	69
Figura 25. Marmita horizontal tipo (Rivero, 1997).	71
Figura 26. Marmita cónica vertical (Rivero, 1997).	71
Figura 27. Horno rotatorio horizontal a contracorriente (Rivero, 1997).	72
Figura 28. Horno vertical, de molienda y calcinación en continuo (Rivero, 1997).....	73
Figura 29. Horno vertical para calcinación Flash (Rivero, 1997).....	73

**Metodología y Análisis de la Fabricación de Anhídrita en Horno Rotativo Mediante
Elementos de Inteligencia Artificial**

Figura 30. Horno de parrilla móvil (Rivero, 1997).....	74
Figura 31. Autoclave vertical (Nolhier, 1986).....	74
Figura 32. Esquema sistema de lazo abierto	76
Figura 33. Ejemplo de Sistema de lazo abierto	77
Figura 34. Esquema de Sistema de lazo cerrado.....	77
Figura 35. Diagrama entradas y salidas para tiempo real y complejo	79
Figura 36. Representación de un sistema mediante bloques.....	81
Figura 37. Condiciones de estabilidad de un sistema lineal (Schmid, 2005)	84
Figura 38. Grafico tridimensional que representa la respuesta de un sistema (Schmid et al., 2005).....	85
Figura 39. Diagrama de un controlador P.....	86
Figura 40. Respuesta de un controlador P a una señal tipo escalón unitario	87
Figura 41. Respuesta de un controlador I a una señal tipo escalón.....	88
Figura 42. Respuesta de un controlador PI a una señal tipo escalón	89
Figura 43. Respuesta de un controlador PD a una señal tipo rampa.....	90
Figura 44. Respuesta de un controlador PID a una señal tipo rampa.....	90
Figura 45. Relación entre Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos	94
Figura 46. Fases del desarrollo de un Sistema Experto (Weiss y Kulikowski, 1984) ..	97
Figura 47. Ejemplo de red bayesiana	106
Figura 48. Aplicación de la Regla de la Cadena en una red bayesiana	107
Figura 49. “The dog barking problem” (Charniak, 1991)	113
Figura 50. Propagación de probabilidades inicial para “The dog barking problem” ..	114
Figura 51. “The dog barking problem” – Instanciación del nodo D.....	116
Figura 52. “The dog barking problem” Recalculo de probabilidades después de la instanciación del nodo D.....	116
Figura 53. “The dog barking problem” – Estado inicial	117
Figura 54. “The dog barking problem” – Instanciación del nodo h	117
Figura 55. “The dog barking problem” – Instanciación de los nodos H y F	118
Figura 56. “The dog barking problem” – Instanciación de los nodos H, F y D.....	119
Figura 57. “The dog barking problem” Recalculo de probabilidades después de la instanciación de los nodos F, D y H.....	119
Figura 58. Tipo de conexión entre tres variables (Rebane y Pearl, 1989).	122
Figura 59. Estructura de la visión de una red bayesiana mediante AutoClass	126
Figura 60. Dimensiones y peso del equipo.....	134
Figura 61. Cuerpo de un horno de combustión rotativo	135
Figura 62. Esquema general de funcionamiento de un horno de anhídrita	137
Figura 63. Vista válvulas de descarga de mangas de un filtro	139
Figura 64. Filtro de mangas de un horno de calcinación.....	139
Figura 65. Posiciones de la válvula de mariposa en la aspiración	140
Figura 66. Regulador de la aspiración en un horno de anhídrita.....	141
Figura 67. Regulador del caudal de gas en un horno de anhídrita.....	142
Figura 68. Ajuste de un horno Monterde según sentido de giro	143
Figura 69. Componentes del quemador de gas natural	145
Figura 70. Tren de válvulas del quemador	146
Figura 71. Vista del quemador de gas natural H-2500.....	146
Figura 72. Cálculo de toberas según el flujo	149
Figura 73. Relación entre la velocidad, la presión y el flujo en diferentes tamaños de tubos para aire, gas natural, propano y butano (unidades inglesas)	155
Figura 74. Dimensionamiento de los conductos de aire mediante el método de igual superficie	156
Figura 75. Balance térmico en un quemador de gas.....	162
Figura 76. Radiación del cuerpo negro.....	164
Figura 77. Requisitos térmicos para un quemador de gas en bruto.....	165

**Metodología y Análisis de la Fabricación de Anhídrita en Horno Rotativo Mediante
Elementos de Inteligencia Artificial**

Figura 78. Requisitos térmicos para un quemador de aire fresco	166
Figura 79. Comportamiento de los componentes de los gases de combustión del gas natural frente al exceso de aire (%)	167
Figura 80. Temperatura teórica de llama vs Precalentamiento	167
Figura 81. Temperatura teórica de llama vs el porcentaje de O ₂ del aire.....	168
Figura 82. Esquema de proceso de una planta de fabricación de yeso en polvo	169
Figura 83. Vista de la tolva de material de entrada al proceso.....	170
Figura 84. Vista de molino primario de yeso	171
Figura 85. Proceso y registros molienda primaria de yeso.....	172
Figura 86. Vista general de un horno de anhídrita.....	173
Figura 87. Vista de la cámara de combustión de un horno de anhídrita	174
Figura 88. Proceso y registros molienda primaria de yeso.....	175
Figura 89. Molinos de afino o secundarios para anhídrita	178
Figura 90. Proceso de arranque de un horno de anhídrita	179
Figura 91. Factores implicados en la calcinación de la anhídrita	180
Figura 92. Operario realizando registros de control de calidad en horno de anhídrita	180
Figura 93. Esquema de equipo para determinación de la densidad de la anhídrita ...	185
Figura 94. Tamizadora electromagnética modelo TYLER ROTAP SS-36	187
Figura 95. Croquis de funcionamiento de una tamizadora por barrido de aire.....	188
Figura 96. Porcentaje de consumo térmico hornos para 2011.....	192
Figura 97. Distribución mensual consumo específico hornos	194
Figura 98. Flujo másico y energético de un horno de anhídrita	197
Figura 99. Flujos de gases y de material en un horno de anhídrita	198
Figura 100. Diagrama de Sankey Balance energético de horno 5.	205
Figura 101. Diagrama de Sankey Balance energético de horno 6.	206
Figura 102. Curvas características y punto de trabajo óptimo del ventilador para el horno nº5	208
Figura 103. Curva característica en condiciones de trabajo para ventilador para el horno nº6	208
Figura 104. Termografía hornos de calcinación de anhídrita	210
Figura 105. Sistema Scada para hornos 5 y 6 de proceso de calcinación de anhídrita	212
Figura 106. Flujograma del proceso de calcinación y variables implicadas	215
Figura 107. Regresión entre las variables V03 y V13	216
Figura 108. Distribución marginal entre las variables V03 y V13	217
Figura 109. Regresión entre las variables V17 y V13	217
Figura 110. Distribución marginal entre las variables V17 y V13	217
Figura 111. Regresión entre las variables V09 y V13	218
Figura 112. Regresión entre las variables V03 y V17	218
Figura 113. Regresión entre las variables V09 y V07	219
Figura 114. Matriz de correlación entre las principales variables implicadas	219
Figura 115. Esquema jerárquico del control industrial.....	221
Figura 116. Arquitectura de control	223
Figura 117. Diagrama de proceso	224
Figura 118. Vista silos de estocaje de mineral	226
Figura 119. Proceso de carga de material a horno	227
Figura 120. Proceso de transporte de un horno de anhídrita a silos de destino	229
Figura 121. Proceso de molienda primaria y almacenaje en silos de yeso crudo.....	241
Figura 122. Esquema de conexiones entre elementos	250
Figura 123. Diagrama de la estructura del controlador COMP_PID.....	251
Figura 124. Representación del bloque PID.....	253
Figura 125. Diagrama de control de la aplicación de dos PID en cascada	254
Figura 126. Arquitectura del control PID.....	255

**Metodología y Análisis de la Fabricación de Anhídrita en Horno Rotativo Mediante
Elementos de Inteligencia Artificial**

Figura 127. Bloque de control del ventilador del tiro, proporcional al caudal de combustible.....	258
Figura 128. Bloque de control del ventilador del tiro	259
Figura 129. Simulación del proceso en PLC. Diagrama de bloques	260
Figura 130. Simulación del proceso de arranque	261
Figura 131. Simulación del proceso de calcinación controlado por PID's	262
Figura 132. Simulación de un escalón de aumento del caudal de entrada de material	263
Figura 133. Simulación de un escalón de disminución del caudal de entrada de material	263
Figura 134. Flujograma del proceso de fabricación de anhídrita	270
Figura 135. Diagrama causa-efecto en la fabricación de anhídrita	271
Figura 136. Representación temporal de algunas variables de proceso (en eje horizontal horas)	275
Figura 137. Representación temporal de algunas variables meteorológicas (en eje horizontal días)	276
Figura 138. Modelo conexional de la RB	276
Figura 139. Estructura de RB con variables de control de calidad	277
Figura 140. Estructura completa de la RB	278
Figura 141. Estructura de RB con variables meteorológicas.....	279
Figura 142. Estructura de RB con variables indirectas de proceso	279
Figura 143. Variables meteorológicas de la RB sin instanciar (vista metrónomo)	280
Figura 144. Variables meteorológicas de la RB con algunas instanciaciones (vista barras de creencia)	281
Figura 145. RB completa compilada con el estado de parametrización inicial.....	282
Figura 146. RB completa compilada con una nueva parametrización referencial de control para las variables	283
Figura 147. Ejemplo de instanciación de la RB	284
Figura 148. Medición de la potencia del ventilador sin variador	295
Figura 149. Medición de la potencia del ventilador con variador.....	295
Figura 150. Nueva pantalla de control para el horno de calcinación	296
Figura 151. Estadísticas de la variable V85	298
Figura 152. Estadísticas de la variable V86	298
Figura 153. Estadísticas de la variable V87	299
Figura 154. Estadísticas de la variable V88	299
Figura 155. Regresión entre las variables V13 y V03	300
Figura 156. Regresión entre las variables V13 y V09	300
Figura 157. Regresión entre las variables V13 y V17	301
Figura 158. Regresión entre las variables V13 y V86	301
Figura 159. Regresión entre las variables V13 y V87	302
Figura 160. Regresión entre las variables V13 y V88	302
Figura 161. Regresión entre las variables V17 y V03	303
Figura 162. Regresión entre las variables V17 y V87	303
Figura 163. Consumo específico de gas natural antes de realizar las modificaciones en el proceso	304
Figura 164. Consumo específico de gas natural después de realizar las modificaciones en el proceso	305
Figura 165. Gráfica de las temperaturas de control del proceso	305
Figura 166. Gráfica de las consignas de control del proceso	306
Figura 167. Gráfica de la variable V03 (caudal de material)	306
Figura 168. Estadística de la nueva variable relativa a la frecuencia del ventilador de extracción de gases	307
Figura 169. Estadística de la nueva variable relativa al caudal de material	307

Metodología y Análisis de la Fabricación de Anhídrita en Horno Rotativo Mediante Elementos de Inteligencia Artificial

Figura 170. Nuevo consumo específico de gas natural.....	308
Figura 171. Esquema de una implantación anti-windup.....	309
Figura 172. Red bayesiana de decisión para el efecto windup	312
Figura 173. Compilación de la Red bayesiana para evaluar el efecto windup	313
Figura 174. Estadísticas de la variable V03	333
Figura 175. Perfil de la variable V03.....	334
Figura 176. Diagrama causa-efecto de la variable V03.....	334
Figura 177. Estadísticas de la variable V05	335
Figura 178. Perfil de la variable V05.....	336
Figura 179. Diagrama causa-efecto de la variable V05.....	336
Figura 180. Estadísticas de la variable V07	337
Figura 181. Perfil de la variable V07.....	338
Figura 182. Diagrama causa-efecto de la variable V07.....	338
Figura 183. Estadísticas de la variable V09	339
Figura 184. Perfil de la variable V09.....	340
Figura 185. Diagrama causa-efecto de la variable V09.....	340
Figura 186. Estadísticas de la variable V11	341
Figura 187. Perfil de la variable V11.....	342
Figura 188. Diagrama causa-efecto de la variable V11.....	342
Figura 189. Estadísticas de la variable V13	343
Figura 190. Perfil de la variable V13.....	344
Figura 191. Diagrama causa-efecto de la variable V13.....	344
Figura 192. Estadísticas de la variable V17	345
Figura 193. Perfil de la variable V17.....	346
Figura 194. Diagrama causa-efecto de la variable V17.....	346
Figura 195. Estadísticas de la variable V19	347
Figura 196. Diagrama causa-efecto de la variable V19.....	348
Figura 197. Estadísticas de la variable V21	349
Figura 198. Perfil de la variable V21.....	350
Figura 199. Diagrama causa-efecto de la variable V21.....	350
Figura 200. Estadísticas de la variable V23	351
Figura 201. Perfil de la variable V23.....	352
Figura 202. Diagrama causa-efecto de la variable V23.....	352
Figura 203. Estadísticas de la variable V31	353
Figura 204. Diagrama causa-efecto de la variable V31.....	354

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los yesos según norma UNE 102.001	38
Tabla 2. Características de las fases del sistema sulfato cálcico-agua (Wirsching, 2005) y (Villanueva & García, 2001).....	48
Tabla 3. Características químicas para los distintos yesos de construcción según el <i>Pliego general de condiciones para la recepción de yesos y escayolas en las obras de construcción (RY-85)</i>	48
Tabla 4. Finura de molido para los distintos yesos de construcción según el <i>Pliego general de condiciones para la recepción de yesos y escayolas en las obras de construcción (RY-85)</i>	49
Tabla 5. Tiempos de fraguado para los distintos yesos de construcción a partir de <i>Pliego general de condiciones para la recepción de yesos y escayolas en las obras de construcción (RY-85)</i> (nota ²)	53
Tabla 6. Influencia del agua de amasado y la duración de amasado en el tiempo de fraguado (Hugon & Serre, 1982).....	53
Tabla 7. Influencia del agua de amasado en la densidad (Hugon & Serre, 1982)	53
Tabla 8. Valores mecánicos mínimos para diversos productos de yeso. Según UNE 102031 (Villanueva & García, 2001).....	56
Tabla 9. Valores de dureza superficial para revestimientos de yeso (Villanueva & García, 2001)	57
Tabla 10. Clasificación de los materiales de construcción según su reacción al fuego según RD 312/2005 y UNE 13501-1:2002	58
Tabla 11. Resistencia al fuego de muros y tabiques de fábrica de ladrillo cerámico o sílico-calcáreo según Tabla F.1. del Anejo F del documento DB-SI del CTE.....	59
Tabla 12. Resistencia al fuego de muros y tabiques de fábrica de bloques de hormigón según Tabla F.2. del Anejo F del documento DB-SI del CTE.....	60
Tabla 13. Valores de coeficientes de conductividad térmica de distintos materiales en función de su densidad según <i>Base de datos del LIDER (versión 1.0)</i>	61
Tabla 14. Valores de coeficientes de penetración térmica de distintos materiales (del Río, 2002)	62
Tabla 15. Valores de coeficientes de absorción acústica de distintos materiales (del Río, 2002)	63
Tabla 16. Exigencias del CTE al ruido aéreo entre recintos colindantes horizontal o verticalmente según DB HR del CTE.....	63
Tabla 17. Valores de aislamiento acústico de algunas soluciones constructivas según el Catálogo de elementos constructivos del CTE (Ministerio de Fomento, 2011)	64
Tabla 18. Operaciones usando bloques	83
Tabla 19. Tipo de acciones del controlador	86
Tabla 20. Configuraciones de un controlador según Ziegler and Nichols (Ziegler y Nichols, 1942)	91
Tabla 21. Probabilidades condicionales de la red “The dog barking problem”	113
Tabla 22. Lista de software que aplican sistemas de RB (Sacerdoti, 2010)	130
Tabla 23. Cuadro de localización de averías de un horno de anhídrita.....	144
Tabla 24. Capacidad del difusor en gases trabajando a baja presión (unidades inglesas) y con caída de presión del orificio de $2,49hPa$ y un coeficiente de descarga (C_d) de $1,0$	151
Tabla 25. Pérdidas de presión de una tobera trabajando a baja presión en hPa por cada 30,5m de tubería de diámetro 40 para aire (unidades inglesas).....	153
Tabla 26. Pérdidas de presión de una tobera trabajando a baja presión en hPa por cada 30,5m de tubería de diámetro 40 para aire (unidades inglesas).....	154

Metodología y Análisis de la Fabricación de Anhídrita en Horno Rotativo Mediante Elementos de Inteligencia Artificial

Tabla 27. Calculo de la dimensión de las tuberías de aire mediante el método de igual superficie (unidades inglesas)	156
Tabla 28. Efecto de la presión en el aire (condición básica de 21,1°C de aire seco al nivel del mar y presión barométrica 1.013hPa)	157
Tabla 29. Efecto de la temperatura en el aire (condición básica de 21,1°C de aire seco al nivel del mar y presión barométrica 1.013hPa).....	158
Tabla 30. Efecto de la altura en el aire (condición básica de 21,1°C de aire seco al nivel del mar y presión barométrica 1.013hPa)	159
Tabla 31. Equivalencia en kJ de la mezcla butano-aire	159
Tabla 32. Propiedades caloríficas del gas natural.....	160
Tabla 33. Especificaciones de la mezcla gas y aire	161
Tabla 34. Propiedades térmicas de los materiales que intervienen en la transferencia de calor	163
Tabla 35. Propiedades térmicas del material KILOKALOR K-1025 aplicado en una capa de 114,3mm	163
Tabla 36. Selección de un quemador	165
Tabla 37. Propiedades de la deshidratación de la anhídrita.....	176
Tabla 38. Ensayos y rango de control para la fabricación de anhídrita	181
Tabla 39. Medidas de la reactividad de la anhídrita	191
Tabla 40. Resumen del consumo térmico de los hornos para 2011.	192
Tabla 41. Características de los hornos estudiados.....	193
Tabla 42. Datos de partida para el horno H5.....	195
Tabla 43. Propiedades del aire de entrada.....	196
Tabla 44. Composición del Gas Natural en España (Fuente: Publicación CNE. Facilitado por Gas Natural).....	196
Tabla 45. Flujos de material de entrada en el horno nº 5.....	196
Tabla 46. Flujos de material de entrada en horno nº 6.....	198
Tabla 47. Flujos de material de salida del horno nº 5.....	199
Tabla 48. Flujos de material de salida del horno 6	199
Tabla 49. Formulación de caudales saliente	200
Tabla 50. Entalpías de reacción de los hornos objeto de estudio.	202
Tabla 51. Entalpías de formación utilizadas para calcular las reacciones que se producen en el horno. Fuente: (Perry & Green, 1997) y (Gerhartz & Schulz, 1985-1996) para el caso de anhídrita.	202
Tabla 52. Coeficientes para obtención de capacidades caloríficas de gases (Sherwood, Reid, & Prausnitz, 1979).....	203
Tabla 53. Coeficientes para obtención de capacidades caloríficas de sólidos (Perry & Green, 1997).....	204
Tabla 54. Resultados balance de energía para horno 5.....	204
Tabla 55. Resultados balance de energía para horno 6.....	204
Tabla 56. Rendimiento térmico global de los hornos.....	207
Tabla 57. Punto de trabajo óptimo y características ventiladores para hornos de anhídrita nº5 y nº6.....	209
Tabla 58. Régimen de trabajo por estrangulación de los ventiladores de los hornos nº5 y nº6.....	209
Tabla 59. Cálculo de ahorros energéticos en condición real para los hornos nº5 y nº6 con variadores de frecuencia.....	210
Tabla 60. Variables implicadas en el proceso de calcinación de anhídrita.....	214
Tabla 61. Variables principales de proceso en la calcinación de anhídrita	215
Tabla 62. Correlaciones significativas entre variables implicadas en el proceso de calcinación de la anhídrita	216
Tabla 63. Coeficiente de correlación entre las principales variables.....	220
Tabla 64. Variables de control para el proceso de calcinación	220

Metodología y Análisis de la Fabricación de Anhídrita en Horno Rotativo Mediante Elementos de Inteligencia Artificial

Tabla 65. Elementos de control en la calcinación de la anhídrita.....	240
Tabla 66. Elementos de control en la entrada de mineral	242
Tabla 67. Elementos del control de la alimentación de hornos	243
Tabla 68. Grupos de proceso en la calcinación de anhídrita.....	245
Tabla 69. Bloques de programación y señales para proceso de calcinación	246
Tabla 70. Grupos en funcionamiento en la calcinación de anhídrita	247
Tabla 71. Variables de control para el proceso de calcinación	249
Tabla 72. Descripción de los parámetros del PID	253
Tabla 73. Señales del bloque CPID_1.....	256
Tabla 74. Señales del bloque CPID_2.....	257
Tabla 75. Señales del bloque CPID_3.....	259
Tabla 76. Estimación de los parámetros temporales del proceso	260
Tabla 77. Valores de los bloques de control PID.....	261
Tabla 78. Variables que afectan al proceso de calcinación de anhídrita.....	269
Tabla 79. Variables que afectan al control de calidad de la materia prima	269
Tabla 80. Variables que afectan al control de calidad del producto terminado	269
Tabla 81. Variables indirectas que afectan a la producción	270
Tabla 82. Otras variables que afectan al sistema de calcinación	271
Tabla 83. Relación de variables implicadas en el proceso.....	273
Tabla 84. Características de la RB.....	285
Tabla 85. Tabla de creencia de la RB	288
Tabla 86. Árbol de relaciones de la RB	289
Tabla 87. Relaciones de los nodos más influyentes.....	290
Tabla 88. Sensibilidad a otras variables de los principales nodos	291
Tabla 89. Ratios de algunas variables de la RB expuestas a test de nuevas muestras de datos	291
Tabla 90. Nuevo conjunto de variables críticas de proceso	297
Tabla 91. Coeficiente de correlación entre las nuevas variables con el caudal de material	300
Tabla 92. Variables de proceso para la evaluación del efecto windup.....	311

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	vii
LISTA DE ACRÓNIMOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xv
TABLA DE CONTENIDO	xix
RESUMEN	xxiii
ABSTRACT	xxiv
1 INTRODUCCIÓN	25
1.1 DOMINIO DE APLICACIÓN	25
1.2 MOTIVACIÓN	27
1.3 OBJETIVOS	27
1.4 PLAN DE DESARROLLO	28
1.5 MEDIOS UTILIZADOS	29
1.6 CONTENIDO DE LA TESIS	29
2 ESTADO DEL ARTE	31
2.1 EL YESO Y SUS APLICACIONES	32
2.1.1 Estado natural	32
2.1.2 Historia de utilización del yeso.....	38
2.1.3 Yacimientos de yeso en España	40
2.1.4 Producción de yeso en España	41
2.1.5 El sistema sulfato cálcico-agua	45
2.1.6 Propiedades de los yesos en polvo	47
2.1.7 Características de las pastas de yeso o escayola.....	50
2.1.8 Características de los productos endurecidos de yeso o escayola	54
2.1.9 Características técnicas de yesos y escayolas	57
2.1.10 Proceso de fabricación industrial de yeso para construcción.....	64
2.2 AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL. SISTEMAS DE CONTROL	76
2.2.1 Sistemas de control	76
2.2.2 Sistemas de lazo abierto.....	76
2.2.3 Sistemas de lazo cerrado	77
2.2.4 Función de transferencia	78
2.2.5 Representación con bloques	81
2.2.6 Estabilidad de un Sistema.....	83
2.2.7 Respuesta de un sistema	85
2.2.8 El Controlador.....	86
2.3 INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y SISTEMAS EXPERTOS	93
2.3.1 Inteligencia artificial (IA).....	93
2.3.2 Sistemas Expertos.....	95

Metodología y Análisis de la Fabricación de Anhídrita en Horno Rotativo Mediante Elementos de Inteligencia Artificial

2.3.3	Redes Bayesianas.....	100
2.3.4	La Inferencia en redes bayesianas.....	107
2.3.5	Métodos para cálculo de redes bayesianas con datos desconocidos	112
2.3.6	Ejemplo de propagación de una red bayesiana.....	112
2.3.7	Métodos de búsqueda.....	119
2.3.8	Aprendizaje mediante Redes Bayesianas	120
2.3.9	Software para RB.....	127
2.4	ESTABLECIMIENTO DEL PROBLEMA.....	131
3	DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	132
3.1	PROCESO DE CALCINACIÓN DE ANHIDRITA.....	134
3.1.1	El horno de calcinación de AN.....	134
3.1.2	Quemador de gas natural.....	144
3.1.3	Proceso de fabricación de anhídrita.....	168
3.1.4	Control de calidad en la fabricación de anhídrita.....	180
3.2	ANÁLISIS ENERGÉTICO Y BALANCES.....	192
3.2.2	Perfil energético del horno de calcinación	194
3.3	ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DEL PROCESO.....	211
3.3.1	Variables implicadas en la calcinación de la Anhídrita.....	211
3.3.2	Variables directas principales del proceso de producción de Anhídrita	214
3.3.3	Relación entre las principales variables de la calcinación.....	216
3.5	SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL.....	221
3.5.1	Gestión mediante sistema MES.....	221
3.5.1	Procesos por lotes Torre 1, 2 y ensaque.....	222
3.5.2	Procesos en continuo Hornos semihidrato y anhídrita	226
3.5.1	Recepciones, expediciones y carga a líneas de hornos 1, 2, 3 y torres	230
3.5.2	Equipos de Planta	232
3.5.3	Proceso de calcinación de anhídrita en continuo.....	238
3.5.4	Maniobras y secuencias de control de cada fase	242
3.6	SISTEMA DE REGULACIÓN.....	249
3.6.1	Variables a regular.....	249
3.6.2	Aplicación de controlador PID.....	249
3.6.3	Simulación del proceso.....	259
3.7	MODELO DEL PROCESO MEDIANTE REDES BAYESIANAS.....	265
3.7.1	Aplicación de redes bayesianas	265
3.7.2	Software para RB.....	265
3.7.3	Generación y gestión de una RB.....	266
3.7.4	Modelo estadístico de un horno de anhídrita mediante RB.....	268
4	ANÁLISIS DE APLICACIONES.....	293
4.1	ANÁLISIS DEL SISTEMA DE REGULACIÓN APLICADO.....	294
4.1.1	Fiabilidad de los datos de control.....	294
4.1.2	Mejora de las correlaciones entre variables	296
4.2	ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL MEDIANTE RB.....	309
4.2.1	El efecto windup.....	309
4.2.2	Variables implicadas.....	310
4.2.3	Programación de una RB de evaluación de windup.....	311
5	CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....	315
5.1	CONCLUSIONES.....	315

Metodología y Análisis de la Fabricación de Anhídrita en Horno Rotativo Mediante Elementos de Inteligencia Artificial

5.2	CONTRIBUCIONES DE LA TESIS	316
5.3	FUTUROS DESARROLLOS	317
	REFERENCIAS	319
	ANEXOS	331
	ANEXO I. ESTADÍSTICAS DE LAS VARIABLES ANALIZADAS	333

RESUMEN

La revolución industrial fue el disparo de salida hacia una nueva sociedad en que se sustituían las antiguas formas de vida por otras nuevas y diferentes. Ya desde los inicios fue necesario desarrollar nuevos métodos, nuevas herramientas y nuevas formas de concebir la producción en masa. Las redes bayesianas son una de éstas herramientas de gestión industrial. Su programación es sencilla y su aspecto externo es bastante intuitivo, pero recoge en sus algoritmos relaciones de información muy complejas, que no resultan nada intuitivas si no se tratan con las herramientas adecuadas. Una de sus propiedades más importantes es su capacidad de autoaprendizaje.

El sector del yeso en España es un sector que ha tenido mucho auge en las últimas décadas debido a los sistemas constructivos. Para la fabricación de yeso en polvo aplicable y controlable en su fraguado, se utilizan varios componentes, algunos intrínsecos del propio yeso y otros aportados en el momento del mezclado, como aditivación. Uno de los componentes intrínseco del yeso para construcción es la anhídrita o yeso totalmente deshidratado que trabaja como parte inerte.

Ésta investigación se basará en la mejora del proceso de calcinación de anhídrita usando un horno rotativo de cocción directa. El trabajo aportará como novedad una actualización de los sistemas usados actualmente para la fabricación de anhídrita, ya que a parte de mejorar el control del proceso mediante lazos de control más eficientes y autogestionados, así como la introducción de mejoras en los niveles MES y Scada, aportará elementos de inteligencia artificial mediante la aplicación de las citadas redes bayesianas.

Las contribuciones de la tesis serán las siguientes:

- Recopilación, evaluación, selección y definición de las mejores prácticas en el proceso de fabricación de anhídrita.
- Automatización del proceso de la fabricación de anhídrita
- Creación de lazos de regulación eficientes y autogestionados para el control del proceso de calcinación de la anhídrita en un horno rotativo de tres tubos y de calcinación directa.
- Creación e implantación industrial de redes bayesianas de control del proceso de fabricación de anhídrita actuando como sistema experto a partir de los datos autogestionados que suministra el sistema automáticamente y que le hace más eficiente con la experiencia. Auto-ajustándose a cada hora de funcionamiento y en cada cambio de condiciones de proceso, de calidad, de naturaleza, de equipos y de meteorología.

ABSTRACT

The industrial revolution was the starting shot for a new society in which they were replacing the old forms of life with new and different. And from the start was necessary to develop new methods, new tools and new ways of thinking about mass production. Bayesian networks are one of these tools of industrial management. Its programming is simple and external appearance is quite clever, but its stated in their algorithms very complex information relationships that are not at all intuitive if not treated with the right tools. One of its most important properties is its capacity to self-learning.

The gypsum industry in Spain is a sector that has had a long boom in recent decades due to the building systems. For the manufacture of gypsum powder applied and checked on its setting, using multiple components, some intrinsic to the gypsum and other provided at the time of mixing, as additives. One of the intrinsic components of construction gypsum is the anhydrite, completely dehydrated gypsum, working as inert part.

This research work builds on the improvement of anhydrite calcination process using a rotary kiln direct cooking. The work provide an update as new systems currently used for the manufacture of anhydrite, since in addition to improving process control via control loops more efficient and self-managed, and improvements in levels MES and SCADA provide artificial intelligence elements by applying the above Bayesian networks.

The contributions of this PhD are as follows:

- Collection, evaluation, selection and identification of best practices in the manufacturing process of anhydrite.
- Automation of the fabrication process of anhydrite
- Creation of control loops efficient and self-administered to control the process of calcination in a rotary kiln anhydrite three tubes and direct calcination.
- Creation and implementation of Bayesian networks industrial process control manufacturing expert system acting as anhydrite from self-managed data provided by the system automatically makes you more efficient with experience. Self-adjusting to each time of operation and at each change of process conditions, quality, nature, equipment and meteorology.

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza una exposición general de los temas tratados en esta tesis. En el mismo se justifican las razones que la motivan y que la hacen necesaria, así como se reporta la metodología seguida y el plan de desarrollo de la misma, los medios utilizados y una breve referencia al contenido de cada uno de los capítulos que componen este trabajo.

1.1 DOMINIO DE APLICACIÓN

La revolución industrial fue el disparo de salida hacia una nueva sociedad en que se sustituían las antiguas formas de vida por otras nuevas y diferentes. Ya desde los inicios fue necesario inventar y desarrollar nuevos métodos, nuevas herramientas y nuevas formas de concebir la producción en masa. Esa evolución primigenia no ha cesado. Anualmente aparecen nuevas metodologías y nuevas concepciones para la realización del trabajo industrial. En el momento actual, gracias a herramientas eficientes de comunicación, estas innovaciones se propagan con celeridad. Las grandes empresas, muchas multinacionales, ayudan claramente a esta propagación del conocimiento.

En los últimos años, como no puede ser de otra manera, han continuado apareciendo sistemas y herramientas útiles para la producción y la ingeniería en planta. La mayoría de estas herramientas tienen un ciclo de vida determinado: aparecen en alguna planta, en algún rincón del mundo, normalmente Japón, Estados Unidos o Europa; se extienden mediante consultores externos, o por la relación cliente-proveedor o cliente-ingeniería, entre otras formas de contacto; se aplican en masa, se enseñan en las escuelas de gestión industrial y luego, al cabo de unos años, sirven de base para que alguien cree una nueva herramienta, con un nuevo concepto de base, pero que intrínsecamente recoge el bagaje y la fortaleza de muchas ideas anteriores que a la vez dejan de estar en un primer plano de la actualidad industrial.

Las redes bayesianas son una herramienta que aplica la inteligencia artificial. En estos momentos se está generando un gran empuje en su aplicación para muchos y diversos fines. Todavía esta en fase de crecimiento y no se aplican en masa en la industria, pero están llamadas a ser una herramienta muy útil para las aplicaciones que se diseñarán en los próximos años. Su programación es, en términos relativos, sencilla y su aspecto externo es bastante intuitivo, pero recoge en sus algoritmos relaciones de información muy complejas, que no resultan nada intuitivas si no se tratan con las herramientas adecuadas. En los últimos años, se está compartiendo el uso de éstas redes con otro tipo de sistemas expertos como son las redes neuronales, por citar un ejemplo.

En la industria actual, una posible apuesta de futuro son las aplicaciones de inteligencia artificial y los sistemas expertos, por varias razones que se exponen durante toda esta tesis. Se podría destacar que una de las características más importantes para éste trabajo, es su capacidad para aprender, en definitiva, su capacidad de autoaprendizaje.

El sector del yeso en España es un sector que ha tenido mucho auge en las últimas décadas, debido a los sistemas constructivos de este país, lo que ha situado a España como el tercer productor de yeso en 2011 con más de once millones de toneladas fabricadas. Durante este tiempo el sector se ha reconvertido para adaptarse a los sistemas constructivos actuales, pasando parte de la fabricación de yeso en polvo a

fabricación de paneles de cartón-yeso y prefabricados. El sector del yeso en polvo, en este tiempo, ha aprovechado la ocasión, como tantos sectores industriales, para crear productos con mayor valor añadido, como son masillas, colas, pastas de juntas y de agarre. También se han realizado mejoras en el producto tradicional de yeso para la construcción sobre ladrillo, creándose yesos de segunda y tercera generación, que garantizan tiempos de fraguado muy concretos y a la carta, mejorando la trabajabilidad mediante la inclusión de elementos ligeros como la perlita expandida o la vermiculita, reduciendo su peso, aumentando su resistencia al fuego o al contraste térmico, entre otros. En la zona de Beuda en Girona se explotan canteras de este mineral, siendo la planta de fabricación de yeso en polvo, en estos momentos, la segunda mayor de Europa en capacidad instalada.

Para la fabricación de yeso en polvo aplicable y controlable en su fraguado, se utilizan varios componentes, algunos intrínsecos del propio yeso y otros aportados en el momento del mezclado, como aditivación, que le confieren las características deseadas. En su base se podría decir que el yeso que se usa actualmente está formado por semihidrato, (o yeso natural en parte deshidratado que le conferirá sus características de fraguado al producto), anhídrita (yeso totalmente deshidratado que trabaja como parte inerte) y aditivos.

Para la deshidratación de la anhídrita se pueden usar múltiples tipos de hornos de calcinación, directos, indirectos, verticales, horizontales, de un tubo, de dos, de tres, etc. Actualmente la tecnología más usada son los hornos rotativos de tres tubos y de calcinación directa, sobretodo por su buena regularidad de proceso. Ésta tesis se basará en un horno de este tipo calcinando anhídrita.

La calcinación de la anhídrita no es, a priori, un proceso complejo: se escoge el mineral apto en la cantera, se rompe a tamaños manejables, se introduce en la planta donde se le realiza un cribado y una molienda primaria, se calcina a unos 550 grados, se enfría el material y se almacena en los silos, donde acaba su proceso mediante reacciones de rehidratación natural, antes de ser un material apto para su mezclado con otros componentes. Como todo proceso natural, una de las complejidades que aparecen en el proceso son las intrínsecas de su naturaleza. El yeso nunca es igual, cada día es diferente, cada hora es diferente y cada segundo es diferente. Por tanto, el proceso debe ser ajustado cada día, cada hora y cada segundo. Así mismo debe tenerse un sistema de control de calidad que garantice que el material fabricado en cada paso del proceso sea el correcto y será clave su trazabilidad en este aspecto.

Por otra parte están los elementos externos al mineral y que son similares a los de otros procesos más estables, como son las condiciones atmosféricas y meteorológicas, el rendimiento de los equipos, su mantenimiento, la eficiencia de sus lazos de control, la experiencia del operario (el hecho de trabajar con una materia prima natural lo convierte en un factor importante) y muchos otros.

Ésta tesis pretende aportar como novedad una actualización de los sistemas usados actualmente para la fabricación de anhídrita, ya que a parte de mejorar el control del proceso mediante lazos de control más eficientes y autogestionados, así como la introducción de mejoras en los niveles MES y Scada, aportará elementos de inteligencia artificial mediante la aplicación de las citadas redes bayesianas.

La aplicación de estas redes vendrá condicionada por un análisis previo de todos los factores que intervienen o que pueden intervenir en el proceso. Se realizará un análisis de variable por variable, sus estados y sus relaciones con otras variables. La eficiencia de la aplicación del sistema experto vendrá muy condicionada por el buen conocimiento de éstas, así como de las funciones de transferencia de energía y masa,

las pérdidas del sistema, los equipos, los controles de calidad y de proceso, los sistemas de automatización, la materia prima, los lazos de control a aplicar y sobre todo, y lo más importante, la experiencia personal acumulada que se tiene sobre el producto y su tratamiento.

Como se enuncia, la tesis aporta una revisión de todos los procesos de fabricación, recopilando las mejores prácticas y redefiniendo los elementos de control intrínsecos y extrínsecos a los equipos de fabricación, así como la automatización eficiente de dichos equipos, con la correspondiente aportación de datos al sistema para su evaluación.

La regulación aplicada también configura una novedad en el campo aplicado, ya que a diferencia de otras industrias del mineral, la industria actual del yeso no aplica dichos sistemas de control avanzados de las variables del sistema.

Otra aplicación fundamental de la tesis, como se ha dicho, será el modelo de autodiagnóstico mediante redes bayesianas aplicadas a la deshidratación del yeso, con lo cuál se tendrá una herramienta de control y decisión muy importante para el ajuste de un proceso complejo, no tanto por su propio proceso sino por las condiciones de naturaleza cambiantes de su materia prima.

1.2 MOTIVACIÓN

Con los elementos expuestos en el punto anterior de esta parte introductoria, se puede ver clara la motivación de esta tesis, enfocándola hacia un sentido de la conjugación de las diferentes tecnologías aplicadas para obtener la mejora deseada en el proceso y en su actualización.

La industria de fabricación de yeso en polvo no ha presentado grandes cambios en su estrategia, en sus equipos ni en sus procesos. Por citar un ejemplo, la industria del cemento, probablemente por su tratamiento multinacional, ya que el Clinker se transporta mejor que el yeso en polvo y su precio es mayor, se ha armado con mejores estrategias de fabricación que la del yeso en polvo.

El actualizar en parte la fabricación del yeso, concretamente la parte de la fabricación de la anhidrita se configura como la mayor motivación de esta tesis. Mejorar el control del proceso, su trabajabilidad y la recogida de datos, la mejor automatización y autorregulación y su gestión por métodos de autoaprendizaje configurarán metodologías para conseguirlo.

1.3 OBJETIVOS

Vistos los motivos expuestos en el apartado anterior, se definen en este punto los objetivos a los que aspira esta tesis.

Estos objetivos se podrán agrupar en cuatro grupos:

- Recopilar, evaluar, seleccionar y definir las mejores prácticas en el proceso de fabricación de anhidrita. Desde el inicio del proceso, con el tratamiento preliminar del material hasta el almacenaje del mismo en silo, previo a su uso.
- Automatizar el proceso de la fabricación de anhidrita, enmarcado en un proyecto de alcance superior, como es la automatización de una planta de fabricación de productos de yeso en polvo

- Crear lazos de regulación eficientes y autogestionados para el control del proceso de calcinación de la anhidrita en un horno rotativo de tres tubos y de calcinación directa.
- Crear un modelo del sistema que lo autodiagnostique y que sirva para evaluar su estado en cada momento, sus probabilidades de falla y que le permita un autoaprendizaje a medida que el sistema vaya trabajando. Auto-ajustándose a cada hora de funcionamiento y en cada cambio de condiciones de proceso, de calidad, de naturaleza, de equipos y de meteorología.

1.4 PLAN DE DESARROLLO

Para la consecución de los objetivos de la tesis se ha realizado un plan de trabajo que permite dicho fin. Dicho plan de trabajo se resume de esta forma:

- Realizar un exhaustivo estado del arte de las tecnologías usadas para la fabricación de yeso, concretamente para la fabricación de yeso anhidro o anhidrita, y sus procesos de regulación automática.
- Analizar las mejores prácticas referentes a la fabricación de anhidrita, al control de calidad, a los equipos, a las instalaciones, a la regulación de los hornos de calcinación de yeso y al calibrado de los quemadores para dichos hornos.
- Analizar y modelar los sistemas térmicos y energéticos del sistema horno y del sistema quemador, evaluando los balances de masa y energía que rigen su funcionamiento, encontrando los puntos de trabajo óptimos en sus curvas de rendimiento. Se usarán modelos de cálculo energético.
- Implantar un sistema de automatización que permita una recogida y un reporte de datos eficiente de los principales parámetros de control de la calcinación de la anhidrita en dichos hornos. Se aplicarán varios niveles de automatización jerarquizada y software apto para su gestión y exportación de resultados.
- Evaluación de los datos de todas las variables directas e indirectas del proceso, evaluando la importancia relativa de cada una, su sensibilidad y su relación de dependencia o independencia con el resto. Se usará para este fin software estadístico adecuado para tratar grandes muestras de datos y múltiples variables.
- Diseñar e implantar los lazos de control eficientes y autogestionados para el ajuste óptimo dependiendo de las circunstancias y las condiciones de entrada para el proceso de calcinación de la anhidrita. Para ello se programaran los bloques PID del PLC del sistema de automatización industrial.
- Creación e implantación industrial de redes bayesianas de control del proceso de fabricación de anhidrita actuando como sistema experto a partir de los datos autogestionados que suministra el sistema automáticamente y que le hace más eficiente con la experiencia. Para este fin se usan software diseñados para tratar grandes redes bayesianas multiconectadas y programación para la interrelación entre el sistema experto y los diferentes niveles de gestión de la automatización.

La metodología usada para realizar ésta tesis ha sido la de realizar una investigación exhaustiva para cada apartado clave de la misma (tecnología, fabricación de anhidrita,

redes bayesianas, sistemas de control e implantación industrial). Posteriormente se han evaluado todas las bases de datos y reportes generados por los sistemas de información disponibles, aportando éstos, mediante un análisis estadístico, una base indispensable para la generación de las propuestas de valor de éste trabajo. Así, finalmente se han podido establecer los sistemas de diagnóstico que aportan la solidez al proceso y que permiten avanzar en esta área de aplicación industrial.

1.5 MEDIOS UTILIZADOS

Para la elaboración de esta tesis se ha usado la suite ofimática Microsoft Office 2010, trabajando bajo el S.O. Microsoft Windows 7 (64bits) y el siguiente software especializado:

- AEmes V.1.8
- AutoCAD V.18.2
- Minitab V.16.2
- Matlab V.7.13
- Netica V.4.16
- Scada Citect Versión 5.50 Service Pack C

Así mismo se han usado las instalaciones y equipos para fabricación de yeso en polvo de la planta que la empresa Yesos Ibéricos, S.A. tiene en su planta de Beuda (Girona).

1.6 CONTENIDO DE LA TESIS

La tesis se ha estructurado en cinco capítulos. En éste apartado se describirá brevemente el contenido de los mismos.

En primer lugar se ha realizado un apartado introductorio al contenido posterior, identificando los motivos y objetivos de la tesis, así cómo su plan de desarrollo y los medios utilizados para su elaboración y estudio.

A continuación se encuentra el Estado del Arte de los principales campos donde se ubica éste trabajo, que serán el de la materia prima (el Yeso), la regulación industrial y su aplicación actual, básicamente sistemas de controladores PID y los sistemas expertos, poniendo el foco en las Redes Bayesianas.

En el tercer capítulo se realiza el desarrollo de la tesis. A partir del análisis del proceso de calcinación de anhídrita, con todos los elementos que lo componen, se realizará un balance másico y energético completo del perímetro estudiado y de una forma más global. También se analizarán todas las variables implicadas en el proceso y las relaciones entre ellas, a partir de la gran cantidad de datos registrados. Se desarrollará el proceso de automatización de la calcinación y se introducirán los elementos para la regulación automática del sistema.

En este tercer capítulo se creará un modelo mediante redes bayesianas que permitirá tener parametrizado el proceso de calcinación mediante un moderno y eficiente sistema, analizando las variables implicadas y su estados.

Posteriormente la aplicación realizada se estudiará de una forma comparativa, haciendo análisis de bondad entre los sistemas clásicos de regulación y los sistemas propuestos mediante regulación avanzada y sistemas expertos.

En el último capítulo se presentan las conclusiones a las que ha llegado esta tesis, analizando las contribuciones aportadas y previendo los futuros desarrollos posibles en su campo de aplicación.

2 ESTADO DEL ARTE

Como se ha descrito en el capítulo introductorio, éste trabajo se enmarca dentro del sistema de calcinación de anhidrita en un horno rotativo y su gestión mediante sistemas expertos. En este estado del arte se analizará por una parte la materia prima. Conocerla será una parte fundamental para el posterior desarrollo de las propuestas, ya que precisamente se basa en la fabricación de anhidrita, un material semiterminado procedente del sulfato cálcico. Se relacionará el origen y la historia del mineral y su tratamiento, así como los usos que se le ha dado al mismo durante todas sus etapas de uso. Se mostrarán los últimos datos estadísticos disponibles sobre su fabricación y uso en el mundo. En apartados sucesivos se verán sus propiedades físico-químicas y sus particularidades en diferentes condiciones, sin olvidar sus aplicaciones, en base a los yesos técnicos de segunda y tercera generación, que son los actualmente utilizados. Parte fundamental de este capítulo será la introducción al proceso de fabricación industrial actual de los derivados del yeso, cosa que servirá de base para el basto tratamiento que se hará del mismo en el desarrollo posterior.

A continuación se referenciarán, como herramienta de análisis que permitirá su implantación posterior a éste sistema de calcinación, los orígenes y el momento actual de la regulación automática, analizando muchos estudios realizados en este campo, en la investigación del mismo y en su aplicación industrial.

Con atención especial, este estado del arte se centrará en los sistemas expertos, en el campo de la inteligencia artificial, y en particular en las redes bayesianas. Se justificará posteriormente el uso de estas técnicas y herramientas estadísticas para el control del sistema de referencia. Una de las aportaciones principales de esta tesis, será la de aplicar a un entorno industrial este tipo de redes de decisión, cosa que aportará valor a futuros desarrollos en este campo.

2.1 EL YESO Y SUS APLICACIONES

2.1.1 Estado natural

2.1.1.1 Origen del yeso

La piedra de yeso, conocida también como *aljez*, está compuesta por el mineral yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), frecuentemente mezclado con arcillas y rocas calcáreas (Regueiro & Calvo, 1997).

Se trata de una roca sedimentaria que tiene su origen geológico en la evaporación de antiguos mares o lagos salados (Villanueva & García, 2001). También puede generarse por hidratación de la anhidrita o, en algunos casos, por la acción de aguas sulfurosas, ya sea sobre calizas o tobas volcánicas.

En el primer caso recibe la denominación de yeso primario, mientras que, en el caso de formarse por la hidratación de la anhidrita natural, se conoce como yeso secundario. Una forma típica de yeso relacionado con la hidratación de anhidrita es el yeso fibroso (Alonso Zarza, 2010).

Tal como se ha comentado, los depósitos de yeso pueden darse en ambiente marino, en llanuras costeras evaporíticas o continentales y en lagos salinos.

En las llanuras costeras evaporíticas, sometidas a intensa evaporación de agua de mar, el yeso y/o la anhidrita precipita, formando potentes depósitos de sulfato cálcico nodular o laminado. En este tipo de ambiente los cristales pueden crecer a partir del fondo de las lagunas hacia arriba o bien formarse en la superficie de la salmuera y caer posteriormente por gravedad hacia el fondo donde se acumulan (Figura 1) (Regueiro & Calvo, 1997).

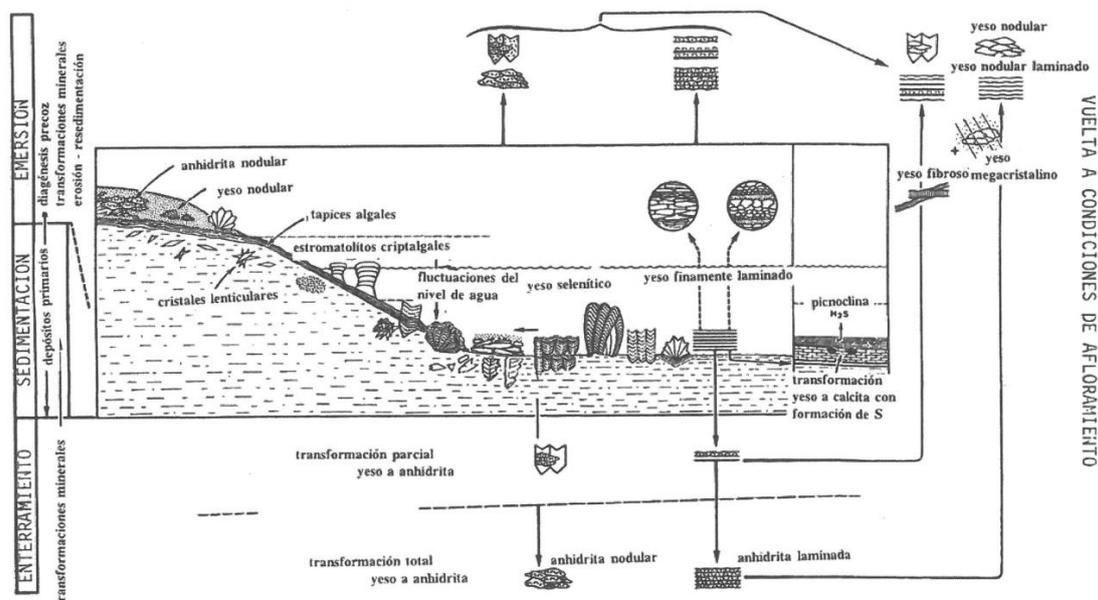


Figura 1. Ambientes de formación de yesos y tipos de precipitados más comunes en ellos (Rouchy, 1982).

El yeso también precipita en aguas continentales, esencialmente en lagos salinos. En estos lagos el yeso, y en ocasiones la anhidrita, se forman de manera similar que en

los ambientes marinos. Según sea la composición de las salmueras continentales, el sulfato cálcico se acumula acompañado de otras sales (Regueiro & Calvo, 1997).

Debido a la inestabilidad del yeso y de la anhidrita, estos minerales son susceptibles de sufrir transformaciones cuando son enterrados a cierta profundidad. Estas transformaciones afectan tanto a su composición como a su estructura. El yeso enterrado a unos pocos centenares de metros, se transforma por deshidratación a anhidrita, siendo la anhidrita la forma más estable en condiciones de mayor presión y temperatura. Si la anhidrita se exhuma vuelve a convertirse en yeso que, en este caso, se denomina yeso secundario (Regueiro & Calvo, 1997).

Los fenómenos geológicos de diagénesis (transformaciones durante la compactación de los sedimentos) e hipergénesis (transformaciones y alteraciones tras la exhumación de las rocas) se relacionan en lo que se conoce como *ciclo geológico del yeso* Figura 2) (Ortí, Rosell, & Salvany, 1992).



Figura 2. Ciclo geológico (profundo) del sulfato cálcico (Ortí & Rosell, 1991).

El sulfato cálcico se presenta en la naturaleza en tres fases distintas: en forma de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), en su forma anhidra (anhidrita, CaSO_4), o como yeso hemihidrato (basanita, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). A continuación se describirán estas tres fases.

2.1.1.2 Cristalografía y mineralogía del yeso

El yeso es el mineral más abundante del grupo de los sulfatos hidratados.

Cristaliza en el sistema monocíclico en el grupo espacial $I2/a$ según Schofield, Knight, & Stretton (1996). Presenta una microestructura cristalina laminar en la que se alternan capas de sulfato cálcico y capas de agua. El sulfato cálcico está formado por una alternancia de iones sulfato, organizados en pirámides tetraédricas, alternadas con iones calcio formando un cristal iónico. El agua se alterna con las láminas de sulfato de calcio, uniéndose mediante puentes de hidrógeno (Figura 3) (Villanueva & García, 2001).

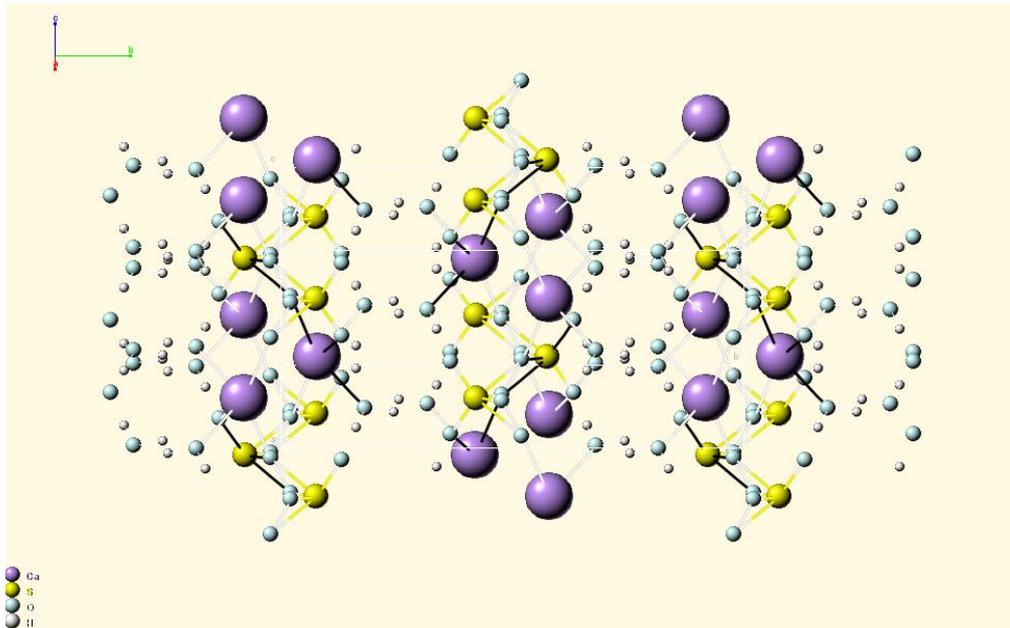


Figura 3. Estructura cristalina del yeso según (Schofield, Knight, & Stretton, 1996). Tomada del sitio web de Mineralogy Database (Mineralogy Database, 2009).

Su composición química en óxidos es la siguiente (Dana & Hurlbut, 1959):

32,6% CaO
46,5% SO₃
20,9% H₂O

A continuación se describen sus propiedades físicas (Dana & Hurlbut, 1959), (Departamento de Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía. Universidad de Valladolid, 2011).

- Color: Incoloro, blanco, gris; diversas tonalidades de amarillento, rojizo, castaño, como consecuencia de impurezas
- Raya: Blanca
- Brillo: Generalmente vítreo, también perlado y sedoso
- Diafanidad: Transparente a translúcida
- Fusibilidad: Pierde una molécula de agua a 128°C. Se deshidrata totalmente a 163°C. F=7
- Exfoliación: En cuatro direcciones; perfecta, con producción fácil de hojas delgadas
- Fractura: Concoidea a astillosa
- Tenacidad: Flexible pero no elástico
- Dureza: Baja. H=2,0 escala Mohs (se raya con la uña)
- Densidad: Baja. G=2,32 g/cm³
- Hábito: tabular, acicular, lenticular, dando con frecuencia maclas en forma de Cola de Golondrina, Punta de Flecha, Rosa, etc. Agregados fibrosos u hojosos. Masas espáticas, granulares, concrecionadas, pulverulentas,... (Figura 4)

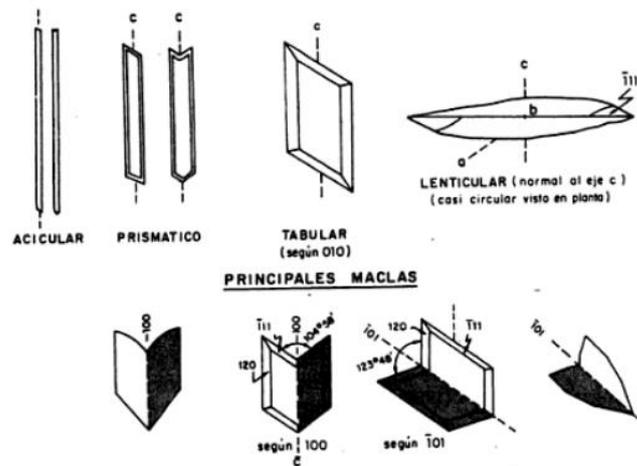


Figura 4. Morfología de los cristales de Yeso (Ortí, 1989).

En el análisis de las variedades del yeso, se pueden destacar, como los tipos de yeso más comunes, según su estructura y textura, los yesos macrocristalinos o seleníticos, los yesos laminados y los yesos nodulares (Regueiro & Calvo, 1997). También abunda el yeso fibroso y el yeso lenticular. Se describen todos ellos a continuación:

- **Yesos macrocristalinos o seleníticos.** Generalmente se ordenan en cristales maclados pero en ocasiones dan lugar a agregados macrocristalinos desordenados. Presentan morfologías muy variadas (cola de golondrina, en forma de sable, árbol de Navidad, espejuelo, etc.) (yeso cristalizado en Punta de Flecha, Figura 5).
- **Yesos laminados.** Se trata de agregados de cristales muy finos, ya sea con formas irregulares o de lenticulas o láminas (Figura 5).
- **Yesos nodulares.** Formados por un agregado de microcristales interpenetrados. De apariencia compacta y color blanco o amarillento. Un ejemplo de esta tipología sería el alabastro (Figura 5).
- **Yeso fibroso.** Aparece cristalizado en forma de fibras que le dan un aspecto sedoso (Figura 5).
- **Yeso lenticular.** Cristaliza en forma de lente biconvexa.

En los ensayos con yeso se observa que funde con facilidad y es soluble en ácido clorhídrico y agua caliente. La solución con cloruro de bario da un precipitado blanco de sulfato bórico (Dana & Hurlbut, 1959) (Mottana, Crespi & Liborio, 1991).

2.1.1.3 Cristalografía y mineralogía de la anhidrita

El sulfato cálcico también se presenta en la naturaleza en su forma anhidra, denominándose anhidrita o karstenita.

Tal como se ha comentado anteriormente (capítulo 2.1.1.1), la anhidrita puede tener origen evaporítico o como producto de la deshidratación del yeso. Puede, además, volver a transformarse en yeso en presencia de agua, dando lugar a yeso secundario.



Figura 5. Variedades de yeso. Tomada de la Guía Interactiva de minerales y rocas (Rubio, 2000).

Cristaliza en el sistema rómbico (Dana & Hurlbut, 1959) en el grupo espacial *Amma* (Chang, Howie, & Zussman, 1996) (Figura 6)

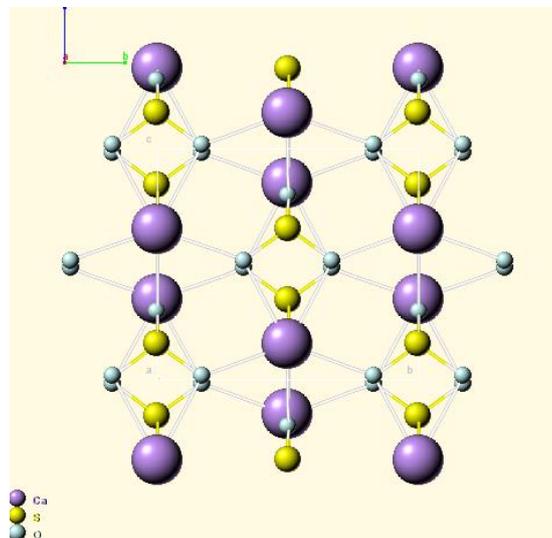


Figura 6. Estructura cristalina de la anhidrita según (Hawthorne & Ferguson, 1975). Tomada del sitio web de Mineralogy Database (Mineralogy Database, 2009).

Su composición química en óxidos es la siguiente (Dana & Hurlbut, 1959):

41,2% CaO
58,8% SO₃
0% H₂O

A continuación se describen sus propiedades físicas (Dana & Hurlbut, 1959), (Departamento de Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía. Universidad de Valladolid, 2011) (Figura 7)

- Color: Incoloro a azulado o violeta. También blanco, rosado, castaño o rojizo
- Raya: Blanca a blanca grisácea
- Brillo: Vítreo a nacarado
- Diafanidad: Translúcida a opaca
- Fusibilidad: Pasa a monoclinica a 1193°C. Funde a 1450°C. F=7
- Exfoliación: Perfecta, con producción de bloques rectangulares
- Fractura: Desigual a astillosa
- Tenacidad: Frágil
- Dureza: H=3,0-3,5 escala Mohs
- Densidad: G=2,89-2,98 g/cm³
- Hábito: Generalmente aparece en masas compactas, granulares y fibrosas. Raramente en forma de cristales tabulares y de agregados paralelos o radiales.

A continuación se detallan las variedades existentes de anhidrita (Departamento de Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía. Universidad de Valladolid, 2011):

- **Piedra de tripa.** Variedad en pliegues delgados muy apretados. Blanca, gris, rojiza o azulada
- **Vulpinita.** Anhidrita granular o escamosa. Gris, parda o azul



Figura 7. Anhidrita. Tomada de la Guía Interactiva de minerales y rocas (Rubio, 2000)

En los ensayos se observa que funde con facilidad y es soluble en ácido clorhídrico caliente. La solución con cloruro de bario da un precipitado blanco de sulfato bórico (Dana & Hurlbut, 1959) (Mottana, Crespi, & Liborio, 1991).

2.1.1.4 Cristalografía y mineralogía de la basanita

Se trata de la fase del yeso menos frecuente en la naturaleza, debido a su inestabilidad. Se produce por deshidratación parcial del yeso, ligeramente por encima de 100°C (Villanueva & García, 2001).

La basanita cristaliza en el sistema rómbico.

Su composición química en óxidos es la siguiente (Dana & Hurlbut, 1959):

38,7% CaO
49,7% SO₃
9,3% H₂O

2.1.1.5 Clases de yeso de acuerdo a su pureza

En España se puede encontrar piedra de yeso con más del 95% de pureza, mientras que por debajo del 70% de pureza no se suele utilizar (Villanueva & García, 2001).

Existen cinco clases de yeso establecidas, de acuerdo a la norma UNE 102.001 *Aljez o piedra de yeso. Clasificación. Características*, según su contenido en sulfato cálcico dihidratado (Tabla 1).

Clase	Contenido mínimo en sulfato cálcico dihidratado (%)
I	95
II	90
III	80
IV	70
V	60

Tabla 1. Clasificación de los yesos según norma UNE 102.001

2.1.2 Historia de utilización del yeso

El yeso es uno de los minerales más antiguos utilizados como material de construcción.

Las primeras muestras de la utilización del yeso en la construcción que se conocen hoy en día aparecen en el yacimiento neolítico de Catal-Hüyük (Turquía) (Figura 8) y datan del año 7000 a.C. (Garate, 1999). En este lugar, se utilizó el yeso como revestimiento y también en los suelos, el hogar y los hornos (Díez, 1997).



Figura 8. Muro pintado en edificio. Imagen tomada de la página web oficial de Catalhoyuk Research Project (Catalhoyuk Research Project, 2012).

También se encuentran trabajos en yeso en el asentamiento neolítico de Jericó (siglo VI a.C.) en forma de yeso moldeado (Villanueva & García, 2001).

El documento más antiguo sobre el yeso data del siglo IV antes de Cristo. Teofrasto, discípulo de Platón y Aristóteles, en su *Tratado de la Piedra* cita el uso del yeso como material de ornamentación en frescos, bajo relieves y estatuas y habla de la posibilidad de su reutilización. Concretamente indica la posibilidad de recuperar los enlucidos o los bajo relieves, sometiéndolos a una nueva cocción y, de este modo, poder reutilizarlos. También cita los yacimientos de yeso de Chipre, Fenicia y Siria. (Díez, 1997).

Según Gárate (1993), los egipcios utilizaron la escayola para ensamblar los inmensos bloques de la pirámide de Keops (2800 años a.C.) y cubrieron su superficie con un estuco de yeso rojo.

Restos del uso del yeso en Grecia se hallaron en el Palacio de Cnosos, en revestimientos y suelos (Garate, 1999).

En el imperio romano destacó el yacimiento de *lapis specularis*, yeso espejuelo, localizado en Segóbriga, Saelices, que se exportaba a Roma por ser de mayor calidad que el de Sicilia. Muestras del uso del yeso en esta época se encontraron, entre otros, en Alicante, en piezas de decoración, y en Pompeya, en la decoración interior de los muros (Villanueva & García, 2001).

Los romanos reconocieron la existencia de la profesión de yesaire. Se tiene noticia gracias al Edicto *Maximis pretus rerum venalius* de Diocleciano, en el año 1301, que fijaba el sueldo de un yesaire, situándolo al nivel del de otros obreros especializados (Díez, 1997).

En las regiones mesopotámicas se extendió la utilización del yeso en los trabajos de albañilería, debido a su elevada presencia en la naturaleza (Villanueva & García, 2001).



Figura 9. Ejemplo de paño de yesería en la Alhambra de Granada (Fachada de Comares). Imagen tomada de la página web oficial del Patronato de la Alhambra y el Generalife (Patronato de la Alhambra y el Generalife, 2012).

Se debe a los árabes la difusión del uso del yeso en España, donde se le dio un uso muy extenso: en revestimientos, guarnecidos, enlucidos, suelos, juntas y ornamentación (yeserías). Estas últimas son obras de elevada singularidad dentro del

arte musulmán en España (Villanueva & García, 2001). Como ejemplo puede citarse la Alhambra de Granada, construida por los nazaríes (Figura 9).

En la Edad Media destacó la utilización del yeso en la región de París. En esta época el yeso se utilizaba en Europa en revestimientos, forjados en combinación con viguetas de madera, tabiquería y chimeneas (Villanueva & García, 2001).

En el Renacimiento, sobretodo en la época del Barroco, se llega a la máxima esplendor en el empleo del yeso, utilizándose como decoraciones en multitud de monumentos, en muchos casos doradas (Díez, 1997).

Se puede hablar del yeso realmente como material de construcción a partir del siglo XV. El Rey de Francia Luis XIV decretó en 1667 la utilización del yeso como material antincendio después de haber sucedido un gran incendio en Londres en el cual los únicos edificios que se conservaron fueron los revestidos con yeso (Díez, 1997).

El yeso se va incorporando gradualmente, a partir del s. XVIII, en toda la construcción europea. Lavoisier, en 1768, presenta en la Academia de Ciencias un estudio científico sobre la calcinación del yeso, estudio continuado por Van t'Hoff y Le Chatelier (Villanueva & García, 2001).

Según la tesis de Sanz (2009), a mediados-finales del s. XVIII hasta principios del s. XIX comienzan a utilizarse, en Inglaterra, otro tipo de materiales conglomerantes en obras hidráulicas: cementos naturales y artificiales. La piedra artificial empieza a sustituir a los estucos, mientras que los cementos y cales hidráulicas sustituyen a las cales aéreas y a los yesos en revestimientos exteriores. Deja de utilizarse el yeso en pavimentos (excepto en Alemania y algunas zonas de la antigua Unión Soviética). El uso del yeso queda limitado a los acabados interiores de paredes y techos, y aparecen una segunda generación de productos, yeso en polvo, prefabricados (placas, bloques y paneles de cartón-yeso).

No obstante, según Sanz (2009), en zonas de gran abundancia yesífera, se mantienen las construcciones con yeso al exterior y pavimentos, como en Cuenca y Albarracín. En este último lugar todavía se fabrica yeso rojo en un horno moruno, según el sistema tradicional (Villanueva & García, 2001).

A finales de los años 50 se empezó a fabricar yeso y escayola de forma industrial en España. Se obtienen, de esta forma, productos con características más uniformes, conocidos como yesos industriales o de segunda generación (Villanueva & García, 2001)

Posteriormente, a finales de los años 60, se empezó a mezclar perlita como agregado ligero a yesos y escayolas. También comenzaron a utilizarse aditivos de forma generalizada, principalmente retenedores de agua, espesantes y reguladores de fraguado. Se trata de los denominados yesos de tercera generación (Villanueva & García, 2001).

2.1.3 Yacimientos de yeso en España

La mayor parte de los yacimientos de yesos en España se sitúan en la mitad oriental del país. Hasta el plegamiento Herciano, las condiciones de formación del yeso no fueron favorables. Después, mientras que la mitad occidental permaneció emergida, la oriental tuvo un ámbito adecuado. Las formaciones yesíferas aparecieron a partir de la

formación de los grandes lagos salados formados en el Mesozoico, en el Keuper¹ (Villanueva & García, 2001). Destacan las de la Cordillera Ibérica, siendo las más importantes por calidad y reservas (Regueiro & Calvo, 1997).

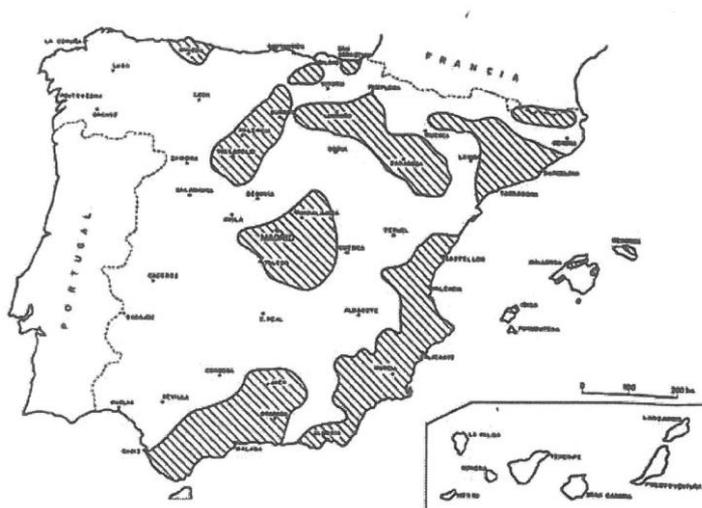


Figura 10. Principales zonas de yesos en España. Imagen tomada de Regueiro & González-Barros (1997).

Según Regueiro & González-Barros (1997), del Terciario son importantes los yacimientos de la Meseta Sur, los de Navarra y los de Aragón, todos ellos correspondientes al Oligoceno. Mientras que, del Mioceno, resaltan los yacimientos de la Meseta Norte, los de la Cuenca del Tajo, los de Barcelona y los de Alicante. Además, destacan por su volumen los de la Cuenca de Sorbas (Almería), del Mioceno Superior (Figura 10).

La cantidad de recursos yesíferos en España es de aproximadamente 60.000 millones de toneladas. Se consideran recursos ilimitados según el plan de investigación de yesos realizado por el Instituto Geológico y Minero de España desde 1968 a 1989 (Regueiro & Calvo, 1997).

2.1.4 Producción de yeso en España

2.1.4.1 Panorama nacional

Aunque la producción de yeso en España ha descendido notablemente en los últimos años (2007-2011), sigue siendo uno de los mayores productores de yeso del mundo. En Europa en 2009 se mantenía como líder en producción y exportación (Merchan & Regueiro, 2009).

Según el informe *Panorama Minero* del IGME, del año 2009, el sector español del yeso está mayoritariamente en manos de empresas multinacionales de matriz europea tales como Saint Gobain (Francia), Lafarge (Francia) y Knauf (Alemania).

El Grupo Saint Gobain opera a través de Saint Gobain PLACO Ibérica S.A, Compañía Minera Fuente del Peral S.A. y Yesos María Morales S.A. Cuenta con más de veinte canteras de yeso repartidas por todo el territorio, entre ellas, beneficia el yacimiento de

¹ Triásico Superior.

² El Pliego RY-85 está derogado por el Real Decreto 1371/2007, por el que se aprueba el documento básico *DB-HR Protección frente al ruido* del Código Técnico de la Edificación.

Sorbas (Almería) en la cantera de yeso más grande de Europa, desde donde se exportan más de 2 MTm de yeso crudo. Posee fábricas en Sevilla, Madrid, La Rioja, Zaragoza y Castellón.

El grupo Uralita, líder en España en el mercado de placas de yeso y segundo mayor de producción de yeso en polvo, dispone de unidades productivas de yeso en polvo en Martos (Jaén), Alicante, Mañeru (Navarra), Beuda (Girona) y Valdemoro (Madrid), fabricando además en Madrid placas de yeso.

La empresa alemana Knauf (uno de los líderes mundiales del sector), cuenta con cantera y fábrica en Guixers (Lleida), con una capacidad productiva de 150 Tm/h, y con nuevas instalaciones en Escúzar (Granada), en las que se prevé una capacidad productiva de 100 m²/minuto de placa de yeso.

En España, de acuerdo con el mismo informe, abundan las empresas pequeñas de tipo familiar, que producen una buena parte de las escayolas y yesos para la construcción de la industria nacional, con producciones individuales de alrededor de 50.000 Tm/año. Entre otras se puede mencionar Escayolas Fidensa S.L. y Yesos Juárez-Hernández, en Toledo; Hermanos Ruiz Dorantes S.L., con cantera en Cádiz y planta en Sevilla; y CALCINOR, S.A, en Guipúzcoa, presente en el sector mediante una participación minoritaria en la compañía Yesos Albi S.A. (Burgos).

Destaca también la empresa Explotaciones Río de Aguas, S.L, perteneciente al holding Grupo Torralba, por ser el mayor exportador de yeso en España.

El sector yesero nacional cuenta con la Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY), miembro de la federación europea Eurogypsum, que agrupa actualmente a 16 países con objeto de promover el desarrollo de la industria del yeso a escala europea.

2.1.4.2 Producción minera

Durante los últimos años la producción nacional de yeso ha seguido la tendencia del sector de la construcción de viviendas. En 1992 y 1993 se notó la crisis del sector y, de nuevo, a partir del año 2008, empieza a disminuir la producción por la crisis económica actual, la cual todavía persiste (Figura 11).

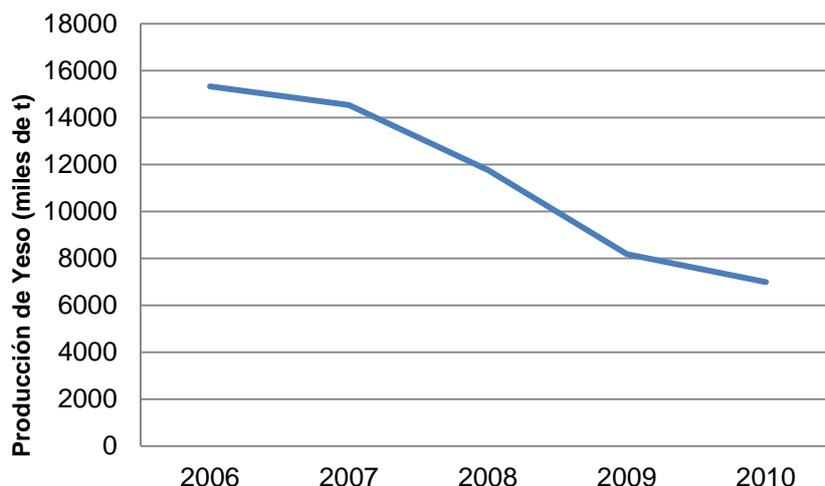


Figura 11. Producción minera de yeso de los últimos años (2006-2010). Productos de cantera. Gráfico elaborado a partir de datos de la Estadística minera anual 2010 (Ministerio de Industria, 2010).

La producción total nacional en 2009 fue de 8.181.415 toneladas, que suponen un descenso del 30,5% con respecto a 2008 (Merchan & Regueiro, 2009). En 2010 la producción tuvo un descenso del 14,6% con respecto a 2009, según datos de la Estadística minera anual de 2010 (Ministerio de Industria, 2010).

Según la Estadística Minera de España, durante el 2009, 11 comunidades extrajeron yeso en 118 explotaciones, repartidas en 27 provincias entre las que destaca Almería, con el 37% de la producción nacional.

La mayor parte de la producción del 2009 (56%) se comercializó como productos en polvo, prefabricados de escayola y placas de yeso laminado. También se destinó una parte a la obtención de cemento (17%), yesos y escayolas para la construcción, techos de escayola, tabiques prefabricados, placas de yeso, yesos especiales y otras aplicaciones. Además, se exportó un 27% de la producción (Merchan & Regueiro, 2009).

En 2009 la producción del yeso alcanzó un valor a pie de cantera de 6,30 €/Tm, lo que supone un valor de 51,58 millones de euros para la producción nacional (Merchan & Regueiro, 2009)

A nivel mundial, según el U.S. Geological Survey (2011), en el año 2009 China fue el país con mayor producción minera de yeso (con unos 45 millones de toneladas), seguido de Irán (con unos 13 millones de toneladas) y España, que ocupa la tercera posición con una producción de unos 11,5 millones de toneladas según esta fuente (Figura 13).

En el siguiente gráfico se muestra la distribución de la producción por Comunidades Autónomas (Figura 12):

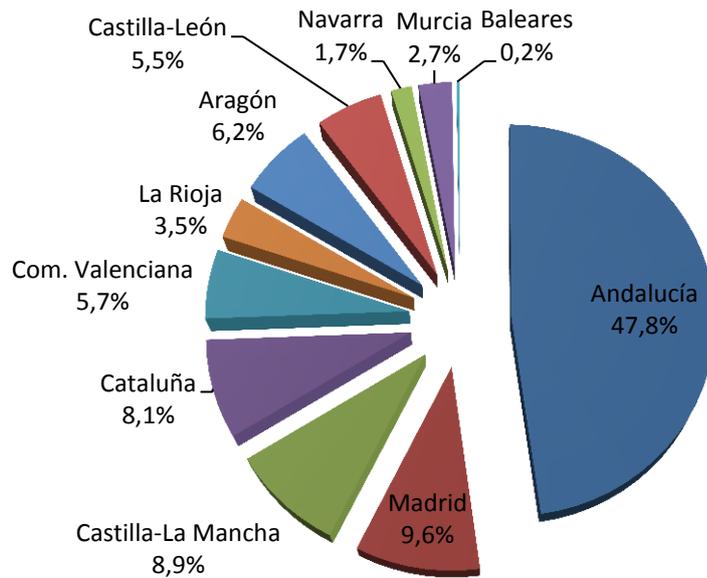


Figura 12. Distribución de la Producción nacional de yeso por Comunidades. Año 2009. Gráfico elaborado a partir de datos de Estadística minera de España 2009 (Merchán & Regueiro, 2009).

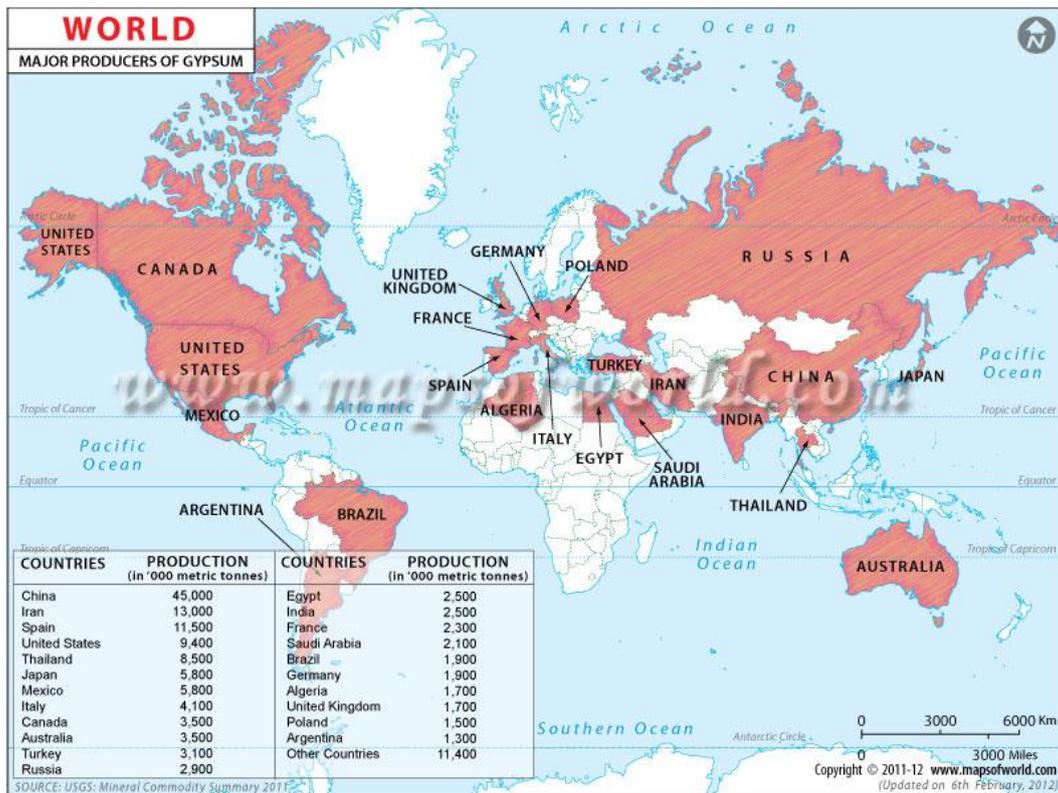


Figura 13. Producción minera de yeso en el mundo para 2011. Imagen tomada de Maps of World (2012).

2.1.5 El sistema sulfato cálcico-agua

El sistema sulfato cálcico-agua se caracteriza por 5 fases sólidas, cuatro de las cuales existen a temperatura ambiente: sulfato de calcio dihidratado, sulfato de calcio semihidrato, anhidrita tipo III y anhidrita tipo II. La quinta fase corresponde a la anhidrita tipo I y sólo existe por encima de los 1.180°C (Wirsching, 2005).

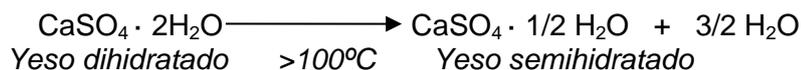
2.1.5.1 Sulfato de calcio dihidratado

Se trata del mineral de yeso, compuesto químicamente por sulfato cálcico cristalizado conjuntamente con agua, en la proporción de dos moléculas de agua por cada molécula de sulfato cálcico. Cristaliza en el sistema monociclo, tal como se ha descrito en el apartado 2.1.1.2.

2.1.5.2 Semihidrato

Se nombra indiferentemente hemihidrato y semihidrato (SH). De fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, cristaliza en el sistema romboédrico (Nolhier, 1986).

Para alcanzar la forma de semihidrato, el sulfato de calcio dihidratado debe perder una molécula y media de agua. Esto sucede en una primera etapa de deshidratación, por encima de los 100°C (Villanueva & García, 2001).



El semihidrato (SH) o hemihidrato puede presentar dos formas alotrópicas α y β con características físicas y microestructurales diferentes (Villanueva & García, 2001).

El yeso semihidrato tipo α se produce generalmente en autoclave, a presión superior a la atmosférica, de forma que el agua se elimina en forma líquida (Nolhier, 1986). Es muy compacto, resistente y de cristales grandes. Se trata de los denominados yesos alfa, los cuales necesitan muy bajo factor de agua en el amasado y producen, por tanto, unos rehidratos muy compactos, duros y resistentes (Villanueva & García, 2001). Los yesos alfa se utilizan para aplicaciones especiales como moldes para cerámica, odontología, etc.

El semihidrato β se produce generalmente en horno rotatorio y a presión atmosférica, de forma que el agua se elimina en estado vapor seco (Nolhier, 1986). Tiene las formaciones cristalinas más fragmentadas y holgadas. Se trata de una forma más inestable que la variedad alfa. En estado puro constituye la escayola, caracterizada por tener un factor agua/yeso de amasado más elevado y dar rehidratos más porosos que los yesos alfa. También puede darse la forma β en mezcla con otras fases, industrialmente conocido como yeso multifase o yeso de construcción (Villanueva & García, 2001).

En ausencia de modificadores de fraguado, el semihidrato amasado en agua, se retransforma en yeso al 95%, en unos 30 minutos aproximadamente. La hidratación es completa en menos de 2 horas (Nolhier, 1986).

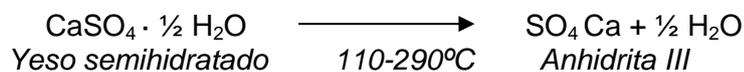
Los semihidratos son los yesos de fabricación más fácil. Las características mecánicas finales de los productos obtenidos son comparables a las que resultan de la utilización de otras fases del sistema $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$. La diferencia esencial se refiere a la duración del fraguado: cuanto más cocido o sobrecocido esté el yeso, fragua más lentamente.

En el pasado, sólo se sabía ralentizar el fraguado del yeso utilizando una cierta cantidad de yeso sobrecocido. Actualmente, la velocidad de fraguado es sobretodo dominado gracias al uso de aditivos químicos. Habiendo solucionado este problema, la industria del yeso tiende a fabricar exclusivamente los semihidratos (Nolhier, 1986).

2.1.5.3 Anhidrita III o anhidrita soluble

Si se sigue incrementando la temperatura de calcinación, entre 110 y 290°C, el yeso puede continuar perdiendo agua hasta llegar al estado de sulfato cálcico anhidro, o anhidrita III (AnIII), también conocida como anhidrita soluble. (Villanueva & García, 2001). Cristaliza en un sistema hexagonal (Nolhier, 1986).

Se considera este producto como una etapa intermedia dentro la transformación del semihidrato a anhidrita II. Difícilmente se puede observar esta fase sola. De una parte, en las temperaturas industriales necesarias para la formación de anhidrita III (del orden de 180°C) producen una reducida cantidad de anhidrita II y, por otra parte, la anhidrita III se transforma muy rápidamente en semihidrato en contacto con la humedad del aire (Nolhier, 1986).

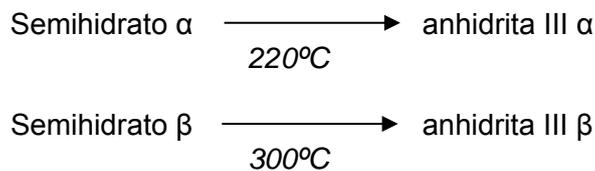


Según Nolhier (1986), la fórmula de la anhidrita III es $\text{CaSO}_4 \varepsilon \text{H}_2\text{O}$, con ε comprendido entre 0,06 y 0,11, lo cual significaría que la anhidrita III tiene una cantidad reducida y variable de agua.

El proceso de retransformación de la anhidrita III en semihidrato se llama reversión. Es fundamental controlar este proceso de reversión ya que la anhidrita III es un potente acelerador del fraguado del yeso, lo cual no es sistemáticamente deseado (Nolhier, 1986).

Amasada con agua, la anhidrita III fragua en pocos minutos. Es el yeso más “reactivo” (Nolhier, 1986). Debido a esta característica, la AnIII se aplica en la industria como producto desecador.

Existen dos variedades α y β de anhidrita III, según si provienen del SH α o β .



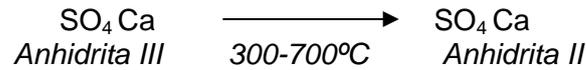
La anhidrita III β se encuentra en las escayolas junto al semihidrato β y en los yesos de construcción junto con el semihidrato β y la anhidrita II (Villanueva & García, 2001).

2.1.5.4 Anhidrita II o anhidrita insoluble

Es la forma natural de la anhidrita y también puede producirse por calcinación de dihidrato, semihidrato y anhidrita III a elevada temperatura (Wirsching, 2005).

La anhidrita II cristaliza en un sistema romboédrico (Nolhier, 1986).

Entre los 300°C y los 700°C se produce industrialmente el sulfato cálcico anhidro II o anhidrita II (AnII) (Nolhier, 1986).



La anhidrita II presenta mayor estabilidad que la AnIII. Es relativamente inerte e insoluble. Se considera que la anhidrita II es activa, cuando se hidrata completamente después de una estancia de 7 días en agua líquida. A partir de 700°C se habla de yeso cocido a muerte, el producto se hidrata muy lentamente (a veces en varios meses) (Nolhier, 1986).

La anhidrita II activa es utilizada dentro la fabricación de enlucidos a base de semihidratos. La anhidrita II activa se comporta como una carga inerte en el momento del amasado dando cuerpo a la pasta durante el trabajo y completa la solidez del enlucido una vez colocado, a través de una cristalización complementaria, la cual está desfasada respecto el fraguado del semihidrato (Nolhier, 1986).

Se pueden obtener 3 tipos de AnII calcinada, según la temperatura y el tiempo de cocción (Wirshing, 2005):

- AnII-s (ligeramente soluble), producida entre 300 y 500 °C, de rápida rehidratación.
- AnII-u (insoluble), producida entre 500 y 700°C, de lenta rehidratación.
- AnII-E (disociada parcialmente), producida por encima de 700°C, de tiempo de rehidratación intermedio. Variedad conocida como yeso de pavimentos.

2.1.5.5 Anhidrita I

Por último, cuando se sobrepasan los 1.200°C se obtiene la anhidrita tipo I. Esta fase no es estable a temperatura ambiente, transformándose en anhidrita II por debajo de 1.200°C (Nolhier, 1986).



La anhidrita I producida a altas temperaturas (por encima de los 1.400 °C) contiene óxido de cal, generado por la descomposición del sulfato cálcico. Esta anhidra es soluble y puede incluso fraguar en el agua cuando el mineral tiene impurezas arcillosas o mediante mezclas artificiales (tiene propiedades hidráulicas) (Villanueva & García, 2001).

2.1.6 Propiedades de los yesos en polvo

Los productos en polvo se caracterizan por su composición química, composición mineralógica (contenido en las diferentes fases del sistema sulfato cálcico-agua), finura de molido y aditivos y adiciones que puedan agregárseles (Villanueva & García, 2001) (Tabla 2).

Característica	Dihidrato	Semihidrato	Anhidrita III	Anhidrita II	Anhidrita I
Fórmula	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaSO ₄ ·1/2H ₂ O	CaSO ₄	CaSO ₄	CaSO ₄
Masa molecular	172,17	145,15	136,14	136,14	136,14
Estabilidad termodinámica	<40°C	metaestable	metaestable	40-1180°C	>1180°C
Formas o estados		Dos formas: α β	Tres estados: β-anhidrita III β-anhidrita III' α-anhidrita III	Tres estados: AnII-s AnII-u AnII-E	
Otros nombres	Aljez Piedra de yeso Crudo/ doblehidrato	Basanita Hemihidrato	Anhidrita soluble	Anhidrita insoluble Anhidrita natural Sobrecocido	Anhidrita de alta temperatura
Condiciones de síntesis	<40°C	Forma α: >45°C solución acuosa Forma β: 45-200°C Aire seco	Formas α- y β-AnIII: 50°C vacío o 100°C en aire β-AnIII': 100°C en aire seco	200-1180°C	>1180°C
Temperatura de producción	<40°C	Forma α: 80-180°C Forma β: 120-180°C	Formas β-AnIII y β-AnIII': 290°C Forma α-AnIII: 110°C	300-900°C AnII-s: <500°C AnII-u: 500-700°C AnII-E: >700°C	No producción industrial

Tabla 2. Características de las fases del sistema sulfato cálcico-agua (Wirsching, 2005) y (Villanueva & García, 2001).

2.1.6.1 Características químicas

Los diferentes tipos de yeso anteriormente indicados se distinguen en su composición química (Tabla 3).

CARACTERÍSTICAS	TIPOS DE CLASES								
	YG	YG/L	YF	YF/L	YP	E-30	E-30/L	E-35	E-35/L
Agua combinada en % máximo	6		6		6		7		7
Índice de pureza, en % mínimo	75		80		85		90		92
Sulfato de calcio semihidrato en % mínimo	-		-		-		85		87
pH mínimo	6		6		6		6		6

Tabla 3. Características químicas para los distintos yesos de construcción según el *Pliego general de condiciones para la recepción de yesos y escayolas en las obras de construcción* (RY-85)

El contenido en agua combinada puede determinarse mediante análisis químico, según norma UNE 102032 *Yesos y escayolas de construcción. Métodos de análisis químico*, calculada por diferencia de pesadas antes y después de calentamiento a $250 \pm 10^\circ\text{C}$, hasta masa constante.

El índice de pureza se define según la norma UNE 102032 como el contenido teórico total de sulfato cálcico-agua del producto considerado, expresado en tanto por ciento en masa de la muestra desecada a 45°C .

Según el *Pliego general de condiciones para la recepción de yesos y escayolas en las obras de construcción (RY-85)*², el índice de pureza se calcula según la expresión:

$$IP = 1,7a + b$$

donde:

IP = índice de pureza en tanto por ciento.

1,7 = relación entre los pesos moleculares del sulfato de calcio (SO_4Ca) y trióxido de azufre (SO_3).

a = contenido en SO_3 (%)

b = contenido en agua combinada en (%)

Según la norma UNE 102032 la determinación del pH se realizará a través de la medida de la diferencia de potencial de una pila eléctrica constituida por una lámina de platino introducida en la disolución de yeso y un electrodo patrón.

El análisis mineralógico determina el contenido en las diferentes fases del sistema sulfato cálcico-agua. El método de análisis se define en la norma UNE 102037 *Yesos y escayolas de construcción. Método de análisis de fases*.

2.1.6.2 Finura de molido

La finura de molido depende del molino utilizado en la fabricación del yeso (Tabla 4). Se determina, según la norma UNE-EN 13279-2 *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo*, pasando una muestra previamente desecada por un tamiz: 5000 μm (C2), 200 y 100 μm (C1), 1500 μm (C1, C6).

CARACTERÍSTICAS	TIPOS DE CLASES								
	YG	YG/L	YF	YF/L	YP	E-30	E-30/L	E-35	E-35/L
Retención en el tamiz 0,8 UNE 7 050 en % máximo	-	-	-	-	-	0		0	
Retención en el tamiz 0,2 UNE 7 050 en % máximo	50		15		30	5		1	

Tabla 4. Finura de molido para los distintos yesos de construcción según el *Pliego general de condiciones para la recepción de yesos y escayolas en las obras de construcción (RY-85)*

² El Pliego RY-85 está derogado por el Real Decreto 1371/2007, por el que se aprueba el documento básico *DB-HR Protección frente al ruido* del Código Técnico de la Edificación.

2.1.6.3 Aditivos

La adición de aditivos a los productos en polvo modifica algunas características de los yesos: tiempos de fraguado, consistencia de la pasta, retención de agua, etc.

Los aditivos se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo a su forma de actuar según Gomà (Gomà, 1979):

- Grupo a) Sustancias que modifican la solubilidad de alguna o algunas de las fases que intervienen en la hidrólisis: el semihidrato o el dihidrato. La rapidez del tiempo de fraguado en los yesos viene dada por la mayor solubilidad del SH con respecto a la del DH, por tanto, aplicando productos que consigan igualar estas solubilidades se obtendrá una acción retardante. Esto se consigue mediante sustancias con grupos carboxilos o hidroxilos, como glicerina, glicoles, alcoholes y ácidos acéticos o bóricos.
- Grupo b) Sustancias que forman grupos insolubles con el ion Ca^{2+} , con la consiguiente reducción de este en la solución. Además, la precipitación “envuelve” a los gérmenes cristalinos retrasando su engrosamiento y dificultando la disolución del DH con objeto de mantener la saturación. Pertenecen a este grupo los boratos, fosfatos, carbonatos, silicatos, etc.
- Grupo c) Compuestos orgánicos con elevado peso molecular y algunos coloides. Actúan sobre los gérmenes de cristalización y sobre la velocidad de crecimiento de los cristales tanto por su precipitación sobre ellos como por el incremento de la viscosidad del medio, que frena las reacciones iónicas aún posibles por difusión. Estos compuestos, además de modificar el tiempo de fraguado, modifican la plasticidad, la reología, el tiempo de empleo, la contracción diferencial, la elasticidad, etc. Pertenecen a este grupo las caseínas, la goma arábiga, las proteínas hidrolizadas, los taninos, las queratinas, las metilcelulosas, etc.

La acción combinada de alguna de estas sustancias da lugar a una mejora de las propiedades del yeso. Aplicando un retardador y un acelerador o espesante puede aumentar el tiempo de utilización de la pasta de 5 a 20 minutos (Gomà, 1979).

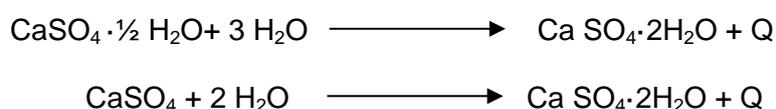
Los espesantes aumentan la consistencia de la pasta y permiten adelantar el comienzo del empleo del yeso. Un ejemplo es el almidón (Villanueva & García, 2001).

2.1.7 Características de las pastas de yeso o escayola

2.1.7.1 Fraguado de yesos y escayolas

Durante el proceso de fraguado, las fases anhidras o semihidratadas del polvo de yeso se transforman de nuevo en dihidrato en contacto con agua. Esto provoca el endurecimiento de la pasta.

Las reacciones que tienen lugar en la rehidratación son (Wirsching, 2005):



Estas reacciones tienen lugar con desprendimiento de calor. En condiciones de laboratorio suele haber un incremento de 20°C en la hidratación de un semihidrato β (Villanueva & García, 2001).

Además, se produce un ligero aumento de volumen debido al rápido crecimiento de los cristales. En general, la expansión es mayor cuanto más lenta es la velocidad de hidratación. Esto define la porosidad del material, factor que influye sobre las propiedades mecánicas del yeso, afectando a su dureza superficial (Villanueva & García, 2001).

El proceso de rehidratación ha sido ampliamente estudiado, siendo la *Teoría del crecimiento cristalino* de Le Châtelier en 1908 y la *Teoría Coloidal*, propuesta por Michaelis en 1870, las más importantes y reconocidas (Arzabe, 1997).

Según la teoría de Le Châtelier el sulfato de calcio semihidrato en contacto con agua primero forma una solución saturada de la fase anhidra y sobresaturada respecto al dihidrato, que precipita cristalizando (Wirsching, 2005).

Según la teoría coloidal, la hidratación se produce mediante un proceso coloidal que implica la formación de un gel a partir del cual se forman los cristales de yeso. Sin embargo, no se ha demostrado todavía experimentalmente la existencia de este gel (Wirsching, 2005).

Según Nohier (1986) el fraguado pasa por cuatro fases:

- a) La primera fase dura solamente algunos minutos y empieza en el momento de la introducción del polvo de yeso dentro del agua. El semihidrato al principio es mojado por el agua y absorbe una parte de esta, luego se disuelve hasta la saturación. Una cantidad reducida de agua está unida a la superficie de los granos sólidos, y se forma muy rápidamente los “falsos hidratos” inestables alrededor de los granos de yeso.
- b) Hay una disposición cristalina de los “falsos hidratos” que se transforman en diversos hidratos. Estos constituyen las semillas de la reacción que se desarrollará posteriormente. Es posible acelerar esta segunda fase multiplicando el número de semillas, o bien, dispersándolas dentro de la solución:
 - La multiplicación se realiza industrialmente dentro de las instalaciones de prefabricación añadiendo yeso fino (a menudo yeso ya fraguado). Los granos de yeso molidos finamente constituyen la cantidad de semillas.
 - La dispersión y la activación de los “falsos hidratos” se realiza mediante una mezcla violenta o la acción de ultrasonidos. Los choques mecánicos separan los “falsos hidratos” del semihidrato, lo cual multiplica las superficies libres y acelera la reacción.
- c) La solución sobresaturada en semihidratos precipita. Hay cristalización a yeso. Esta reacción es autocatalítica y exotérmica (libera calor). El principio del endurecimiento corresponde a esta tercera fase.
- d) La cristalización se ralentiza a causa de la desaparición del semihidrato, y luego se para. Esta fase tiene una influencia esencial sobre las características finales del producto: retracción y características mecánicas. Es la fase más difícil de controlar, debido a que es difícil de influir sobre el revestimiento de los cristales y su crecimiento.

Desde el punto de vista físico se denomina principio de fraguado al momento en que la pasta pasa del estado líquido al estado plástico y final de fraguado al momento en que pasa del estado plástico al sólido (Villanueva & García, 2001).

Para conseguir una consistencia específica, a partir de los yesos calcinados, se añaden plastificantes o reductores de agua (alquilarilsulfonatos, lignosulfonatos o resinas de melamina), que reducen la demanda de agua, o bien agentes floculantes (como por ejemplo óxido de polietileno) que aumentan la demanda de agua (Wirsching, 2005).

El tiempo de utilización de un yeso es el intervalo de tiempo durante el cual el material mezclado puede ser utilizado correctamente. Los diferentes procedimientos de puesta en obra reclaman entonces diferentes tiempos de empleo (Nolhier, 1986).

El tiempo de fraguado del yeso es el intervalo de tiempo que separa el principio de la mezcla del fin del fraguado (Nolhier, 1986).

La velocidad de fraguado del yeso depende de diversos factores, como la temperatura del agua, la cantidad de agua de amasado, el tamaño de la partícula y el tiempo transcurrido desde la cocción. Para acelerar o retardar la velocidad de fraguado se utilizan numerosos aditivos.

El ácido sulfúrico y sus sales, y el sulfato de calcio dihidrato son ejemplos de acelerantes. Estas sustancias consiguen el efecto acelerante incrementando la solubilidad y la velocidad de disolución del yeso calcinado, o aumentando la velocidad de nucleación (Wirsching, 2005).

Dentro de los retardantes se incluyen ácidos orgánicos y sus sales, coloides, sales de ácido fosfórico o ácido bórico (Wirsching, 2005). El efecto retardante se consigue mediante mecanismos diversos, comentados en el apartado 2.1.6.3.

Los aditivos acelerantes o retardantes a menudo siguen una acción selectiva sobre una u otra fase de hidratación. Es interesante a veces mezclarlos con el fin de obtener productos en los que el tiempo de inicio y fin del fraguado correspondan exactamente con las necesidades de puesta en obra (Nolhier, 1986).

Según la norma UNE-EN 13279-2 se plantean dos métodos para la determinación del tiempo de fraguado (Tabla 5):

- *Método del cuchillo*. El principio de fraguado se alcanza, a partir del comienzo del amasado de una pasta de yeso, cuando los bordes de una marca producida por la hoja del cuchillo ya no se juntan, una vez separado éste.
- *Método del cono de Vicat*. Se basa en la penetración de la aguja o del cono de Vicat en el seno de una pasta de Yeso.

CARACTERÍSTICAS	TIPOS DE CLASES								
	TRABAJABILIDAD	YG	YG/L	YF	YF/L	YP	E-30	E-30/L	E-35
Tiempo en pasar del estado líquido al plástico, máximo en minutos	8	20	8	20	8	8	20	8	20
Duración del estado plástico, mínima en minutos	10	30	10	30	10	10	30	10	30

Tabla 5. Tiempos de fraguado para los distintos yesos de construcción a partir de *Pliego general de condiciones para la recepción de yesos y escayolas en las obras de construcción (RY-85)* (nota ²)

El fin del fraguado se logra cuando una ligera presión del dedo pulgar o índice, de 5 kg a 6 kg, no deja marcas en la superficie del yeso (Nolhier, 1986).

2.1.7.2 Agua de amasado

La cantidad de agua de amasado viene condicionada por el tipo de producto y su granulometría (Villanueva & García, 2001).

La cantidad de agua teórica para hidratar el semihidrato es del 18,62% del contenido en yeso (agua estequiometría) pero en la práctica es imposible amasar el yeso con una cantidad de agua tan pequeña, ya que no se consigue una buena mezcla y se produce un fraguado instantáneo. Por tanto, siempre se trabaja con exceso de agua sobre la cantidad teórica (Nolhier, 1986).

Así pues, al aumentar la cantidad de agua de amasado (relación A/Y), se retrasa el fraguado del material (Tabla 6), aumenta la porosidad del material endurecido, disminuye la densidad (Tabla 7) y disminuye la dureza superficial (Figura 14) (Hugon & Serre, 1982). Por tanto, la hidratación deberá realizarse con la cantidad de agua más ajustada posible.

RAZÓN AGUA-YESO (cm ³ /g)	DURACIÓN DE AMASADO (minutos)	TIEMPO DE FRAGUADO EN LA AGUJA DE VICAT (minutos)
45 : 100	1	3
60 : 100	1	7
80 : 100	1	10 ½
80 : 100	2	7 ½
80 : 100	3	5 ½

Tabla 6. Influencia del agua de amasado y la duración de amasado en el tiempo de fraguado (Hugon & Serre, 1982)

AGUA DE AMASADO A/Y	DENSIDAD
0,60	1,15
0,70	1,08
0,80	1
0,90	0,95
1,00	0,88
1,20	0,75

Tabla 7. Influencia del agua de amasado en la densidad (Hugon & Serre, 1982)

La cantidad de agua de amasado puede determinarse mediante tres sistemas según la norma UNE-EN 13279-2:

- *Método de amasado a saturación.* Consiste en espolvorear yeso hasta llevar a saturación una cantidad determinada de agua.
- *Método de la fluidez de la pasta.* Se determina mediante la medida del diámetro de escurrimiento de una pasta de yeso procedente de un cono de Vicat.
- *Método de la mesa de sacudidas.* Se lleva a cabo midiendo el diámetro de una pasta de yeso tras haber sido sometido a una serie de sacudidas en condiciones predeterminadas.

El amasado en obra por medios manuales se suele hacer a saturación o forzando un poco la cantidad de agua (Villanueva & García, 2001).

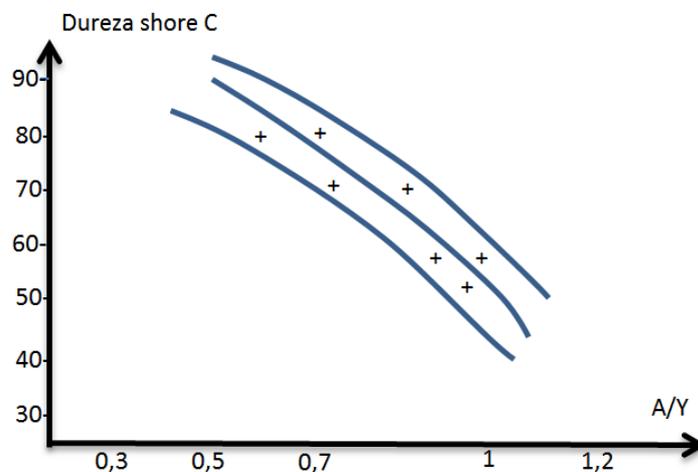


Figura 14. Influencia del agua de amasado en la dureza. Imagen tomada de (Hugon & Serre, 1982).

2.1.8 Características de los productos endurecidos de yeso o escayola

2.1.8.1 Porosidad y contenido en humedad del producto endurecido

El agua necesaria para la rehidratación es muy inferior a la necesaria para el amasado. Por este motivo se produce un exceso de agua que se evapora lentamente durante el fraguado y el secado, dejando una microestructura porosa en el rehidrato. Cuanto mayor es la cantidad de agua de amasado, mayor es la porosidad y menor es la densidad y la resistencia del producto fraguado (Figura 15) (Villanueva & García, 2001).

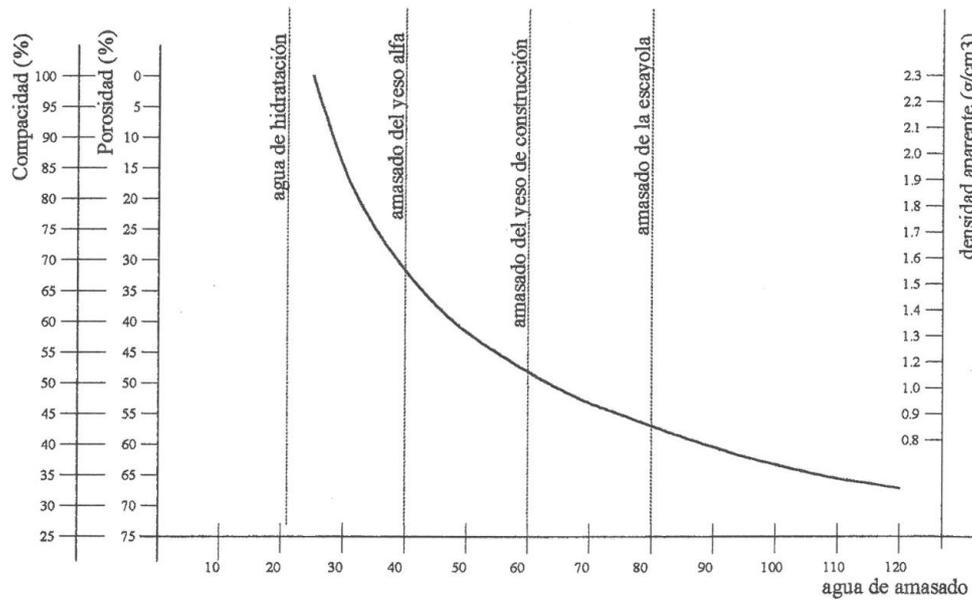


Figura 15. Relación entre la densidad, el agua de amasado y la porosidad. Tomada de (Villanueva & García, 2001).

Según Villanueva & García la porosidad aumenta el aislamiento térmico del yeso fraguado, ya que los poros de aire constituyen un impedimento a la transmisión de calor. Esta propiedad favorece el acondicionamiento térmico en su uso como material constructivo y contribuye en la resistencia al fuego.

El contenido en humedad corresponde a la cantidad de vapor de agua almacenada en la red capilar de poros, expresada generalmente en % en peso sobre el peso seco. También se denomina agua libre (Villanueva & García, 2001).

2.1.8.2 Características mecánicas

Las resistencias mecánicas de los yesos dependen de varios factores: de su naturaleza, de su finura, de su composición, de la cantidad de agua de amasado y del contenido en humedad en el momento de la rotura (Tabla 8).

A medida que avanza el proceso de fraguado aumenta la resistencia mecánica, hasta un máximo que en condiciones de laboratorio se suele producir sobre los 15 días, cuando puede considerarse que se ha llegado a la humedad de equilibrio (Villanueva & García, 2001).

El contenido en humedad incide de forma decisiva en la resistencia del yeso, ya que el vapor de agua libre situado en los poros actúa como lubricante, posibilitando el movimiento de los cristales bajo una carga determinada, disminuyendo su resistencia (Villanueva & García, 2001).

Otro factor que afecta la resistencia del yeso es la porosidad del producto y por tanto su densidad, que depende de la cantidad de agua de amasado utilizada (Figura 16) (Villanueva & García, 2001).

Tipos de productos	Resistencia			
	A/Y de amasado	Flexotracción N/mm ²	Compresión N/mm ²	Dureza N/mm ²
Yeso grueso	0,8	2*		
Yeso fino	0,8	2,5*		
Yeso prefabricado	0,8	3*		
Escayola E30	0,8	3*		
Escayola E35	0,8	3,5*		
Escayola E35	0,73	4,8	11,2	19,1
Yeso de construcción	0,6	5,1	15,5	25,9
Yeso α	0,38 ⁽¹⁾	12,3	40,4	92,0

* Valores mínimos según UNE 102031

⁽¹⁾ Valores tomados de (Wirsching, 2005)

Tabla 8. Valores mecánicos mínimos para diversos productos de yeso. Según UNE 102031 (Villanueva & García, 2001).

La evolución de la dureza y las resistencias, toma diferentes comportamientos según la naturaleza del yeso utilizado, con el índice de mezcla agua/yeso. Son muy diferentes, por ejemplo, para un semihidrato α que para un semihidrato β . La cocción en seco expulsa rápidamente el agua de cristalización del yeso y los granos de semihidrato β obtenidos presentan una superficie muy irregular, que reclama una cantidad importante de agua de amasado. El semihidrato α , por el contrario, cocido en vía húmeda, pierde su agua más lentamente. La superficie de sus granos tienden a semejar a las de un cristal perfecto, y absorbe menos agua (Nolhier, 1986).

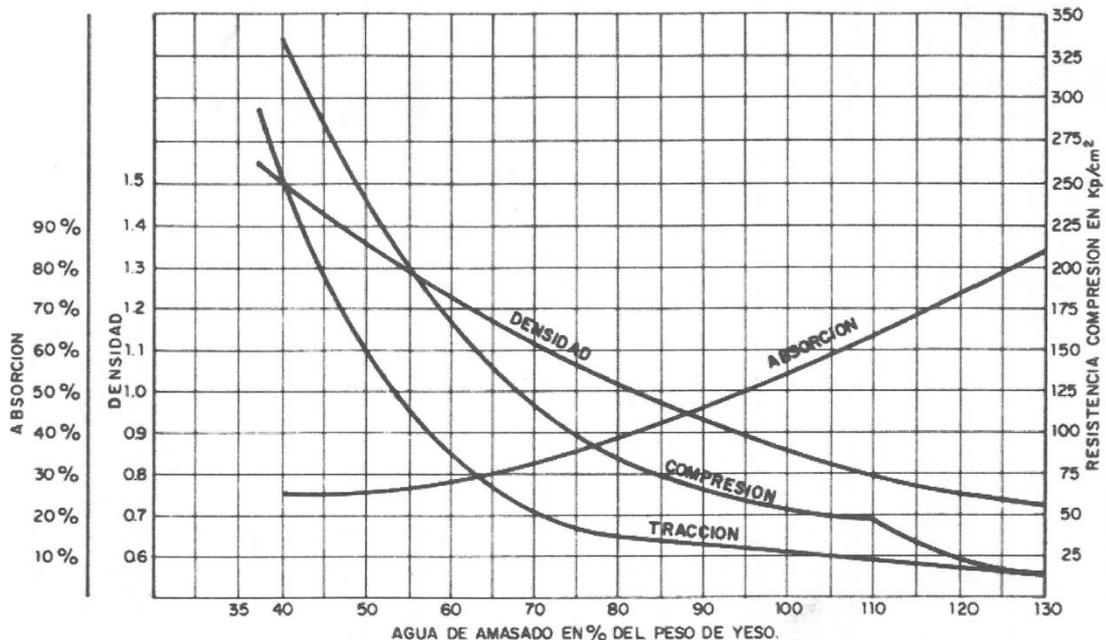


Figura 16. Relación entre la densidad, el agua de amasado y la porosidad. Tomada de (Arredondo, 1980).

Esta desigualdad de la superficie específica de los granos de las dos variedades de semihidratos tiene por consecuencia una demanda diferente de agua de mezcla. Un semihidrato β , mezclado con un índice agua/yeso del 65% presentará, por ejemplo, una consistencia de pasta equivalente a la de un semihidrato α , de la misma finura,

mezclado al 40%. Esto explica la superioridad mecánica de los semihidratos α (Nolhier, 1986).

Las características mecánicas de los yesos endurecidos cambian, igualmente, para una misma variedad, con su textura cristalina. La forma de esta textura se deriva naturalmente de factores internos, propias de las condiciones de hidratación, y también de factores externos, como efectos mecánicos, adición de aditivos y condiciones de conservación una vez fraguado (Nolhier, 1986).

2.1.8.3 Dureza superficial

En la dureza superficial incide el tratamiento de la superficie de terminación de los productos, así como la forma de la terminación o acabado superficial de los revestimientos (Villanueva & García, 2001) (Tabla 9).

TIPO DE REVESTIMIENTO	DUREZA SUPERFICIAL MÍNIMA (SHORE C)
Tradicional	45
Proyectado	65
Alta dureza	80

Tabla 9. Valores de dureza superficial para revestimientos de yeso (Villanueva & García, 2001)

La dureza de un yeso, es una función decreciente al índice de mezcla agua/yeso (Nolhier, 1986).

Algunos yesos endurecidos, conservados en agua líquida, reducen sensible y definitivamente sus características mecánicas, en el curso de la inmersión, los pequeños cristales de yeso se disuelven y recristalizan bajo formas de cristales de tamaño más importante, lo que conduce a una reducción de las características mecánicas. Este fenómeno no se puede detectar siempre. En unas siete semanas de conservación bajo agua, se han constatado bajas que varían entre 0% y 40%. La evolución de este fenómeno depende del primer modo de cristalización (Nolhier, 1986).

2.1.9 Características técnicas de yesos y escayolas

2.1.9.1 Resistencia al fuego

El yeso es un material incombustible y con bajo coeficiente de conductividad térmica, lo que evita la propagación del calor producido en el incendio (Villanueva & García, 2001).

Además de estas dos propiedades (ser incombustible y poseer una baja conductividad térmica), el yeso posee otras características que le confieren excelentes propiedades de protección frente el fuego, según Hugon & Serre (1982):

- Una vez fraguado, el yeso posee dos moléculas de agua por molécula de materia, siendo alrededor del 20% de agua químicamente unida (Nolhier, 1986). Para que se desprenda esta agua (esto ocurre en caso de incendio) se requiere una aportación de unas 170 kilocalorías por kg de yeso. Después, para la evaporación del agua combinada, se requieren unas 130 kilocalorías para los 200 gramos de agua contenida por kg de yeso. Mientras el agua no está evaporada, la temperatura de la masa del yeso queda por debajo de los

140°C. Bajo el efecto de una fuente calor, el yeso absorbe en total cerca de 300 kcal por kg de material. Este comportamiento al fuego es uno de los mejores entre los de los materiales de construcción (Nolhier, 1986).

- Después de su deshidratación el yeso sigue formando una capa que asegura al elemento constructivo que reviste, un notable aislamiento térmico, debido a su bajo coeficiente de conductividad.
- Por último, bajo la acción del fuego no produce ningún gas o vapor tóxico, corrosivo o asfixiante, ni humos ni otro producto de combustión susceptible de activarla.

Así pues, si la temperatura a la que está sometido un elemento de yeso fraguado se eleva suficientemente y se mantiene alta durante un determinado período, el agua de cristalización del yeso se elimina absorbiendo calor. Esta deshidratación del yeso comienza en la superficie expuesta y continúa gradualmente hacia el interior. En este proceso el yeso absorbe gran cantidad de calor, produciendo vapor de agua y, por tanto, enfriando localmente el fuego (Villanueva & García, 2001).

A continuación se analizarán las normas aplicables. En el apartado V de la introducción del CTE DB-SI sobre las condiciones de comportamiento ante el fuego de los productos de construcción y de los elementos constructivos se establecen las condiciones de reacción al fuego y de resistencia al fuego de los elementos constructivos conforme a las nuevas clasificaciones europeas establecidas mediante el Real Decreto 312/2005, de 18 de marzo y a las normas de ensayo y clasificación que allí se indican.

El Real Decreto 312/2005 clasifica los productos de la construcción y los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia al fuego, que se concreta en la norma UNE EN 13501-1: 2002 *Clasificación de la reacción al fuego de los materiales de construcción* (Tabla 10).

Clasificación	Definición	Clasificaciones adicionales de carácter obligatorio en la mayoría de clases	
		Opacidad de los humos "s" (smoke)	Caída de gotas o partículas inflamadas "d" (drop)
A1	No combustible. Sin contribución en grado máximo al fuego	S ₁ : baja S ₂ : media S ₃ : alta	d ₀ : nula d ₁ : media d ₂ : alta
A2	No combustible. Sin contribución en grado menor al fuego		
B	Combustible. Contribución muy limitada al fuego		
C	Combustible. Contribución limitada al fuego		
D	Combustible. Contribución media al fuego		
E	Combustible. Contribución alta al fuego		
F	Sin clasificar. Sin determinación de propiedades		

Tabla 10. Clasificación de los materiales de construcción según su reacción al fuego según RD 312/2005 y UNE 13501-1:2002

Esta clasificación se determina de la siguiente manera:

- A₁ tf = 0 (sin llama sostenida)
- A₂ tf ≤ 20 seg.
- B F_S ≤ 150 mm. en 60 seg. THR₆₀₀ ≤ 7,5 MJ
- C F_S ≤ 150 mm. en 60 seg. THR₆₀₀ ≤ 15 MJ
- D F_S ≤ 150 mm. en 60 seg. FIGRA ≤ 750 w.s⁻¹
- E F_S ≤ 150 mm. en 20 seg.
- F sin determinación de propiedades

Donde:

- tf: duración de la llama.
- F_S: propagación de las llamas
- THR₆₀₀: emisión total de calor
- FIGRA: velocidad de propagación del fuego

Además, los materiales deben clasificarse por la opacidad de los humos "s" (smoke) que incorpora conceptos de velocidad de propagación y producción total de humos. Esta clasificación se determina de la siguiente manera:

- S₁: SMOGRA ≤ 30 m².s⁻² y TSP₆₀₀₅ ≤ 50 m²
- S₂: SMOGRA ≤ 180 m².s⁻² y TSP₆₀₀₅ ≤ 200 m²
- S₃: S_i ≠ S₁ ni ≠ S₂

Donde:

- SMOGRA: velocidad de propagación del humo
- TSP₆₀₀₅: producción total de humo

En cuanto al comportamiento del yeso ante el fuego, el yeso y las pastas de yeso son considerados como material de la clase A1 según el cuadro 1.2-1 del Anexo I del Real Decreto 312/2005. Los materiales de la clase A1 no requieren clasificaciones adicionales.

Los revestimientos de yeso son adecuados para fabricar elementos constructivos retardadores del fuego (REI30 o EI30, REI60 o EI60), resistentes al fuego (REI90 o EI90, REI120 o EI120) y altamente resistentes al fuego (REI180 o EI180) (Villanueva & García, 2001).

Tipo de revestimiento	Espesor e de la fábrica en mm							
	Con ladrillo hueco			Con ladrillo macizo o perforado		Con bloques de arcilla aligerada		
	40≤e<80	80≤e<110	e≥110	110≤e<200	e≥200	140≤e<240	e≥240	
Sin revestir	(1)	(1)	(1)	REI-120	REI-240	(1)	(1)	
Enfoscado	Por la cara expuesta	(1)	EI-60	EI-90	EI-180	REI-240	EI-180	EI-240
	Por las dos caras	EI-30	EI-90	EI-120	REI-180	REI-240	REI-180	REI-240
	Por la cara expuesta	EI-60	EI-120	EI-180	EI-240	REI-240	EI-240	EI-240
Guarnecido	Por las dos caras	EI-90	EI-180	EI-240	EI-240	REI-240	EI-240	REI-240
							RE-240	REI-240

(1) No es usual

Tabla 11. Resistencia al fuego de muros y tabiques de fábrica de ladrillo cerámico o sílico-calcáreo según Tabla F.1. del Anejo F del documento DB-SI del CTE.

En el Anejo F del documento DB-SI del CTE (febrero 2010) (RD 314/2006) se establecen los tiempos de resistencia al fuego que, sin necesidad de ensayo, pueden

otorgarse a algunos elementos constructivos (Tabla 11 y Tabla 12). Estas tablas son aplicables solamente a muros y tabiques de una hoja, sin revestir y enfoscados con mortero de cemento o guarnecidos con yeso, con espesores de 1,5 cm como mínimo. En el caso de soluciones constructivas formadas por dos o más hojas puede adoptarse como valor de resistencia al fuego del conjunto la suma de los valores correspondientes a cada hoja.

Tipo de cámara	Tipo de árido	Tipo de revestimiento	Espesor nominal en mm	Resistencia al fuego
Simple	Silíceo	Sin revestir	100	EI-15
			150	REI-60
			200	REI-120
	Calizo	Sin revestir	100	EI-60
			150	REI-90
			200	REI-180
	Volcánico	Sin revestir	120	EI-120
			200	REI-180
			Guarnecido por las dos caras	90
Guarnecido por la cara expuesta (enfoscado por la cara exterior)			120	EI-180
200			REI-240	
Doble	Arcilla expandida	Sin revestir	150	EI-180
		Guarnecido por las dos caras	150	RE-240 / REI-80

Tabla 12. Resistencia al fuego de muros y tabiques de fábrica de bloques de hormigón según Tabla F.2. del Anejo F del documento DB-SI del CTE.

En estas tablas se observa la influencia de los guarnecidos de yeso en el aumento del tiempo de resistencia al fuego.

2.1.9.2 Aislamiento térmico

El yeso es uno de los materiales de construcción con mejores propiedades de aislamiento térmico (Hugon & Serre, 1982)

La transmisión de calor de un cuerpo más caliente a otro más frío puede realizarse mediante tres mecanismos: por conducción, por convección o por radiación.

La conductividad térmica del yeso depende de la densidad y humedad de los revestimientos (Villanueva & García, 2001). El coeficiente de conductividad térmica (λ) aumenta con la densidad del yeso y con el contenido en agua (Nolhier, 1986).

En productos ligeros de yeso celular se alcanzan tan bajos coeficientes de conductividad que suponen un extraordinario poder de aislamiento térmico, mientras que en yesos más densos se obtienen valores que lo sitúan en buena posición con respecto a otros materiales (Villanueva & García, 2001).

También es modificado, en mayor o menor medida, por la naturaleza más o menos aislante del aditivo que se le ha introducido (Nolhier, 1986). En régimen permanente, el flujo de calor que se transmite por conducción dentro un material es proporcional al coeficiente de conductividad térmica (λ), y a la diferencia de temperatura entre las dos caras del material, y es inversamente proporcional al grosor cruzado (Nolhier, 1986).

En elementos constructivos expuestos al viento, la transmisión de calor (coeficiente de transmisión de calor por convección) depende directamente de la fricción del elemento (coeficiente de fricción) y de la velocidad del viento. Por tanto, cuanto más lisa sea la superficie, menor será la fricción y mayor será el aislamiento térmico. El yeso alisado tiene un coeficiente de fricción pequeño, superado solamente por el vidrio (Villanueva & García, 2001).

El coeficiente de transmisión por radiación depende directamente de la emisividad, siendo mayor cuando mayor sea ésta. El yeso tiene una alta emisividad (aproximadamente del 90%), pero el efecto en el aislamiento térmico es poco desfavorable, ya que el yeso tiene una baja absorbencia. Cuanto más blanca y brillante sea su superficie, menor coeficiente de absorción tendrá (entre un 20% y un 10% de la energía recibida). (Villanueva & García, 2001).

Por otra parte, la elevada emisividad del yeso lo hace muy apto para su utilización en paneles radiantes, ya que emite aproximadamente el 90% del calor recibido (Villanueva & García, 2001).

En el Documento Básico HE (Ahorro de energía) del CTE de 27 diciembre de 2010 (RD 314/2006) se establecen una serie de requisitos para que en los edificios se consiga un uso racional de energía necesaria para su utilización, reduciendo a límites sostenibles su consumo. Uno de los requisitos es la limitación de la demanda energética. Para ello, *los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar.*

Para calcular los parámetros característicos de los cerramientos y particiones interiores que forman la envolvente térmica es necesario conocer las propiedades higrométricas de los materiales que la componen. Los valores de diseño de estas propiedades se obtendrán de valores declarados para cada producto, según marcado CE, o de documentos reconocidos para cada tipo de producto. Estos valores son distintos de los contenidos en la NBE CT-79 (RD 2429/1979) *Condiciones térmicas de los edificios*, ya que con la aplicación del CTE varían las condiciones de ensayo.

Se pueden tomar como valores válidos para la justificación del cumplimiento del CTE los que se incluyen en la base de datos del programa LIDER (programa informático de referencia del Documento Básico HE-1) (Tabla 13).

Materiales	Densidad (kg/m ³)	Coef. Conductividad térmica (W/mK)
Enlucido de yeso	1000<d<1300	0,570
	d<1000	0,400
Enlucido de yeso aislante	600<d<900	0,300
	500<d<600	0,180
Placa de yeso o escayola	750<d<900	0,250
Placa de yeso laminado (PYL)	750<d<900	0,250
Placas de yeso armado con fibras minerales	800<d<1000	0,250
Hormigón con áridos ligeros	1600<d<1800	1,150
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido	1250<d<1450	0,800
	1000<d<1250	0,550
	750<d<1000	0,400
	500<d<750	0,300

Tabla 13. Valores de coeficientes de conductividad térmica de distintos materiales en función de su densidad según *Base de datos del LIDER (versión 1.0)*.

2.1.9.3 Inercia térmica

La inercia térmica es la capacidad que tiene la masa de conservar la energía térmica recibida e ir liberándola progresivamente, disminuyendo de esta forma la necesidad de aportación de climatización.

Depende de la difusividad de los materiales en relación con el acondicionamiento higrotérmico, de la velocidad de enfriamiento de los paramentos (directamente proporcional a su calor específico e inversamente proporcional al coeficiente de transmisión térmica total del paramento) y de la velocidad de propagación de la onda térmica (proporcional a la difusividad del material y al factor de amortiguamiento).

El yeso tiene una elevada inercia térmica como material de construcción, en cambio, algunos prefabricados se caracterizan por presentar una baja inercia térmica.

2.1.9.4 Confort térmico superficial

El confort superficial se entiende como la sensación térmica percibida al tocar la superficie de un material, con independencia de la que realmente posee.

Depende del coeficiente de penetración térmica del material que, a su vez, depende directamente del coeficiente de conductividad térmica, del calor específico y de la densidad del material (Villanueva & García, 2001) (Tabla 14).

Cuanto menor sea el coeficiente de penetración térmica, más confortable será el tacto de su superficie. Se puede considerar que el yeso presenta un buen confort superficial, ya que tiene un bajo coeficiente de penetración térmica, comparativamente con otros materiales.

Material	Coficiente de penetración térmica (KCAL/H1/2.M ² .°C)
Corcho	2,66 – 4,10
Madera	8,20 – 12,09
Hormigón celular	10,25 – 26,65
Yeso (200 kg/m ³)	2,25
Yeso (1.000 kg/m ³)	9,82

Tabla 14. Valores de coeficientes de penetración térmica de distintos materiales (del Río, 2002)

2.1.9.5 Acondicionamiento acústico

El aislamiento al ruido aéreo consiste en la oposición que los elementos constructivos hacen a la transmisión del sonido que se propaga por el aire. (Villanueva & García, 2001). En este sentido, el yeso ofrece una solución que asegura la continuidad de los muros y de los tabiques, evitando los puentes acústicos (Hugon & Serre, 1982).

No obstante, el yeso obedece a las leyes generales de la acústica. Desde el punto de vista teórico, la transmisión directa de la energía sonora por las paredes viene regida por la ley de masas y la ley de frecuencia. Según estas leyes, el aislamiento de una pared homogénea es función de su propio peso y de la frecuencia del sonido (Hugon & Serre, 1982) (Tabla 15).

Siguiendo la ley de Berger, para una frecuencia dada, el índice de debilitación acústica crece proporcionalmente al logaritmo de la masa por m² de pared (Hugon & Serre, 1982).

Sin embargo, en la práctica se observa que el yeso tiene una frecuencia de resonancia dentro del campo de frecuencias audibles. De forma que la incidencia oblicua de las ondas sonoras sobre un paramento produce un efecto de resonancia del material que disminuye su aislamiento (Villanueva & García, 2001).

Material	Coficiente medio de absorción acústica
Hormigón	0,015
Cemento	0,020
Yeso	0,020
Madera	0,030 – 0,100
Ladrillo	0,032
Corcho	0,160

Tabla 15. Valores de coeficientes de absorción acústica de distintos materiales (del Río, 2002)

En cuanto al coeficiente de absorción acústica, las superficies lisas de yeso presentan un valor muy bajo, pero se puede mejorar, debido a su facilidad de moldeo, con la realización de paneles que incorporen materiales absorbentes (Hugon & Serre, 1982).

Los tabiques delgados de yeso (de 5 cm a 10 cm) disponen de prestaciones fonéticas que se colocan, a causa de su gran rigidez, por debajo de las que debería conferirle su masa. Estos tabiques presentan, sin embargo, a grosores iguales, características fonéticas comparables a otros tabiques delgados de ladrillos (Nolhier, 1986).

Las paredes de más espesor realizadas con materiales a base de yeso, se colocan, desde el punto de vista fonético y por comparación con otros materiales, según la ley de la masa: cuanto más pesado sea el metro cuadrado, mejor es su aislamiento fonético (Nolhier, 1986).

Así mismo, es fácil realizar con componentes industriales de yeso (del tipo placa delgada de cartón) tabiques ligeros de doble pared no unidas, que afecten el aislamiento fonético muy por encima a las que se darían con el efecto de la ley de masas (Nolhier, 1986).

Elemento constructivo	Nivel exigido (dBA)
Entre recinto protegido y cualquier otro recinto de otra unidad de uso	>50
Entre un recinto protegido y un recinto común del edificio	>50
Entre un recinto protegido y recinto de instalaciones o de actividad	>55
Entre un recinto habitable y un recinto común del edificio	>45
Entre un recinto habitable y recinto de instalaciones o de actividad	>45
Tabiquería	>33
Medianería entre recintos protegidos y/o habitables (cada uno de los cerramientos)	>40
Ruido exterior (en función del tipo de ruido que predomine, el Ld y el tipo de edificio)	>30-47

Tabla 16. Exigencias del CTE al ruido aéreo entre recintos colindantes horizontal o verticalmente según DB HR del CTE

En el capítulo 3.1 del Documento Básico HR de *Protección frente al ruido* del Código Técnico de la Edificación (septiembre 2009) se establecen las exigencias frente al ruido aéreo entre recintos colindantes (Tabla 16).

En la Tabla 17 se presentan valores de aislamiento de algunas soluciones constructivas según el Catálogo de elementos constructivos del CTE.

Tipo de partición	Espesor (cm)	Masa Acústica (kg/m ²)	Aislamiento acústico R (dBA)
Tabique de ladrillo hueco doble (*)	7	89	37
Placa de yeso o escayola	10	100	38
Bloques de hormigón (*)	8	128	40

(*) Guarnecido con yeso en ambas caras, de 1,5 cm de espesor cada una.

Tabla 17. Valores de aislamiento acústico de algunas soluciones constructivas según el Catálogo de elementos constructivos del CTE (Ministerio de Fomento, 2011)

2.1.9.6 Regulación de la humedad (regulación higrotérmica)

Desde el punto de vista de la regulación higrotérmica interesa evitar la condensación superficial y la humectación de los paramentos por condensación en masa, además de mantener un nivel adecuado de humedad relativa en el interior de los locales. En este sentido, el yeso, debido a su microestructura porosa, es capaz de almacenar moléculas de vapor de agua en su masa cuando el vapor se presenta en exceso en el ambiente, y de cederlas al ambiente cuando este es más seco. De esta forma se consigue un nivel de humedad equilibrado (Villanueva & García, 2001).

Así, por ejemplo, una obra de yeso ejecutada con un 80% de agua de amasado, en una atmósfera mantenida a 20°C y 65% de humedad relativa, pierde la totalidad de su agua no combinada en menos de 30 días. Este efecto se produce para cualquier humedad relativa del ambiente (Hugon & Serre, 1982).

Según ensayos de laboratorio, resulta que el yeso desecado, mantenido en un medio isotérmico pero en ambiente saturado, absorbe, en un tiempo comparable al de desecación, una humedad aproximada del 0,8% (Hugon & Serre, 1982).

2.1.10 Proceso de fabricación industrial de yeso para construcción

2.1.10.1 Introducción

A partir del mineral de yeso, mediante calcinación, puede obtenerse como producto yeso en polvo (semihidrato o anhidrita) y productos prefabricados (placas de yeso y escayola, paneles), mediante diferentes procesos de fabricación (Figura 17 y Figura 18). El presente estudio se centra en la fabricación de productos en polvo para construcción (y, más adelante, concretamente en la fabricación de anhidrita II).

Además de los tipos de yeso obtenidos por calcinación de la piedra de yeso natural, existe un tipo de yeso de origen artificial, denominado yeso químico o sintético, que se obtiene como subproducto de diversos procesos industriales (ej. sulfoyeso, boroyeso, fosfoyeso, etc.).

Los yesos obtenidos a partir del aljez y los artificiales no presentan las mismas propiedades (Wirsching, 2005).



Figura 17. Fases de proceso en una planta de fabricación de yeso en polvo.

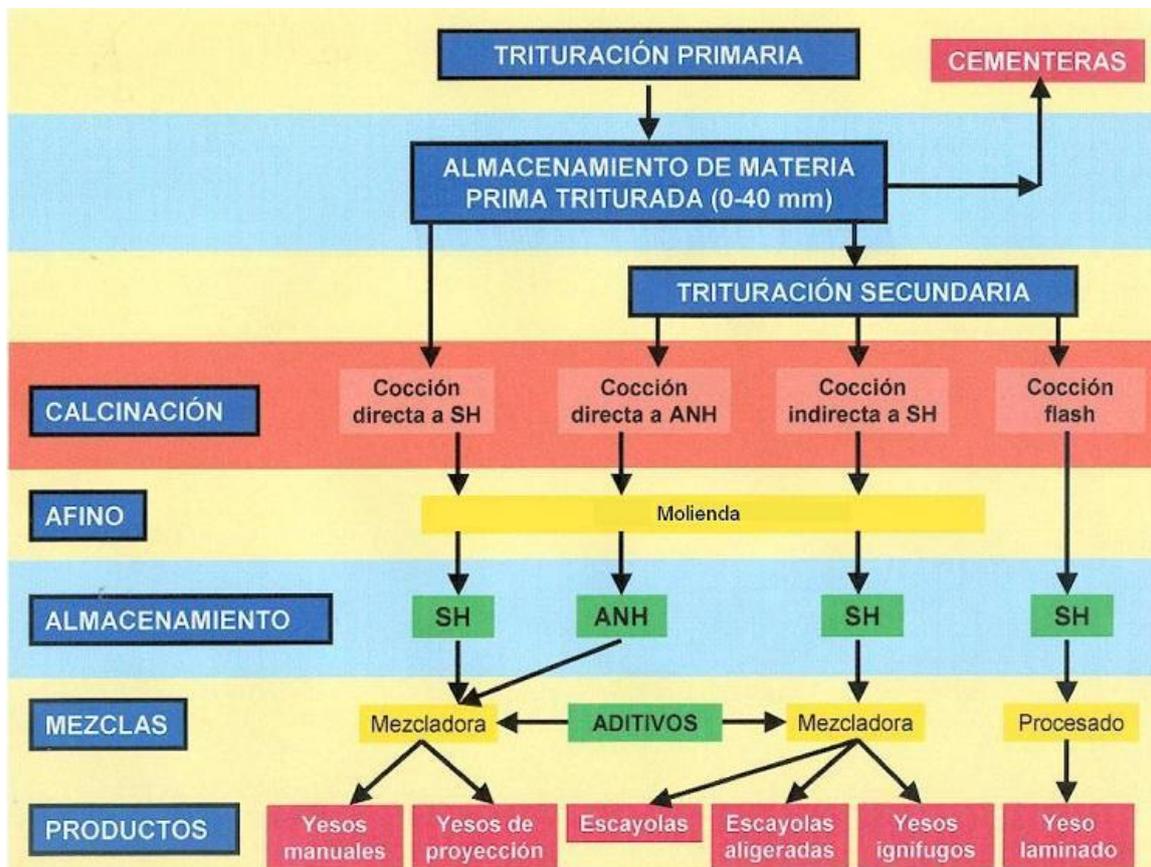


Figura 18. Esquema del proceso para la fabricación de productos en base yeso (Universidad de Alicante, 2002)

2.1.10.2 Extracción

El yeso se extrae mediante dos métodos: a cielo abierto y mediante minería subterránea. En España el método de explotación utilizado es mayoritariamente el de cielo abierto (Figura 19 y Figura 20). No obstante, en algunos lugares de Europa existen explotaciones de minería subterránea (Cerulla, 1997).



Figura 19. Cantera de yeso en Beuda (Girona)

Para la explotación se definen una serie de parámetros de diseño con el objetivo de alcanzar las producciones programadas de la forma más económica posible, en las mejores condiciones de seguridad.

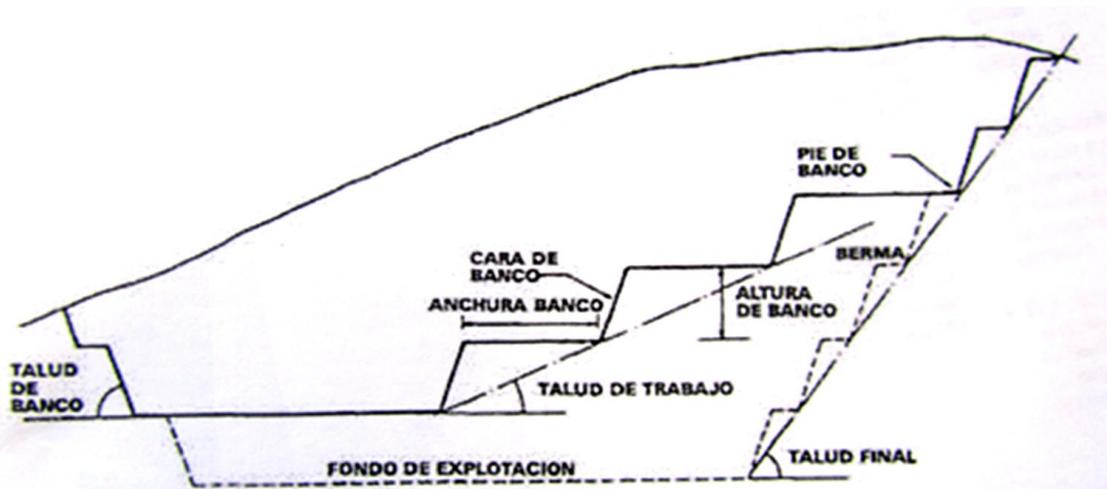


Figura 20. Tecnología utilizada en una explotación a cielo abierto (Cerulla, 1997)

Para la perforación se utilizan perforadoras neumáticas o hidráulicas equipadas con martillo en fondo o en cabeza. El diámetro de perforación habitual se encuentra entre 64 y 105 mm (Cerulla, 1997).



Figura 21. Fotografía perforadora trabajando en Llinars del Vallès (Barcelona)

El método consiste en la perforación de una serie de barrenos de diámetro variable formando una cuadrícula, que se cargan con explosivo y se inician con cordón detonante y detonadores (Figura 21). La cuadrícula de perforación depende directamente del diámetro de perforación y de la dureza del mineral (Cerulla, 1997).

En el fondo de los barrenos se carga una pequeña cantidad de un explosivo potente y rompedor (Goma 2 EC o Riogel 2) que favorece el arranque en el pie del banco. El resto del barreno se llena con un explosivo de potencia media y una alta producción de gases (Nagolita), que se carga a granel en sacos o con un vehículo cargador; este explosivo efectúa el arranque y la fragmentación del material, así como el desplazamiento del mismo. Entre ambos explosivos se consigue un efecto doble de arranque y rotura (Cerulla, 1997).

La cantidad de explosivo en relación a la cantidad de material arrancado se denomina consumo específico y varía en función de diversos aspectos de la voladura (tipo de material, geometría de la voladura, fragmentación y resultados deseados) y suele ser de unos 300 g/m^3 (Cerulla, 1997).

El yeso extraído en las explotaciones a cielo abierto se carga mediante palas cargadoras de ruedas y retroexcavadoras. Estas palas cargan el material sobre distintos tipos de vehículos, como Dumpers o camiones volquete (Cerulla, 1997).

Según la capacidad máxima de producción y la distancia a la planta de machaqueo (que puede encontrarse en la misma cantera, en la planta de fabricación o a distancias variables de las canteras) se determina el número y dimensión de vehículos necesarios (Cerulla, 1997).

En España existe legislación (Real Decreto Ley 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental y Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental) que obliga a la elaboración de un plan de restauración de la superficie afectada por las actividades mineras, con el fin de asegurar la utilización racional de los recursos naturales y mantener y mejorar la calidad de vida.



Figura 22. Vehículos trabajando en una cantera

2.1.10.3 Trituración Primaria

La trituración primaria consiste en reducir el tamaño del material procedente de la cantera hasta un tamaño adecuado para fabricación.

En la planta de trituración (Figura 23), el material se descarga en la tolva de recepción, que posee un alimentador en su fondo (vibrante, de cadenas, etc.) que dirige el material hacia la machacadora, previo cribado, mediante separador de discos o barras, eliminando parte de las tierras y fracciones pequeñas de mineral, que son recuperadas mediante una criba que separa el material fino del material grueso (Cerulla, 1997).

La fracción más gruesa cae a la machacadora o molino que lo moltura, depositándolo en una cinta transportadora, que lo vierte a una criba provista de un número determinado de telas, que clasifica los tamaños adecuados para fabricación (250-55 mm), suministro a cementeras (7-55 mm) y finos para agricultura (0-7 mm).

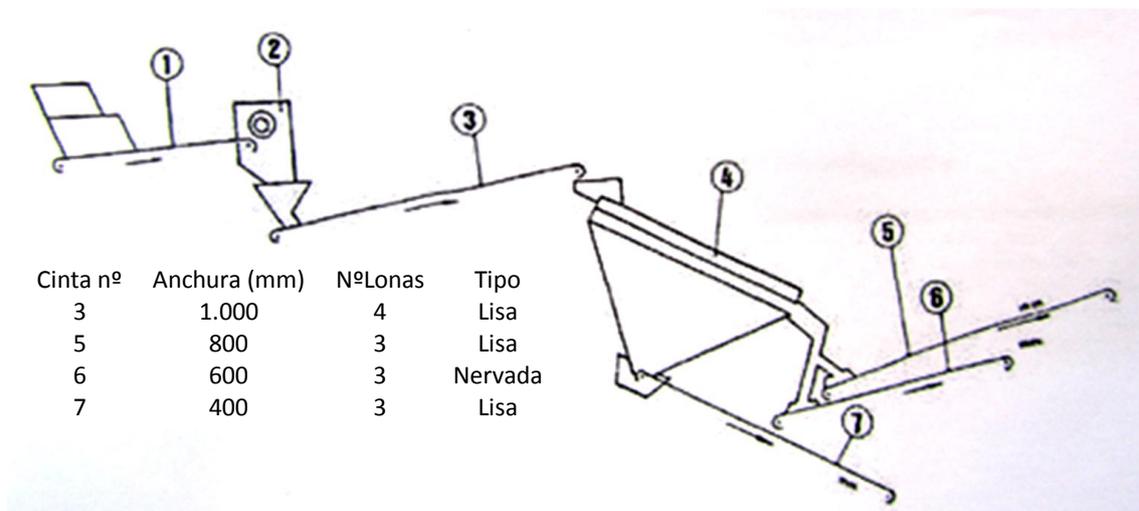


Figura 23. Flujograma general de la planta de trituración. 1) alimentador, 2) machacadora de mandíbulas, 3), 5), 6) y 7) cintas transportadoras, 4) criba. (Cerulla, 1997)



Fig. 1-6. Machacadoras de mandíbulas y cono.

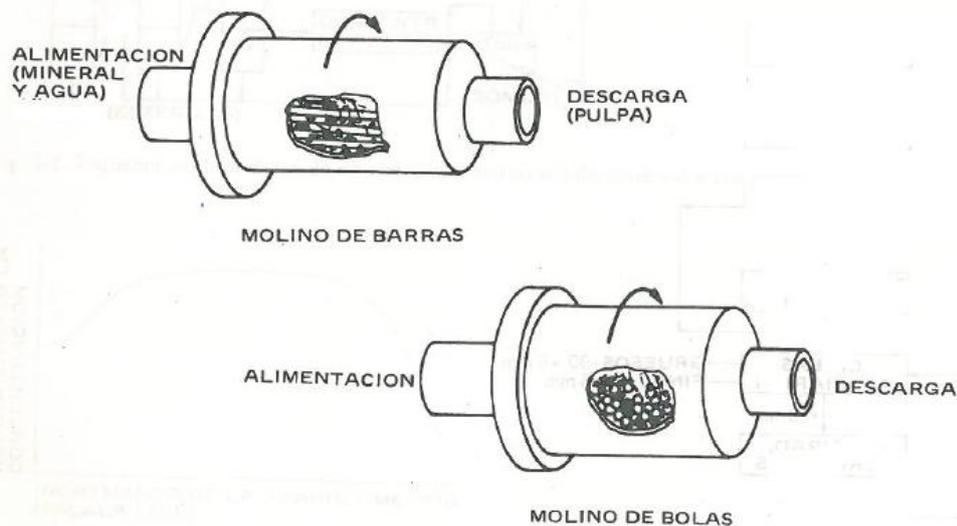


Figura 24. Molinos de barras y bolas (Lynch, 1977).

La trituración primaria se lleva a cabo normalmente mediante machacadoras de mandíbulas o trituradoras de cono (giratorias) (Lynch, 1977) (Figura 24).

- Machacadora de mandíbulas. Estas trituradoras reducen las rocas grandes rompiéndolas por compresión. Constan de dos planchas o mandíbulas, colocadas una frente a otra, en forma de "V", de las cuales una es fija y la otra es móvil. La mandíbula móvil ejerce la fuerza en la roca forzándola contra la placa inmóvil, que la rompe. El mineral triturado cae por la abertura que forman las mandíbulas en la parte inferior. La roca permanece en las mandíbulas hasta que es bastante pequeña para pasar por esta abertura inferior (Gomis, 2007).
- Trituradoras de cono. La trituración es causada por el cierre del hueco entre la línea de la pieza móvil montada en el huso vertical central y las líneas cóncavas fijas del marco principal de la trituradora. El hueco es abierto y cerrado por una excéntrica situada en la parte inferior del huso (Gomis, 2007).

2.1.10.4 Almacenamiento

El material triturado destinado a fabricación se transporta en camiones hasta la planta, donde se deposita en stock o se vierte directamente a las tolvas de alimentación de la planta de fabricación (Cerulla, 1997).

En el caso de realizarse la trituración primaria en la planta de fabricación, el mineral triturado se conduce mediante cintas transportadoras, elevadores de cangilones, etc. hacia los silos o la zona de stock.

2.1.10.5 Trituración secundaria

La trituración secundaria se realiza con el fin de obtener la granulometría adecuada para su calcinación (entre 0 y 10-12 mm de diámetro) (Cerulla, 1997).

Se emplean molinos de rodillos, donde el material es forzado a pasar entre una placa y un rodillo o entre dos rodillos que giran reduciendo el tamaño de partícula (Gomis, 2007).

Para obtener tamaños de partículas más pequeños se utilizan molinos de martillo, en los que el material se machaca mediante martillos que giran a gran velocidad. El material es forzado contra una placa sólida rugosa que disminuye el tamaño de las partículas. Finalmente, el material es forzado contra una rejilla de descarga, donde las partículas más finas caen a través de la rejilla y las más grandes viajan alrededor para otro ciclo machacante (Gomis, 2007).

2.1.10.6 Calcinación

La calcinación consiste en el proceso de deshidratación y cambio de fase para conseguir semihidrato, anhidrita, etc. Según el tipo de producto que se quiera obtener se utiliza un tipo de horno distinto (Gomis, 2007).

Los sistemas de cocción se dividen en dos grandes grupos: de fuego directo o de fuego indirecto, según si los gases de combustión entran en contacto con la materia prima o no.

Industrialmente los más utilizados, según Rivero (1997) son los siguientes:

- Marmita horizontal tipo beau francés (en continuo o discontinuo) de fuego indirecto (Figura 25). El consumo energético de este tipo de hornos es elevado, ya que el tiempo de cocción es más largo (30-45' a 150°C) que en hornos rotatorios. Sin embargo, la calidad final del yeso es mejor (semihidrato β) debido, entre otras causas, a la presencia de vapor de agua durante la cocción, por lo que se forma 10-20% de semihidrato α .

Según Nolhier (1986) el rendimiento térmico de este tipo de horno es medio, no siendo insalvable considerando las bajas temperaturas aplicadas. Sin embargo, es interesante recuperar el máximo de calorías, instalando un intercambiador de calor que enfríe los gases calientes a la salida del horno y que precaliente el aire frío que alimenta los quemadores.

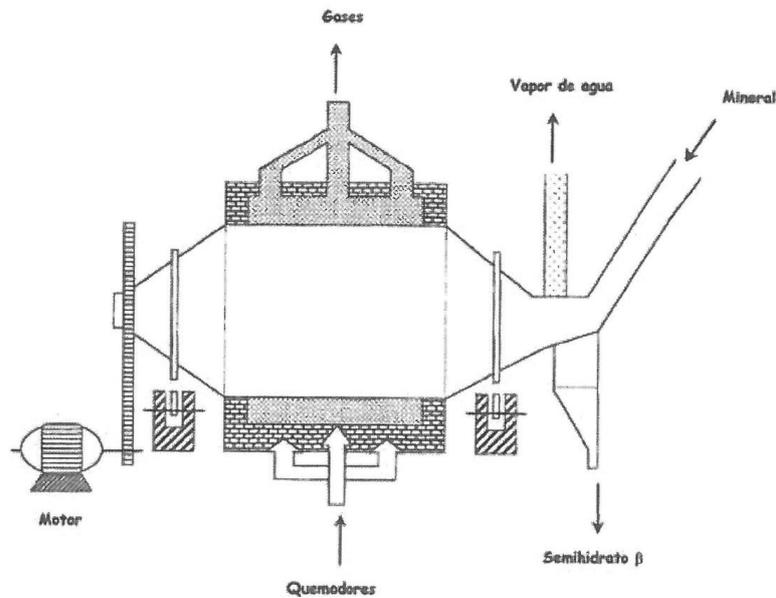


Figura 25. Marmita horizontal tipo (Rivero, 1997).

- Marmita cónica vertical tipo inglesa en continuo de fuego indirecto (Figura 26). Dispone de cámara de combustión sumergida con elevado rendimiento energético (superior al 80%). La temperatura de cocción es de 150°C y la capacidad final de 25 Tm/h de semihidrato.

Según Nohier (1986) el coste de inversión de este tipo de horno es relativamente bajo, así como los costes de mantenimiento. Sin embargo es necesario disponer de dispositivos de tratamiento de polvos evolucionados.

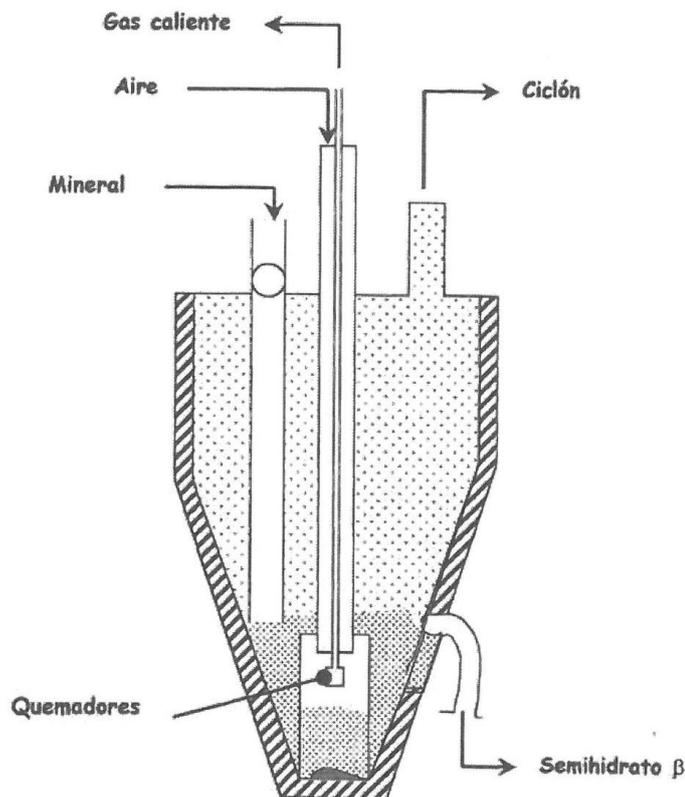


Figura 26. Marmita cónica vertical (Rivero, 1997).

- Horno rotatorio horizontal de fuego directo o indirecto (tipo continuo de tubos múltiples a contracorriente o discontinuo) (Figura 27 y Figura 28). Permite fabricar semihidrato β a 170°C, con una capacidad de 20-30 Tm/h y anhídrita a 500°C, con una capacidad de 10-12 Tm/h.

El cilindro está equipado en su interior de dispositivos, espirales, travesaños o cadenas, que aseguran la distribución del material sobre el conjunto de la sección y garantizan una cocción intensiva y regular, favoreciendo los intercambios térmicos entre el gas y el material (Nolhier, 1986).

Normalmente, en un mismo horno rotativo de fuego directo se producen semihidrato β , Anhídrita III y Anhídrita II. Usualmente se extraen del horno en diferentes puntos la AnIII y la AnII en función de la temperatura de calcinación y luego se mezclan (aproximadamente 2/3 de AnIII con 1/3 de AnII). En el silo de reposo, después de la calcinación, la AnIII se transforma en SH β , al descender la temperatura (Villanueva & García, 2001).
- Horno vertical, de molienda y calcinación en continuo tipo Claudius-Peters, de fuego directo (a gas natural). Este horno se caracteriza por la rapidez del proceso de obtención del semihidrato β , la cocción se realiza en menos de un minuto (Nolhier, 1986), y la buena calidad del producto, muy reactivo, especial para la fabricación de prefabricados tipo placa de yeso o PLADUR. La temperatura de cocción es de unos 160°C y la capacidad de 35 Tm/h. Los gases, llevados a más de 500 °C, son insuflados a través del molino y arrastra las partículas finas (Nolhier, 1986).

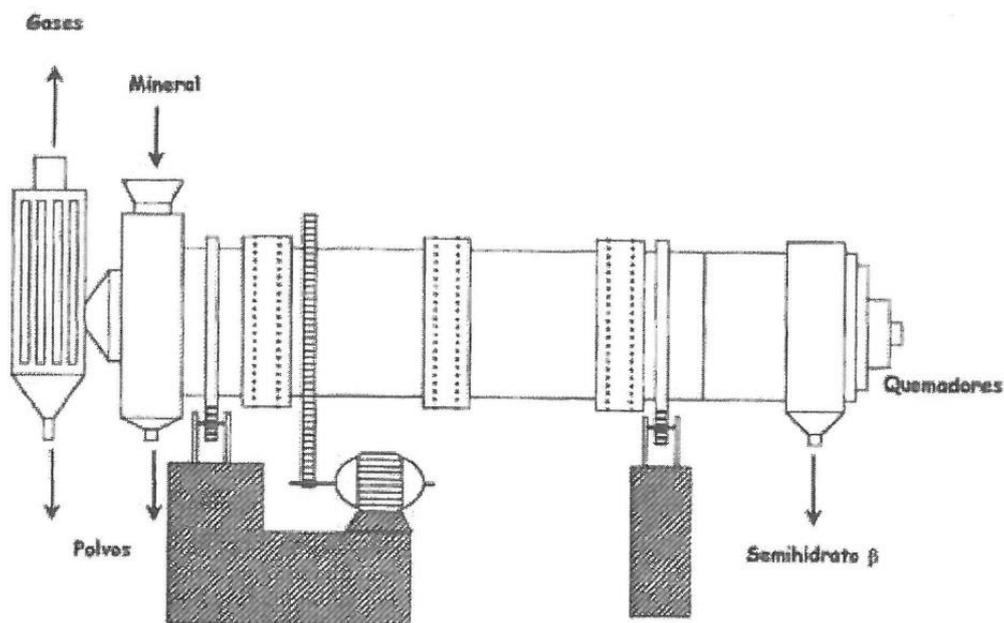


Figura 27. Horno rotatorio horizontal a contracorriente (Rivero, 1997).

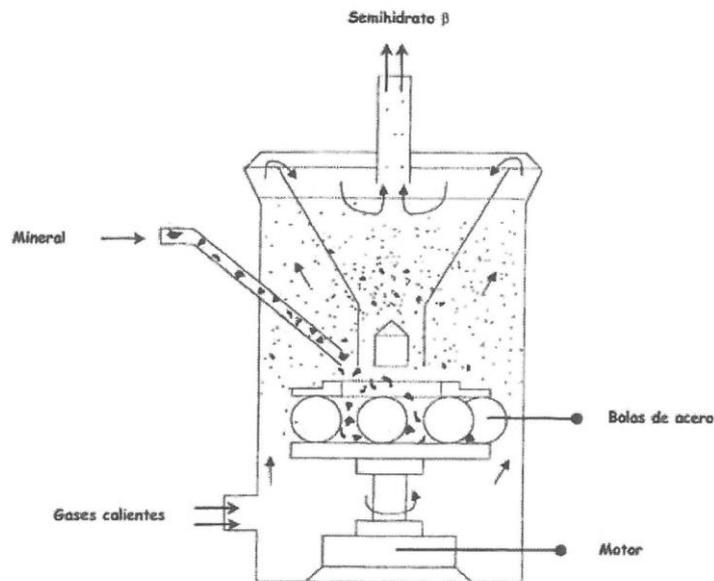


Figura 28. Horno vertical, de molienda y calcinación en continuo (Rivero, 1997).

- Horno vertical para calcinación Flash, de fuego directo, tipo Claudius-Peters (Figura 29). Realiza una cocción instantánea a 700 °C de mineral de yeso muy fino (inferior a 200 μm), muy útil para los sulfoyesos o yesos sintéticos. Se obtiene un producto muy reactivo, fundamentalmente anhidrita III. Su capacidad es de 10-20 Tm/h.

El yeso es separado del gas por procedimientos clásicos, ciclones y separadores de polvo. Una parte del gas es reciclado dentro el horno (Nolhier, 1986).

La inversión, esencialmente compuesta de dispositivos de fumistería, es relativamente económica en comparación de los materiales mecánicos (Nolhier, 1986).

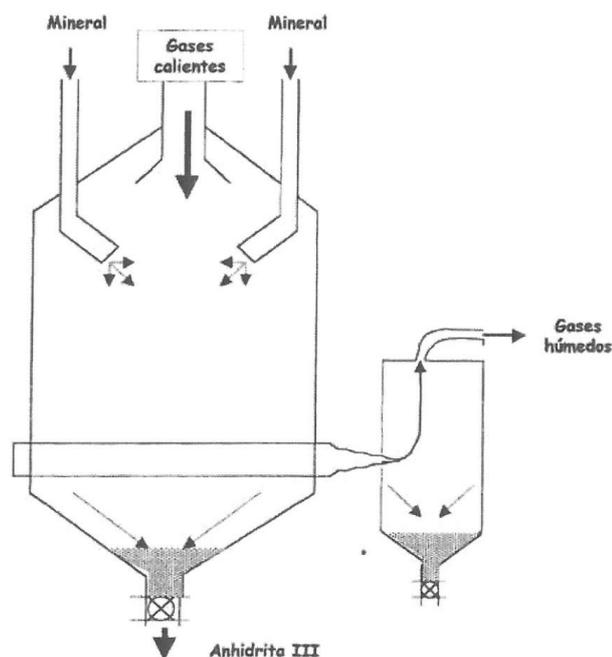


Figura 29. Horno vertical para calcinación Flash (Rivero, 1997).

- Horno parrilla tipo KNAUF, de fuego directo (Figura 30), para la fabricación de anhidrita y yesos multifásicos (yeso sobrecocido 300-900 °C). El yeso debe prepararse según 3-4 granulometrías diferentes (4-11/11-25/25-40/40-60 mm), la parrilla caliente (270°C) se mueve a 20 m/h, los gases calientes circulan por el mineral teniéndose una temperatura de 700°C en la capa superior y de 300°C en la capa inferior. El mineral no se mezcla durante la calcinación, produciéndose muy poco polvo y obteniendo una eficiencia térmica muy elevada. La capacidad puede llegar a 2 mill. Tm/año. Este tipo de horno está destinado a producir una mezcla de semihidratos, de anhidrita soluble y de sobrecocido. Permite obtener un producto constante y homogéneo, del que la calidad puede controlarse actuando sobre la temperatura del gas y sobre las clases de granulometrías de los granos. Su delicado reglaje provoca una utilización poco corriente (Nolhier, 1986).

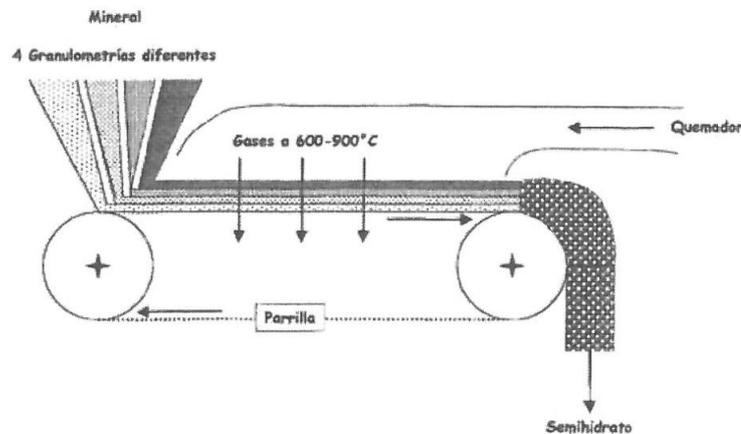


Figura 30. Horno de parrilla móvil (Rivero, 1997).

Otro tipo de horno utilizado industrialmente son las autoclaves (Figura 31), con los que se fabrica el yeso alfa, constituido prácticamente en su totalidad por semihidrato, para aplicaciones especiales. Se trata de grandes ollas a presión. Ellas pueden ser verticales u horizontales. Las calorías son aportadas o bien directamente por el vapor inyectado al interior del recinto, o bien desde el exterior, y a veces se combinan los dos procedimientos. Estas autoclaves funcionan de forma continua (Nolhier, 1986).

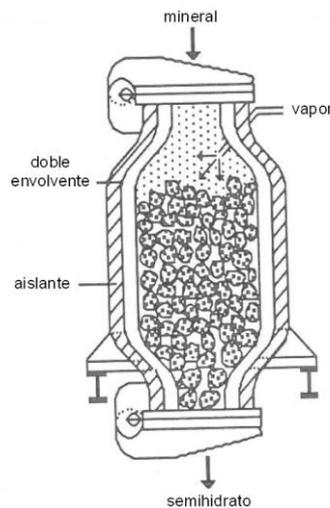


Figura 31. Autoclave vertical (Nolhier, 1986).

2.1.10.7 Molienda/afino

Los yesos de construcción requieren generalmente del proceso de molienda posterior al proceso de calcinación, con el fin de obtener la granulometría requerida, entre 0 y 1,5 mm. Para ello se utilizan molinos de martillo, a velocidad media de 900-1200 rpm, en circuito cerrado con el cribado para garantizar su granulometría final (Gomis, 2007). Las escayolas necesitan tener una granulometría de entre 0 y 200 micras. Para conseguirla se utilizan molinos de espigas/pitones a gran velocidad (2000-3000 rpm) y separadores centrífugos (Gomis, 2007).

En ocasiones el yeso grueso no requiere este refinado (Villanueva & García, 2001).

2.1.10.8 Mezcla y aditivado

Este proceso consiste en la dosificación gravimétrica de los componentes mayoritarios (SH, An) y los componentes minoritarios (aditivos) hacia las mezcladoras (Gomis, 2007).

Las mezcladoras pueden ser continuas o discontinuas. Estas últimas suelen disponer de un mejor control, automatizado (Gomis, 2007).

2.1.10.9 Envasado/carga

Una vez los productos han sido mezclados son conducidos a silos para su posterior envasado y paletizado, o bien a su distribución a granel.

2.2 AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL. SISTEMAS DE CONTROL

En esta sección se introducirán los aspectos básicos que rigen los sistemas automáticos de control. En la actualidad, estos sistemas de control se usan en prácticamente todas las aplicaciones industriales modernas. En la industria actual existe la necesidad de controlar las magnitudes físicas, conociendo su valor y actuar en consecuencia. Para controlar un sistema es clave saber lo que se desea que haga el sistema y controlar como lo está haciendo el mismo. Hay muchas formas de controlar los sistemas automáticos, por ejemplo, un termostato regula el sistema que hace que suba o baje la temperatura hasta un valor que se ha preestablecido. La forma de decirle al sistema que haga eso es actuando sobre el termostato. Una vez que se tenga la información de lo bien que está funcionando el sistema, se deberá hacer algo con esa información. El problema que el diseñador se enfrenta en los sistemas de control consiste en determinar cómo usar la información disponible para desarrollar y aplicar una señal de control que hará que el sistema haga lo que el diseñador pretende que haga.

La ingeniería de Control está basada en los fundamentos de teoría de realimentación y el análisis de sistema lineal, e integra los conceptos de teoría de la red y teoría de comunicación. Por lo tanto, la ingeniería de control no está limitada a ninguna disciplina de la ingeniería pero es equitativamente aplicable a ingeniería aeronáutica, química, mecánica, ambiental, civil y eléctrica. Por ejemplo, un sistema de control incluye a menudo componentes eléctricos, mecánicos y químicos. Además, cuando el conocimiento de la dinámica de sistemas aumenta, la habilidad para controlar estos sistemas también aumentará (Dorf y Bishop, 1998).

2.2.1 Sistemas de control

Un sistema de control es un dispositivo o conjunto de dispositivos para la gestión y mando para regular el funcionamiento de otros dispositivos. Básicamente hay dos tipos de sistemas de control, con múltiples variaciones: los lógicos o secuenciales y los controles lineales o de retroalimentación. Existen a la vez, los sistemas que usan la lógica borrosa, que combina y aprovecha las ventajas de los diseños lógicos con el control lineal.

Los sistemas de control se pueden representar mediante diagramas de bloques, que representan una simplificación visual de las relaciones entre la entrada y la salida del sistema.

2.2.2 Sistemas de lazo abierto

Son los sistemas en que la señal de salida no influye sobre la señal de entrada. La exactitud de este tipo de sistemas depende la calibración de la relación entre entrada y salida. El transductor modifica la naturaleza de la señal de entrada al sistema de control (Dorf y Bishop, 1998).

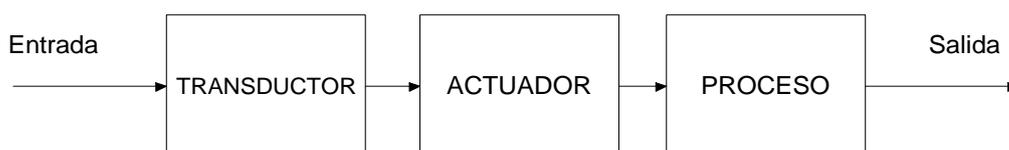


Figura 32. Esquema sistema de lazo abierto

Un ejemplo de lazo abierto sería un sistema de calefacción sin termostato. En la Figura 32 se pueden comprobar los elementos que constituirían el sistema.



Figura 33. Ejemplo de Sistema de lazo abierto

Los sistemas de lazo abierto dependen de la variable tiempo y la salida variable no depende de la variable de entrada. Estos sistemas, como se puede ver, no tienen realimentación (Figura 33). Uno de los inconvenientes de estos sistemas es que son muy sensibles a las perturbaciones.

2.2.3 Sistemas de lazo cerrado

En contraste con un sistema de control abierto, un sistema de lazo cerrado utiliza una lectura de la salida para comparar esta salida actual con la salida deseada. La acción de control, en cierto modo, depende de la salida, y ésta influye en la entrada. Esta relación se consigue mediante la realimentación o feedback. La acción de control se establece como una función entre la entrada y la salida. El concepto de realimentación ha sido la base para el análisis de los sistemas de control y su diseño.

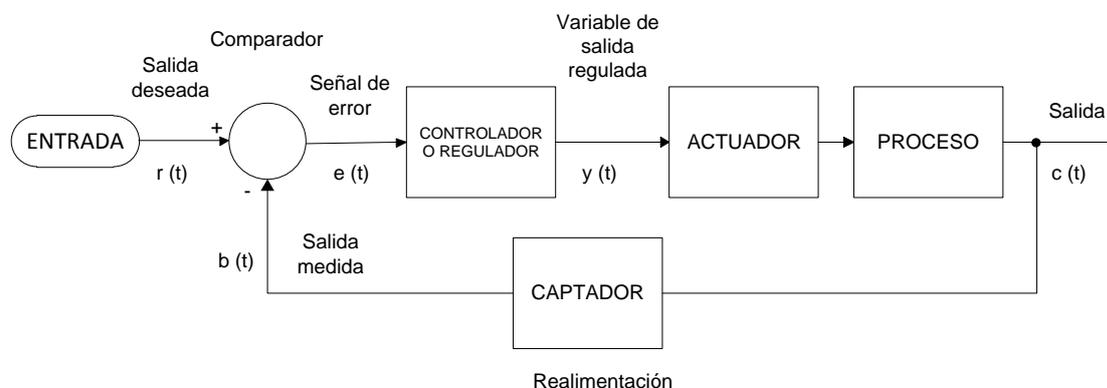


Figura 34. Esquema de Sistema de lazo cerrado

En la Figura 34 se muestra un esquema del sistema, donde $e(t)$ es la señal de error, $r(t)$ la de referencia y $b(t)$ la variable realimentada. En el comparador, la señal de referencia se compara con la señal medida por el captador, donde:

$$e(t) = r(t) - b(t)$$

Se pueden dar los siguientes casos:

Si $e(t) = 0$; en este caso la señal de salida tendrá el valor previsto

Si $e(t) \neq 0$; en este caso la señal de error actuará sobre el regulador, y él asimismo actuará sobre el actuador, el cual intentará ajustar el proceso para que a la salida se obtenga el valor deseado.

Siguiendo el ejemplo del apartado anterior, el captador puede ser un termómetro, para poder conocer en todo momento la temperatura de la habitación y poder compararla con la temperatura establecida, y el regulador puede ser un termostato. Mientras la temperatura no varíe respecto al valor prefijado, el regulador no actuará, y cuando ésta varíe, el regulador modificará su señal, haciendo que el actuador modifique la temperatura de la habitación.

2.2.4 Función de transferencia

La respuesta transitoria es la respuesta que se obtiene al aplicar una señal conocida a la entrada de un sistema (Figura 35). En los sistemas, normalmente la señal de entrada tiene forma de escalón. La función de transferencia relaciona las señales de entrada y de salida de un sistema y sirve para determinar:

- La respuesta del sistema frente a una señal de entrada
- La estabilidad del sistema y si el mismo se va a mantener dentro de unos límites acotados
- Los valores que se deberán aplicar al sistema para que permanezca estable

Un sistema dinámico lineal, puede ser descrito por esta ecuación diferencial (Deventer et al., 2003):

$$\sum_{i=0}^n a_i^c \frac{d^i y(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^m b_j^c \frac{d^j u(t)}{dt^j}$$

Donde $u(t)$ es la señal entrada del sistema y $y(t)$ la señal de salida. Sólo serán físicamente aplicables los sistemas que cumplan:

$$m \leq n$$

En la mayoría de los casos se usará la función transformada de Laplace:

$$L\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Nota: La función transformada inversa de Laplace se usará para retornar los valores al dominio temporal:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\omega}^{\sigma+j\omega} F(s)e^{-s} ds$$

Y la relación entre dos señales $f_1(t)$ y $f_2(t)$ será:

$$L\{f_1(t) * f_2(t)\} = F_1(s) F_2(s)$$

Si se asigna el producto de las dos transformadas de Laplace para la primera ecuación diferencial, queda:

$$Y(s) \sum_{i=0}^n a_i^c s^i = U(s) \sum_{j=0}^m b_j^c s^j$$

Y la función de transferencia como:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0^c + b_1^c s + \dots + b_m^c s^m}{a_0^c + a_1^c s + \dots + a_n^c s^n}$$

Que es el cociente de dos polinomios para una señal simple de entrada y una señal simple de salida

La definición de función de transferencia sería: dado un sistema dado, la función de transferencia $G(s)$ del sistema es el cociente entre las transformadas de Laplace de las señales de salida y de entrada.

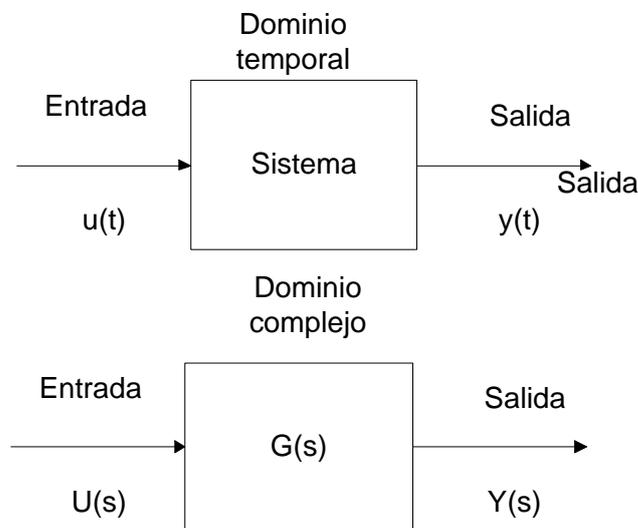


Figura 35. Diagrama entradas y salidas para tiempo real y complejo

Otra forma común de representar la función de transferencia sería mediante la siguiente expresión:

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n}$$

Donde si se conoce la función de transferencia $G(s)$ y se calcula la transformada de Laplace de la entrada, se conocerá la transformada de Laplace de la salida.

El denominador de la función de transferencia $D(s)$ se conoce como función característica, ya que expresa las características físicas de los elementos que conforman el sistema. Si se iguala a cero esta expresión, se denomina función característica del sistema.

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n = 0$$

Las raíces de la ecuación característica se denominan polos del sistema. Así mismo, las raíces del numerador $N(s)$ se denominan ceros del sistema (St. Clair, 1999).

Para que sea posible crear un sistema, debe cumplirse que el número de polos sea mayor o igual al número de ceros. El contrario significaría que el sistema responde antes de recibir la señal de entrada, cosa imposible a la práctica.

Se denomina orden de un sistema al que corresponde a su función característica, de forma que aparecen diferentes tipos de sistemas:

- Sistemas de orden 0: Su función de transferencia no tiene ningún polo
- Sistemas de primer orden: Su función de transferencia tiene un polo
- Sistemas de segundo orden: Su función de transferencia tiene dos polos
- Sistemas de orden superior: Su función de transferencia tiene más de dos polos

En control digital es más común trabajar con señales de tiempo discreto. La derivación de una señal $f(t)$ puede aproximarse a:

$$\frac{df(t)}{dt} \approx \frac{f((k+1)\Delta T) - f(k\Delta T)}{\Delta T}$$

Donde ΔT denota el intervalo temporal entre dos instantes. Así la ecuación diferencial se aproxima a una función por diferencias:

$$y_t = - \sum_{i=0}^n a_i y_{t-i} + \sum_{i=0}^n b_i u_{t-i}$$

Para distinguir los sistemas discretos de los continuos, los índices que se usan son, por ejemplo, u_t en lugar de $u(t)$.

Para evitar tratar con la convolución de la función transformada Z:

$$Z\{f(k)\} = F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k) z^{-k}$$

Se utiliza para describir sistemas discretos. Haciendo el proceso similar a la transformada de Laplace, esto lleva a la función transformada Z como función de transferencia:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} z^{-d}$$

Donde el término z^{-d} es el responsable del tiempo muerto del sistema (dead-time). Los sistemas sin tiempo muerto tendrán $d=0$. Para el desarrollo de la función de transferencia en lazo cerrado, se debe tener en cuenta que el controlador digital genere sólo las señales en puntos temporales determinados. Para asegurar que esta señal se mantiene constante entre dos puntos temporales se usará un retraso de orden cero H_0 . También el equivalente discreto de tiempo de sistemas lineales es un cociente entre dos polinomios:

$$H_0 G(z) = \frac{B(z)}{A(z)} z^{-d}$$

Representado por $B(z)$ y $A(z)$ y multiplicado por z^{-d} para los sistemas sin tiempo muerto. El circuito cerrado de la función de transferencia $G_w(z)$ para un sistema dinámico $H_0G(z)$ y un controlador de $D(z)$, se podrá calcularlo con la función:

$$G_w(z) = \frac{D(z)H_0G(z)}{1 + D(z)H_0G(z)}$$

Posteriormente se resolverá esta función por $D(z)$ para calcular el controlador cuando la función de transferencia de la planta $G(z)$ y la reacción de referencia $G_w(z)$ sean conocidas (González et al., 2004)

2.2.5 Representación con bloques

Como se ha visto anteriormente, se representa la relación entre la entrada y salida de un sistema físico mediante bloques (Figura 36), como un rectángulo que incluye una función de transferencia u operación matemática que se le aplicará a la entrada para obtener la salida (Piedrafita, 1999).

$$Y(s) = G(s) U(s)$$

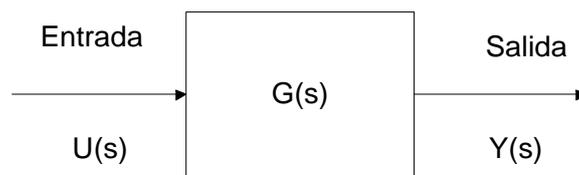
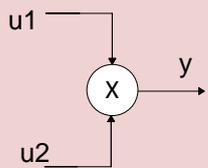
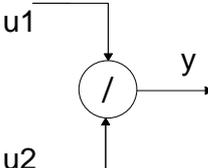
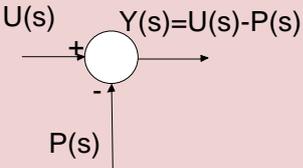
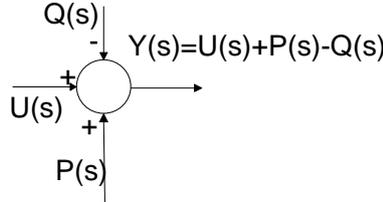
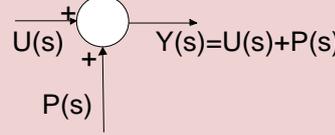
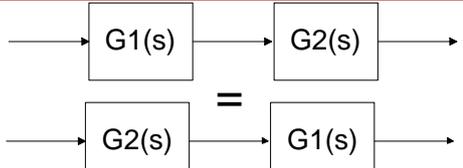
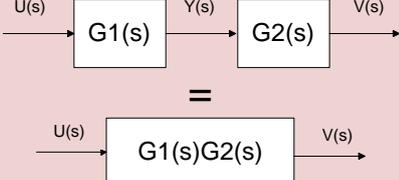
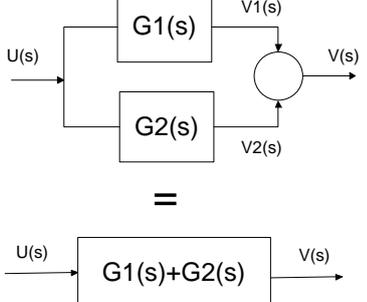


Figura 36. Representación de un sistema mediante bloques

<p>Ramificación de una variable</p>	
<p>Suma de dos variables</p>	
<p>Resta de dos variables</p>	

<p>Producto de dos variables</p>	
<p>División entre dos variables</p>	
<p>Comparadores</p>	
	
	
<p>Conexión en serie</p>	
	
<p>Conexión en paralelo</p>	

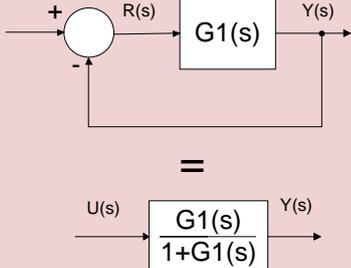
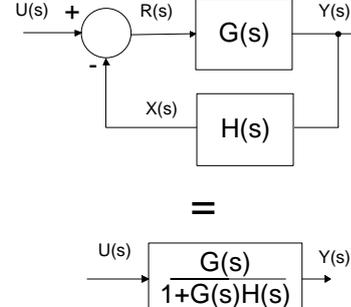
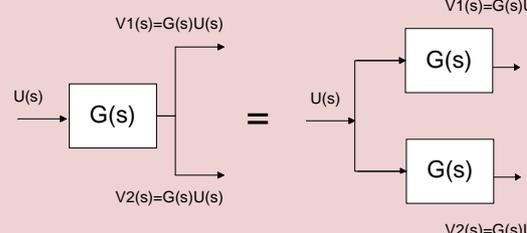
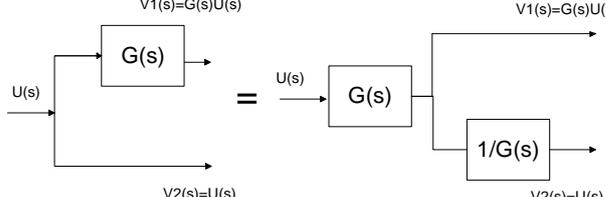
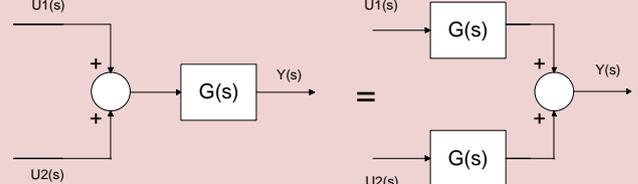
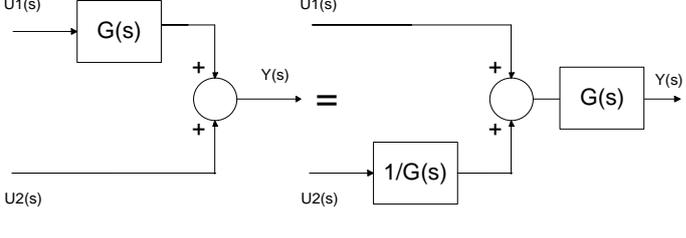
<p>Conexión en anillo con realimentación directa</p>	
<p>Conexión en anillo con realimentación a través de un segundo elemento</p>	
<p>Transposición</p>	
	
	
	

Tabla 18. Operaciones usando bloques

En la Tabla 18 se representan operaciones con bloques.

2.2.6 Estabilidad de un Sistema

Debido a su estructura de realimentación un sistema de control puede ser inestable, por ejemplo, pueden aparecer oscilaciones con amplitudes crecientes en las señales.

La estabilidad en los sistemas lineales es independiente de las señales de entrada-salida. Un sistema lineal será estable, si su función de ponderación tiende a cero, es decir, si

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0$$

Por el contrario, si el módulo de la función de ponderación aumenta con el tiempo hasta el infinito, el sistema se denomina inestable. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la función de ponderación no se da en una forma explícita y analítica y por lo tanto es costoso para determinar su valor. Si se conoce la función de transferencia de un sistema y como es la transformada de Laplace de la función de ponderación, existe una condición de estabilidad equivalente de acuerdo con la ecuación anterior. Se puede demostrar que para el análisis de estabilidad de un sistema, es suficiente comprobar los polos o raíces de la función de transferencia del sistema, es decir las raíces de su ecuación característica (Figura 37).

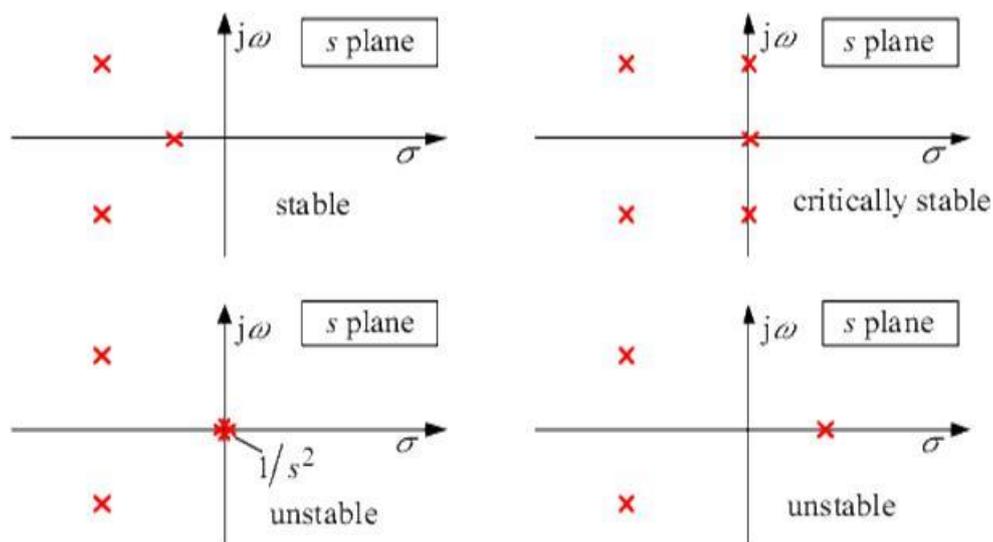


Figura 37. Condiciones de estabilidad de un sistema lineal (Schmid, 2005)

Se puede formular las condiciones de estabilidad como (Schmid, 2005):

- Estabilidad asintótica: Un sistema lineal es asintóticamente estable, si las raíces de su ecuación característica

$$Re s_i < 0 \quad \text{para todos } s_i (i = 1, 2, \dots, n)$$

o en otras palabras, si todos polos de su función de transferencia están en la mitad izquierda del plano.

- Inestabilidad: Un sistema lineal es inestable, si al menos un polo de su función de transferencia se encuentra en la mitad derecha plano, o, si por lo menos un polo múltiple (multiplicidad) está en el eje imaginario del plano.
- Estabilidad Crítica: Un sistema lineal es críticamente estable, si al menos existe un sólo polo en el eje imaginario, si ningún polo de la función de transferencia se encuentra en la derecha del plano, y además no hay varios polos en el eje imaginario.

2.2.7 Respuesta de un sistema

Un sistema no responde inmediatamente a una señal dada, sino que aparecen una serie de fenómenos transitorios, antes de normalizarse en una respuesta permanente, una vez sus variables se han normalizado. Esta respuesta transitoria dará una idea de la rapidez del sistema, mientras que la respuesta permanente da una idea de la precisión y robustez del sistema (Siler y Buckley, 2005)

Hay varias formas gráficas de representar una función de transferencia $G(s)$ de un sistema. Si se representa $|G(s)|$ y $\arg G(s)$ sobre el plano complejo serán necesarios dos diagramas tridimensionales. Por ejemplo, la Figura 38 muestra una representación gráfica de la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{s - 1}{s^2 + s + 1,25} = \frac{s - 1}{(s + 0,5 - j)(s + 0,5 + j)}$$

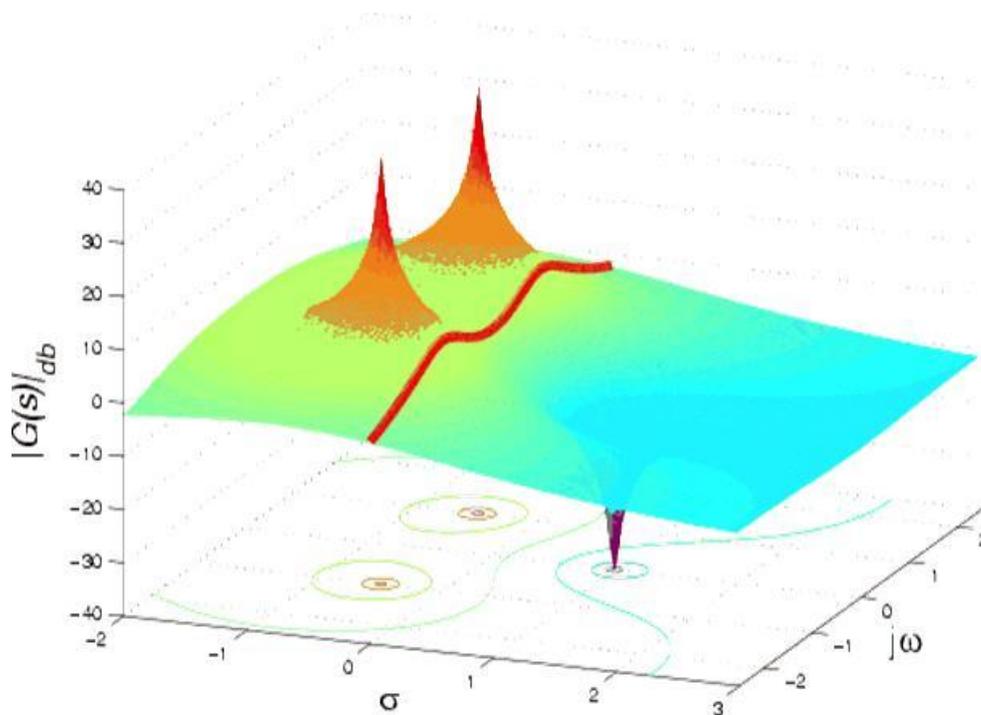


Figura 38. Grafico tridimensional que representa la respuesta de un sistema (Schmid et al., 2005)

Esta representación tridimensional muestra claramente la influencia de los polos y ceros en la magnitud de la función de transferencia. Tales diagramas son difíciles de manejar y afortunadamente, no son estrictamente necesarios para el análisis y diseño de sistemas de control, ya que muchas de las propiedades pueden ser descritas mediante la respuesta en la frecuencia. La respuesta de frecuencia está representada en la figura como el corte en el eje imaginario de los diagramas tridimensionales. Para el diagrama de la Figura 38, la intersección de este corte y la superficie está representada por la curva roja, que indica la magnitud de la respuesta de frecuencia.

2.2.8 El Controlador

Como se ha visto en un apartado anterior, el controlador es la parte principal en un sistema de bucle cerrado, ya que a partir del error obtenido, condiciona la acción del elemento actuador. La acción de control es la forma en que el controlador genera la señal de control. Algunas acciones del controlador son básicas (proporcional, derivadora e integradora) y otras son combinaciones de estas básicas (Proporcional-Integradora, Proporcional-Derivadora y Proporcional-Integradora-Derivadora) (Tabla 19)

Acciones básicas	Proporcional (P)
	Integrador (I)
	Derivador (D)
Combinación de acciones básicas	Proporcional-Integrador (PI)
	Proporcional-Derivador (PD)
	Proporcional-Integrador-Derivador (PID)

Tabla 19. Tipo de acciones del controlador

2.2.8.1 Controlador de acción proporcional (P)

La señal de accionamiento es proporcional a la señal de error del sistema, o sea, si la señal de error es grande, el valor de la variable regulada es grande y al revés (Figura 39). El controlador simplemente amplifica la señal de error.

Su función de transferencia se reduce a una variable real, denominada K_p , relacionada de la forma siguiente

$$y(t) = K_p e(t)$$

Donde $y(t)$ es la señal de salida del regulador y $e(t)$ la señal de entrada al regulador o error. De forma Laplaciana:

$$Y(s) = K_p E(s)$$

Donde $Y(s)$ es la salida, $E(s)$ el error a entrada de regulador y K_p será la ganancia del bloque de control. Esta ganancia debe ser bien escogida ya que si es demasiado grande producirá grandes cambios a ligeras desviaciones y al revés (Figura 40).

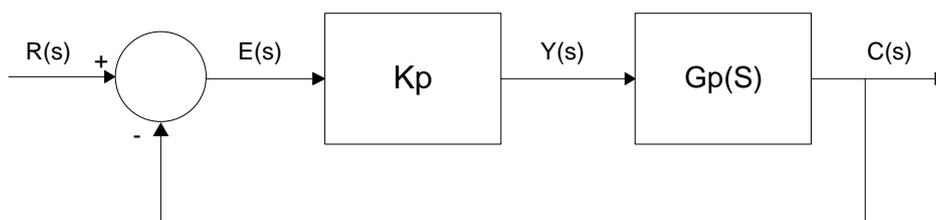


Figura 39. Diagrama de un controlador P

Los parámetros para definir un controlador, a partir de su respuesta serán:

$$y = K_p E + K'(\%)$$

$$y = \frac{100}{BP} E + 50(\%)$$

$$E = (M - PC)\%$$

Donde:

- Banda proporcional (BP). Porcentaje que debería variar la entrada al controlador para que altere el 100% de la variable de salida
- K' es el valor de salida que proporciona el controlador cuando el error es del 0% (normalmente se aplica 50%)
- K_p es la ganancia proporcional ya definida
- y . Salida en %
- M es la medición
- PC es el punto de consigna

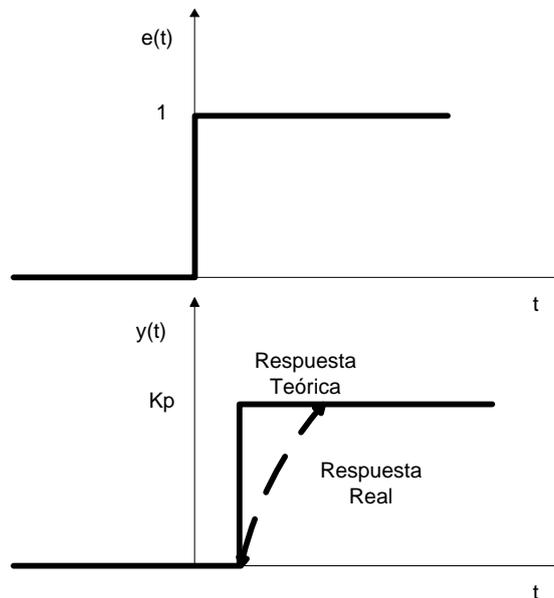


Figura 40. Respuesta de un controlador P a una señal tipo escalón unitario

Como resultado de la estricta relación entre la señal de error y la variable regulada, estos controladores siempre tienen un remanente de la señal de error que no queda compensada (señal de Offset), por lo que este tipo de controlador es válido actualmente para reducidas aplicaciones

2.2.8.2 Controlador de acción integral (I)

En este tipo de controlador, la señal de salida del mismo varía en función de la desviación (ídem que el controlador P), pero además, en función del tiempo en que se mantiene la misma (Figura 41). El tipo de salida de este regulador es:

$$y(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

Donde $y(t)$ es la señal de salida del controlador, $e(t)$ el error de entrada o diferencia entre la medición y el punto de consigna (PC)

En formato de Laplace, transformando la función integral:

$$Y(s) = K_i \frac{E(s)}{s}$$

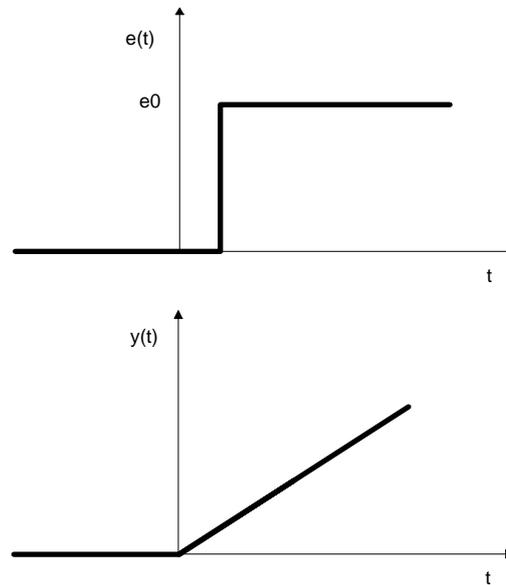


Figura 41. Respuesta de un controlador I a una señal tipo escalón

2.2.8.3 Controlador de acción proporcional e integral (PI)

Actúa de forma combinativa con los efectos del controlador P e I. La acción proporcional es la primera en actuar y lo hace de forma instantánea, mientras que la función integral actúa durante un intervalo de tiempo (Figura 42). Se evita, gracias a la acción integral, la desviación permanente.

Responde a la ecuación:

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt$$

También se puede expresar de la forma

$$y(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Donde K_p y T_i son parámetros ajustables del sistema. A T_i se le llama tiempo integral o tiempo de duplicación y controla la acción integral del sistema y K_p controla las dos funciones.

En formato laplaciano se expresa como:

$$Y(s) = K_p E(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Como ejemplo se considera un brazo robot con este tipo de controlador. Al desplazarse el brazo, la función proporcional lo acercará muy rápidamente más o menos cerca de su destino, y la función integral lo acercará con precisión al destino prefijado.

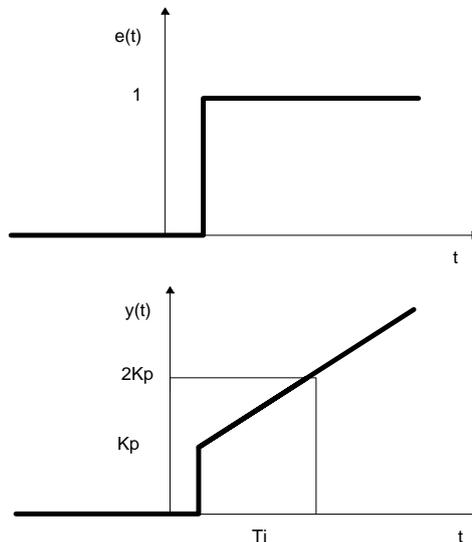


Figura 42. Respuesta de un controlador PI a una señal tipo escalón

2.2.8.4 Controlador de acción proporcional y derivativa (PD)

La salida de este tipo de controlador responde a la siguiente ecuación:

$$y(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

También se puede expresar como:

$$y(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde K_p y T_d son parámetros ajustables del sistema. A T_d se le llama tiempo derivativo o de adelanto y es función de la velocidad en que compensa el controlador un cambio en la variable regulada, comparado con un controlador P (Figura 43). K_p controla ambas acciones.

En el dominio de Laplace tenemos:

$$Y(s) = K_p E(s)(1 + T_d s)$$

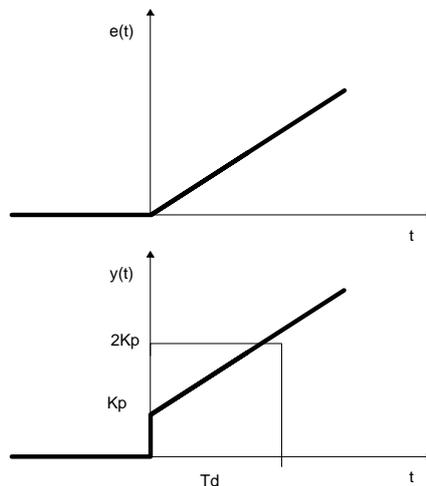


Figura 43. Respuesta de un controlador PD a una señal tipo rampa

Este tipo de controlador se usa cuando la señal de error es variante en el tiempo, ya que el control derivativo no ejerce ningún efecto sobre una señal tipo escalón. Como se puede apreciar en la Figura 43, la respuesta del propio controlador se anticipa a la señal de error, por ello T_d es llamado tiempo de adelanto. Se usan en sistemas que deben actuar de forma muy rápida. Es un control poco usado en la práctica, ya que no puede compensar completamente las desviaciones remanentes del sistema y puede llevar al sistema a una inestabilidad en la regulación.

2.2.8.5 Controlador de acción proporcional, integral y derivativa (PID)

Es uno de los sistemas de control más utilizados en regulación automática. Aprovecha las características de los tres controladores anteriores. Si el error varía lentamente, predomina la acción proporcional y derivativa, y si por el contrario, lo hace muy rápidamente, predomina la acción derivativa (Figura 44). Las desventajas son que el bucle de regulación es más difícil de ajustar y más propenso a oscilar. Una de las ventajas es que tiene una respuesta muy rápida y una compensación de la señal de error en caso de cambios o perturbaciones (Furroy, 2003).

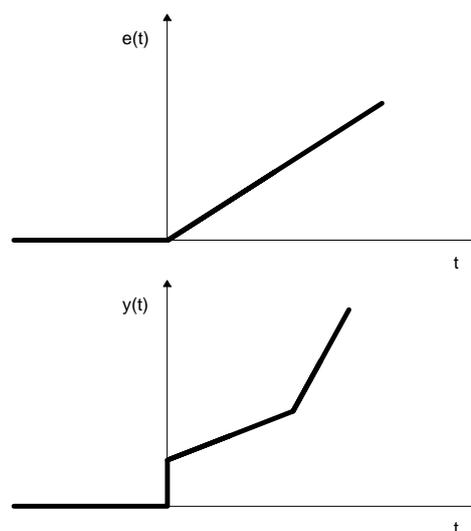


Figura 44. Respuesta de un controlador PID a una señal tipo rampa

La función de salida de determina por:

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

También se puede expresar como:

$$y(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde como ya se ha visto K_p , T_i y T_d son parámetros del sistema ajustables, que se relacionan:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_p = K_p T_d$$

En Laplace:

$$Y(s) = K_p E(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Los controladores PID son ampliamente utilizados en la industria. Para su configuración hay varias posibilidades. Se describirán dos de las formas de hacerlo más comunes hoy en día

2.2.8.6 Configuración de un controlador PID según Ziegler y Nichols

Es uno de los primeros enfoques en la configuración PID (Ziegler y Nichols, 1942) y actualmente no es el enfoque más usado por algunos problemas que presenta. Muchos procesos industriales presentan una función de transferencia con un comportamiento sobreamortiguado regular, descrito con la función:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + T_s s} e^{-T_d s}$$

Donde K_p es la ganancia, T_s una constante de tiempo y T_d el dead-time del controlador. Se usa una aplicación en que el controlador está en primer lugar y es usado como un controlador proporcional puro, cuya ganancia aumenta hasta que se su bucle de control se convierte en oscilante puro (Unbehauen, 1997). Se mide su ganancia de retroalimentación K_{crit} y la duración de un periodo. Posteriormente sus parámetros se fijan de acuerdo con la Tabla 20.

Controlador	K_c	T_i	T_d
P	$0,5K_{crit}$	-	-
PI	$0,45K_{crit}$	$0,85T_{crit}$	-
PID	$0,6K_{crit}$	$0,5T_{crit}$	$0,12T_{crit}$

Tabla 20. Configuraciones de un controlador según Ziegler and Nichols (Ziegler y Nichols, 1942)

2.2.8.7 Configuración de un controlador PID según Dead-Beat

Un controlador Dead-Beat está basado en los métodos de Ragazzini (Schulz, 2002), donde se asume que la función de transferencia del bucle cerrado $G_w(z)$ es igual a la respuesta deseada $F_w(z)$. Según la siguiente ecuación:

$$F_w(z) = G(z) = \frac{D(z)H_0G(z)}{1 + D(z)H_0G(z)}$$

Donde se deduce que

$$D(z) = \frac{1}{H_0G(z)} \frac{F_w(z)}{1 - F_w(z)}$$

Por ejemplo, es posible suponer como respuesta al comando deseado que la salida del controlador debe converger exponencialmente hacia el nuevo valor deseado. En el controlador Dead-Beat se supondrá que todos los polos de la función de transferencia están en origen en el plano z , ya que:

$$F_w(z) = z^{-d} \frac{K_0 z^{q-1} + \dots + K_{q-1} z + k_q}{z^q} = z^{q-1} (K_0 + K_1 z^{-1} + \dots + K_q z^{-q})$$

Lo que conduce a $e(t)=0$ después de un cierto tiempo

$$K_0 + K_1 z^{-1} + \dots + K_q z^{-q} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{b_0 + b_1 + \dots + b_n} = \frac{B(z)}{B(1)}$$

Se obtiene una señal de entrada estable (Schulz, 2002). Por tanto, el controlador Dead-Beat

$$D(z) = \frac{A(z)}{B(1) - z^{-d} B(z)}$$

Podrá calcularse mediante un numerador conocido y un denominador polinomial referenciado al sistema dinámico. Esto garantiza que se alcance el valor deseado después de un número finito de pasos (Deventer et al., 2004)

2.3 INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y SISTEMAS EXPERTOS

Es conocido el relevante papel de las redes bayesianas en el marco de los sistemas expertos y por tanto en el de la Inteligencia Artificial. En este capítulo se intenta exponer el estado del arte de este tipo de redes capaces de manejar incertidumbre en los sistemas expertos. Su importancia radicará también en el papel que juegan en el conocimiento de las bases de datos, en la relación probabilística de las variables que se implican en un proceso. Estas redes son un modelo que describirá las relaciones de dependencia e independencia entre las variables asociadas. Las redes bayesianas se aplican en un gran número de casos de la vida real, en proyectos de ingeniería, pero también en neurolingüística, medicina, y muchos otros, gracias a su versatilidad. Éste apartado se centrará en la estructura relacional de las redes bayesianas y como a partir de un conjunto de variables independientes o explicativas, se explicará una variable dependiente (o a explicar).

También se hará un breve resumen de las definiciones de los sistemas de inteligencia artificial y los sistemas expertos para poner el trabajo en antecedentes.

2.3.1 Inteligencia artificial (IA)

La inteligencia artificial se puede definir de múltiples formas. Usualmente se acepta como definición la que dice que es la parte de la ciencia que se ocupa del diseño de sistemas inteligentes, o más bien, de sistemas de computación inteligentes.

Hay definiciones (Bellman, 1978) que rezan que la IA es la automatización de actividades que se vinculan a procesos de pensamiento humano, actividades como la toma de decisiones, resolución de problemas, aprendizaje, etc.

Se entiende por inteligencia:

- La comprensión del lenguaje
- El aprendizaje
- El razonamiento
- La resolución de problemas

Lo que permitirá (Krishnamoorthy y Ming-Chien Shan, 2000):

- Responder a las situaciones planteadas de forma flexible
- Dar sentido a mensajes ambiguos o contradictorios
- Reconocer la importancia relativa de los diferentes componentes de una situación
- Encontrar similitudes entre las situaciones a pesar de las diferencias entre ellos
- Establecer distinciones entre las situaciones pesar de las semejanzas que pueden vincularlos

La IA se centra en el desarrollo de sistemas de computadora para simular los procesos de resolución de problemas y replicar la forma en que funciona el cerebro humano.

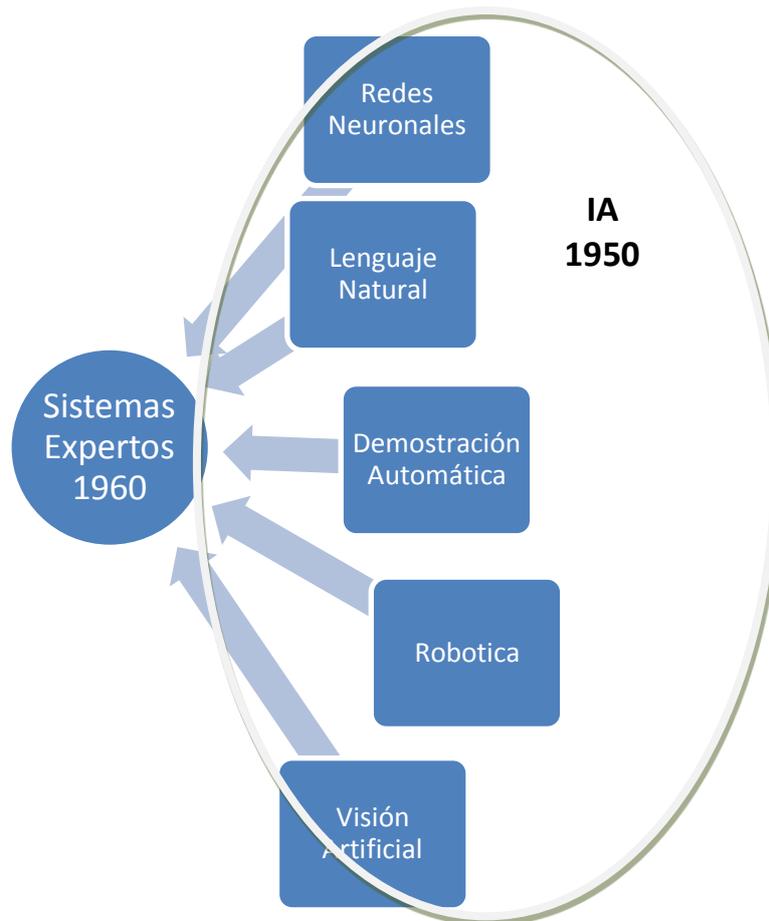


Figura 45. Relación entre Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos

A continuación se muestra la evolución de ésta área y su desarrollo:

1943-1956 Estudios centrados en Redes Neuronales. Demostración de Teoremas y Ajedrez. Circuito booleano para modelar el cerebro (Mc Culloch y Pitts, 1943). La "Inteligencia computacional" de Turing. Primeros programas de IA, incluido el testador de programas de Samuel, la Teoría Logista de Newell y Simon (Newell y Simon, 1950) y el Motor Geométrico de Gelernter. Shaw dirigió los primeros experimentos de programación. Creación de los primeros algoritmos para jugar al ajedrez (Shanon, 1950).

1952-1969 Creación de sistemas que resuelvan cualquier problema. Avances limitados por los recursos computacionales. Conferencia de Dartmouth: se adopta el término "Inteligencia Artificial" (1956). Algoritmo completo de Robinson para razonamiento lógico (Robinson, 1965). La IA descubre la complejidad computacional. La investigación en redes neuronales casi desaparece. McCarthy desarrolla LISP.

1966-1974 Algoritmos genéticos. Se aplica la complejidad computacional a la IA. Problemas en la representación del conocimiento.

1969-1979 Primeros desarrollos de sistemas basados en conocimiento. DENDRAL (Feigenbaum y Buchanan, 1978) y MYCIN. Principios de las redes neuronales artificiales RNA (Minsky, 1972) (Pérez y Martín, 2003).

1980-1988 Las empresas se interesan por la IA. Control industrial y robótico. Auge de los sistemas de IA en la industria

1988-1993 Crisis de los Sistemas expertos en industria: "El invierno de la IA"

1985-1995 Las redes neuronales vuelven a popularizarse. Resolución de problemas del mundo real. Sistemas especializados que cooperan. UNIX

1988-1995 Aplicación de la probabilidad en los sistemas expertos. Redes bayesianas: ALife, GAs, soft computing.

2003-... Se retoma la idea de la IA como "Agente Global", o sea, una forma conveniente y poderosa de describir una compleja entidad de software, que es capaz de actuar con cierto grado de autonomía, para cumplir tareas en representación de las personas. A diferencia de los objetos (que son definidos por métodos y atributos), un agente es definido por su propio comportamiento (Russell y Norvig, 2004).

Newell y Simon propusieron la hipótesis de *Sistema de símbolos físicos* en 1972, que constituye el corazón de todos los el trabajo de investigación y desarrollo que se lleva a cabo en el campo de la IA. Se compone de una definición de un símbolo estructura y luego un planteamiento de la hipótesis, los cuales se indican a continuación.

"Un *Sistema de símbolos físicos* consiste en un conjunto de entidades llamadas símbolos, que son patrones físicos que existen como componentes de otro tipo de entidad llamada *expresión* (o estructura simbólica). Así, un sistema se compone de un número de casos o símbolos relacionados de alguna manera física (por ejemplo, estar uno al lado del otro). En cualquier instante de tiempo que el sistema contendrá una correlación de estas estructuras simbólicas. Además de estas estructuras, el sistema también contiene un conjunto de procesos que operan sobre expresiones como: creación, modificación, reproducción y destrucción. Un sistema de símbolos físicos es una máquina que produce a través del tiempo una evolución de las estructuras de símbolos. Este sistema existe en un mundo de los objetos más amplio que sus expresiones simbólicas" (Newell y Simon, 1972).

2.3.2 Sistemas Expertos

Un Sistema Experto es un sistema informático que simula a los expertos humanos en un área específica dada. Hay múltiples definiciones:

Según Feigenbaum (Feigenbaum, 1982), un sistema experto es un software inteligente de ordenador que usa la inferencia para solucionar problemas complejos que requieren cierta pericia humana para su resolución correcta. Los hechos y heurísticas son la base del conocimiento de un sistema experto.

En otra definición, Nikopoulos describe un sistema experto como un sistema que usa todo el conocimiento conseguido mediante razonamiento y heurísticas con el fin de solucionar problemas intratables en el mundo real por su complejidad, de una forma razonablemente fiable (Nikopoulos et al., 1997)

Cada tipo de Sistema Experto constituye una herramienta o técnica que sólo se puede utilizar para las tareas específicas para las cuales estuvo diseñado. Los sistemas expertos son ideales para tareas que implican un razonamiento basado en la heurística y el conocimiento experto del dominio que se aborda. Muchos tipos de clasificación, diagnóstico y seguimiento de las tareas se pueden abordar de manera

eficiente utilizando sistemas basados en reglas de inferencia. Estas técnicas también pueden utilizarse para desarrollar algoritmos iniciales a la planificación de diseños de resolución de problemas.

Un Sistema Experto debería ser capaz de:

- Procesar información y memorizarla
- Aprender de las experiencias y razonar
- Tener un alto grado de comunicación tanto con su propio sistema como con otros sistemas externos
- Tomar decisiones

Los primeros éxitos de la IA en el campo de los Sistemas Expertos fueron: DENDRAL (Feigenbaum y Buchanan, 1978), PROSPECTOR (Duda, Hart y Nilsson, 1973), MYCIN (Shortliffe, 1976). Su uso es multidisciplinar y se encuentra en educación, medicina, meteorología, ciencias sociales, etc.

Los sistemas expertos trabajan con programas de cálculo complejos mediante ordenadores. Hay una gran variedad de software que trabajan de forma experta (Jackson, 1999). Los sistemas están basados en reglas, que utilizan la relación si-luego para representar el razonamiento del proceso experto (si los datos cumplen ciertas condiciones que se especifican, a continuación se toman las medidas adecuadas y las acciones pertinentes). Un número respetable de científicos cognitivos creen que una parte importante del razonamiento humano puede ser expresado por este tipo de normas (Andersen y Petersen, 1993)

Otros enfoques incluyen redes semánticas o asociativas (Quillian, 1968), marcos (Minsky, 1975) y redes neuronales, actualmente muy populares en una amplia variedad de campos. De éstos, los sistemas complementarios basados en reglas y la red neuronal, tienen un apartado predominante. Por ejemplo se han aplicado las RN en análisis de aplicaciones industriales como la mecanización por láser (Ciurana et al., 2009).

Según la naturaleza del sistema se puede clasificarlos como

- Deterministas: el estado actual depende del estado anterior y las acciones sobre el entorno. Son los Sistemas Expertos basados en reglas, que usan un mecanismo de razonamiento lógico para sacar sus conclusiones.

- Estocásticos: sistemas en los que existe incertidumbre, por lo que necesita ser tratada. Son los Sistemas Expertos Probabilísticos y la estrategia de razonamiento usada es el razonamiento probabilístico.

Una de las dificultades al resolver problemas usando los enfoques de sistemas expertos es la dificultad en la obtención de conocimientos de los expertos en relación al problema abordado. La posibilidad de generalizar a partir de la resolución de problemas específicos está siendo reconocida como una característica deseable de los sistemas automatizados. Es en este contexto que las Redes Neuronales Artificiales (RNA) han ganado importancia. Se está trabajando en la integración de técnicas basadas en el conocimiento en las redes neuronales.

En las primeras etapas, los Sistemas Expertos se programaban bajo un enfoque simbólico, usando la lógica para mostrar la deducción, el razonamiento y el conocimiento humano. Cuando los dominios son más complejos, las técnicas de

inferencia de la lógica clásica no son válidas para trabajar con los problemas planteados.

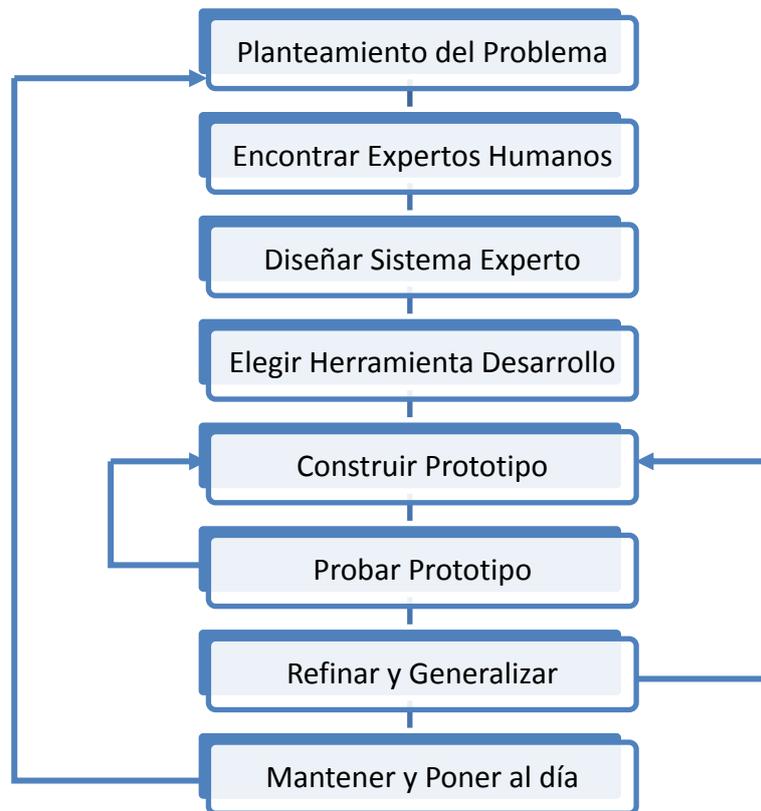


Figura 46. Fases del desarrollo de un Sistema Experto (Weiss y Kulikowski, 1984)

Los sistemas expertos deben trabajar con reglas secuenciales, pero también paralelas (Figura 46). Este último comportamiento, característica típica del lenguaje difuso, rompe con la forma de crear de los programadores y también con la forma clásica de los algoritmos, ya que el sistema aprende con cada experiencia. Esto obliga a los programadores a aprender los fundamentos y teorías de los sistemas difusos: conjuntos difusos, lógica difusa y números difusos.

Como ejemplo de sistema experto, se puede nombrar al sistema Génesis (Sakthivel y Kalyanaraman, 1992), el cual es un prototipo de sistema para la planificación y el diseño de estructuras de acero industrial. Propuesto por Sakthivel y Kalyanaraman, es capaz de realizar las actividades de ingeniería que consisten en la planificación estructural, el diseño preliminar, el análisis y el diseño detallado de edificios de acero de una sola planta industrial en un sistema integrado, de manera que, a partir de cualquier disposición de la planta arbitraria y limitaciones espaciales especificado por el usuario, GÉNESIS desarrolla la disposición geométrica de los sistemas estructurales en los diferentes niveles de abstracción y diseños típicos de los componentes estructurales. En el Génesis, el espacio geométrico contiene objetos que describen la geometría de los atributos de cada componente estructural o el sistema en un edificio industrial.

2.3.2.1 La incertidumbre en los Sistemas Expertos

La incertidumbre se define como la falta de certidumbre o certeza. El contrario del conocimiento seguro y claro de algo. Aparece en las siguientes situaciones:

- Cuando los hechos o datos pueden no ser conocidos con exactitud (por ej., un paciente puede no estar seguro de haber tenido la tensión alta la noche pasada). Esto implica subjetividad, imprecisión, errores, datos ausentes, etc.

- Cuando el conocimiento no es determinista. Por ej., las relaciones entre enfermedades y síntomas; un mismo conjunto de síntomas puede estar asociado a varias enfermedades.

En la vida real aparecen muchos problemas con incertidumbre y puede manifestarse como información incompleta, vaga o con imprecisiones. Se han desarrollado varias metodologías para tratar este tipo de problemas. La mayoría, cuantitativas, se basan en esquemas en los que se introducen medias numéricas que la cuantifican. Entre las diferentes teorías se pueden mencionar las siguientes: el enfoque Bayesiano, que se basa en el uso de probabilidades condicionales y el teorema de Bayes; factores de certeza, que utiliza reglas con un factor de confianza asociado; teoría de la evidencia de Dempster-Shafer, lógica difusa y las redes bayesianas (Nikolopoulos et al., 1997).

En los primeros Sistemas Expertos, se usaba la probabilidad para tratar la incertidumbre, pero al encontrarse algunos problemas por el uso incorrecto de algunas hipótesis, se desechó.

Con la aparición de redes probabilísticas (Redes Bayesianas y Cadenas de Markov, principalmente) el uso de la probabilidad para el tratamiento de la incertidumbre ha vuelto a ser aceptado y hoy en día es la forma más usada.

En ésta tesis se emplean como sistema experto las RB debido a que proveen una visualización gráfica intuitiva del conocimiento y a que interesa evaluar las relaciones *causa-efecto* y no tanto las reglas *si-entonces* que aportarían otros sistemas expertos como la lógica difusa o los factores de certeza. Los sistemas difusos se usan más a menudo en sistemas de control (incerteza y grados de pertenencia) y las RB son más aplicables a sistemas de diagnóstico (imprecisión y probabilidad), objetivo de ésta tesis.

2.3.2.2 La inferencia en los Sistemas Expertos

Los Sistemas Expertos están basados en reglas. Una regla es una afirmación lógica que relaciona información conocida con otra que puede ser inferida o se sabe que es cierta. Una regla se compone de la premisa y la consecuencia

- Premisa: condiciones para que la regla se ejecute.
- Consecuencia: conclusiones deducidas.

El motor de Inferencia es esencial en los Sistemas Expertos. La Inferencia permite deducir nuevo conocimiento a partir de conocimiento que se sabe que es cierto. Usa la Base de Hechos y el Conocimiento Base para obtener nuevas conclusiones o hechos.

Existen diferentes reglas de inferencia (Modus Ponens, Modus Tollens) y diferentes estrategias de inferencia (Encadenamiento de reglas hacia delante y hacia atrás).

- Modus Ponens: Se examina la premisa y si es cierta, la conclusión pasa a formar parte del conocimiento.
- Modus Tollens: Se examina la conclusión y si es falsa, se concluye que la premisa también es falsa.

2.3.2.3 Sistemas Expertos y razonamiento difuso

Hay dos tipos generales de sistemas expertos difusos: los de control difuso y los de razonamiento difuso. Aunque ambos hacen uso de los conjuntos borrosos, difieren cualitativamente en la metodología.

El primer control de estos sistemas que tuvo éxito fue logrado por Mamdani (Mamdani, 1976), elaborando un sistema difuso para el control de una planta de cemento. Desde entonces, estos sistemas han sido ampliamente aceptados en todo el mundo

Un sistema de control difuso simplemente acepta números como entrada, traduce los números en términos lingüísticos como lento, medio y rápido (a ello se le llama fuzzificación en lógica fuzzy). Posteriormente las reglas asignan los términos en otros términos lingüísticos según la función de transferencia que describen los parámetros de salida. Por último estos términos de salida se traducen a un número de salida (a este proceso se le llama defuzzificación) (Russell y Norving, 2004).

2.3.2.4 Aplicación de los Sistemas Expertos

Ejemplos de campos de aplicación de Sistemas Expertos son las siguientes (Marín-Llanes et al., 2005):

- Meteorología.
- Transacciones bancarias.
- Control de tráfico en una ciudad.
- Diagnóstico médico.
- Enfoque automático de imágenes fotográficas.
- Diagnóstico de problemas en automóviles.
- Interfaces de ordenador en lenguaje hablado.
- Gestión distribuida de redes de ordenador.
- Urbanismo y Gestión del territorio.
- Administración local.
- Navegación terrestre y marítima.

2.3.2.5 Clasificación

El problema de clasificación es uno de los campos más investigados en el campo del aprendizaje automático. El sistema experto debe clasificar constantemente sus experiencias. Por ejemplo, una avería en una línea de producción, obliga a los ingenieros de planta a encontrar los efectos del mismo para poder realmente encontrar las causas del problema.

La tarea de clasificar consiste en etiquetar casos a partir de un conjunto de características (Friedman y Goldszmidt, 1996). Se ha enfrentado a esta tarea con diferentes enfoques, entre ellos se pueden mencionar los árboles de decisión, redes neuronales y Naïve-Bayes (Friedman y Goldszmidt, 1996). Este último se considera bastante efectivo, en el sentido de que es competitivo con el estado del arte de los clasificadores; a pesar de la hipótesis tan fuerte que hace al considerar que los

atributos son condicionalmente independientes dada la variable clase. Esta restricción hace que en ciertos casos Naïve-Bayes tenga un desempeño ligeramente menor, sobre todo en aquellos casos en los que los atributos están bastante correlacionados (Friedman y Goldszmidt, 1996). Se ha demostrado que algunas redes bayesianas son tan buenas clasificadoras como aquellas generadas con algoritmos como el PC (Spirtes et al. 1993), K2 (Cooper & Herskovits, 1992) y Bayes (Cruz-Ramírez et al., 2001).

El sistema integrado de Ingeniería (IES) (Shaktivel y Kalyanaraman, 1993) es un una aplicación mediante Sistemas Expertos propuesto por Shaktivel y Kalyanaraman, que aborda las complejas demandas que plantean los procesos de ingeniería de la computación en el campo de la clasificación del conocimiento. Las características más destacadas de IES son los siguientes:

- La capacidad de manejo de una gran diversidad de parámetros numéricos, gráficos y simbólicos
- Capacidad para utilizar una variedad de conocimientos, métodos y procedimientos de manera eficiente
- Gestión de un gran volumen de datos estáticos y dinámicos de manera uniforme y eficiente
- Representación de la solución en los distintos niveles de abstracción a partir del nivel más general al nivel más específico
- La capacidad para manejar los problemas que abarcan toda la gama del espectro de derivación de la formación
- Modelado y control del proceso de cooperación de la ingeniería.

2.3.3 Redes Bayesianas

Una red bayesiana es un modelo gráfico de las relaciones probabilísticas entre un conjunto de variables. A lo largo de las últimas décadas las redes bayesianas se han convertido en una representación muy usada para codificar el conocimiento experto incierto en sistemas expertos (Heckerman et al., 1995). Más recientemente, los investigadores han desarrollado métodos para el aprendizaje de redes bayesianas a partir de datos. Las técnicas que se han desarrollado son nuevas y todavía están en evolución, pero han demostrado ser notablemente eficientes para algunos problemas de análisis de datos (Lozano et al., 2002).

En este apartado se tratará sobre las redes bayesianas en general y las diferentes técnicas bayesianas para la extracción y la codificación del conocimiento a partir de datos (Sacerdoti, 2010). Existen numerosas herramientas para el análisis de datos, incluyendo entre ellas los árboles de decisión y las redes neuronales artificiales, y hay muchas técnicas para el análisis de datos tales como la estimación de densidad, clasificación y agrupamiento, pero las redes bayesianas se adaptarán mejor al objeto de esta tesis por varias razones:

- Pueden manejar fácilmente conjuntos de datos incompletos
- Permiten aprender sobre las relaciones causales de aprendizaje (entendiendo el dominio de un problema y el conocimiento de las relaciones causales)
- Las redes bayesianas en conjunción con técnicas estadísticas bayesianas facilitan la combinación de conocimiento del dominio y los datos del problema abordado

- Facilitan un enfoque eficiente de ajuste de los datos. Se verá que no hay necesidad de mantener todos de los datos disponibles.

Una red bayesiana es un grafo acíclico dirigido (GAD) –las uniones entre los nodos tienen definidas una dirección– en el que los nodos representan variables aleatorias y las flechas representan influencias causales; el que un nodo sea padre de otro implica que es causa directa del mismo; son utilizadas para proveer: una forma compacta de representar el conocimiento y métodos flexibles de razonamiento. El obtener una red bayesiana a partir de datos es un proceso de aprendizaje que se divide en dos etapas: el aprendizaje estructural y el aprendizaje paramétrico (Felgaer, 2005).

Las redes bayesianas o probabilísticas se fundamentan en la teoría de la probabilidad y combinan la potencia del teorema de Bayes con la expresividad semántica de los grafos dirigidos; las mismas permiten representar un modelo causal por medio de una representación gráfica de las independencias / dependencias entre las variables que forman parte del dominio de aplicación (Pearl, 1988). Constituyen un método para la representación de conocimiento incierto, que permite establecer razonamientos basados en la teoría de la probabilidad. Cada nodo de una red bayesiana está asociado a una v.a., que puede tomar valores dentro de un rango discreto o continuo. Dichos valores son exclusivos y exhaustivos para cada variable de la red (Feigenbaum, 1993).

Se puede interpretar a una red bayesiana de dos formas:

1. Distribución de probabilidad: Representa la distribución de la probabilidad conjunta de las variables representadas en una red.
2. Base de reglas: Cada arco representa un conjunto de reglas que asocian a las variables involucradas. Las probabilidades cuantifican cada una de estas reglas.

Las redes Bayesianas juegan diversos papeles importantes dentro de la Inteligencia Artificial. Uno de ellos es su actuación dentro del manejo de incertidumbre en los sistemas expertos. Otro papel importante lo tienen en lo que se conoce como descubrimiento de conocimiento en bases de datos; las redes Bayesianas permiten encontrar, de una manera consistente, relaciones probabilistas entre variables. Siendo entonces las redes Bayesianas modelos que describen las relaciones (relaciones de independencia/dependencia) entre variables, estas pueden ser aplicadas a casi cualquier tipo de problema. Éste trabajo se centrará en aquellos problemas en los que existe cierta estructura en las relaciones de las variables. En este tipo de problemas hay una variable dependiente (a explicar) y un conjunto de variables independientes o explicativas). La hipótesis subyacente es que el comportamiento de la variable dependiente puede ser explicado como resultado de la acción de las variables dependientes (Feigenbaum, 1993).

La definición de red bayesiana podría ser: un grafo acíclico dirigido en el que los nodos representan variables aleatorias que pueden ser continuas o discretas (Felgaer, 2005); en las siguientes definiciones se utilizarán letras mayúsculas para denotar los nodos (X) y las correspondientes letras minúsculas para designar sus posibles estados (x_i).

Los estados que puede tener una variable deben cumplir con dos propiedades:

1. Ser mutuamente excluyentes, es decir, un nodo sólo puede tener un estado en un instante concreto

2. Ser un conjunto exhaustivo, es decir, fuera de este conjunto, un nodo no puede tener ningún valor

Definiciones terminológicas en el campo de las redes bayesianas:

- Nodo:

Un nodo X es una variable aleatoria que tomará varios estados x_i . La probabilidad de que el nodo X este en el estado x se denotará como:

$$P(x) = P(X = x)$$

- Arco de unión

Es la unión entre dos nodos y será la representación de la dependencia entre dos variables del modelo. Un arco queda definido por un par ordenado de nodos (X, Y) .

- Nodo padre

El nodo X es un padre del nodo Y , si existe un arco (X, Y) entre los dos nodos.

- Nodo hijo

El nodo Y es un hijo del nodo X , si existe un arco (X, Y) entre los dos nodos.

- Probabilidad conjunta

Dado un conjunto de variables $\{X, Y, \dots, Z\}$, la probabilidad conjunta da el valor de la probabilidad de la combinación de estados posibles de cada variable $P(x_i, y_j, \dots, z_k) \forall i, j, \dots, k$, de manera que:

$$\sum_{i,j,\dots,k} P(x_i, y_j, \dots, z_k) = 1$$

- Probabilidad condicional

Dadas dos variables X e Y , la probabilidad de que ocurra y_j dado que ocurrió el evento x_i será la probabilidad condicional de Y dado X y se representa como $P(y_j | x_i)$.

La definimos como:

$$P(y_j | x_i) = \frac{P(y_j, x_i)}{P(x_i)}, \quad \text{dado } P(x_i) > 0$$

Cambiando el orden de las variables:

$$P(x_i | y_j) = \frac{P(x_i, y_j)}{P(y_j)}$$

Si se relacionan las dos expresiones anteriores:

$$P(y_j | x_i) = \frac{P(y_j) P(x_i | y_j)}{P(x_i)}$$

Asimismo se puede obtener el conocido Teorema de Bayes, el cual comúnmente se expresa de la forma:

$$P(y_j | x_i) = \frac{P(y_j) P(x_i | y_j)}{\sum_j P(x_i | y_j) P(y_j)}$$

El denominador de esta expresión conocido como el Teorema de la Probabilidad Total.

Las tablas de probabilidad condicional serán el conjunto de valores de las probabilidades de los hijos dados las probabilidades de sus padres

- Independencia entre variables

Se puede expresar la independencia entre dos variables X e Y una no tiene que ver con la otra variable. Por definición se cumple que Y es independiente de X si y sólo si:

$$P(y_j, x_i) = P(y_j) P(x_i) \forall i, j$$

Por tanto:

$$P(y_j, x_i) = P(y_j) \forall i, j$$

$$P(x_i, y_j) = P(x_i) \forall i, j$$

- Observación de las variables

Es la comprobación del estado nodal ($X = x$) a partir de un dato que se obtiene de fuera del modelo

- Evidencia

Es el conjunto de las observaciones en un instante determinado $e = \{X = x, Y = y, \dots, Z = z\}$.

- Probabilidad a priori o inicial

Es la probabilidad de una variable presupuesta, sin tener la experiencia acumulada de los casos.

- Probabilidad a posteriori

Es la probabilidad de una variable que queda condicionada a la existencia de una determinada evidencia; la probabilidad a posteriori de X cuando se dispone de la evidencia e se calcula como $P(X | e)$.

Una crítica común de la definición de probabilidad bayesiana es que las probabilidades parecen arbitrarias, que los grados de creencia parecen no cumplir las reglas de la probabilidad y de que es difícil evaluar a qué escala deben medirse las probabilidades de un proceso. Estas cuestiones se han estudiado muy ampliamente. Muchos investigadores han concluido que los grados de creencia son adecuados para evaluar un conjunto de propiedades de un sistema (Ramsey, 1993), (Cox, 1972) y (De Finetti, 1970)

2.3.3.1 Representación del conocimiento mediante redes bayesianas

Las redes bayesianas representan relaciones de causa y efecto en el dominio del conocimiento a través de una estructura gráfica y las tablas de probabilidad condicional entre los nodos, por lo tanto, el conocimiento que representa la red está compuesto por los siguientes elementos (Díez, 1994):

- Un conjunto de nodos $\{X_i\}$ que significaran las variables de la red

Cada variable tendrá un conjunto exhaustivo de estados $\{x_i\}$ mutuamente excluyentes.

- Un conjunto de arcos (X_i, X_j) entre los nodos, los cuales tienen relación causa-efecto. Gráficamente se reflejarán todas estas relaciones

- Su tabla de probabilidad condicional asociada a cada nodo X_i indicando la probabilidad de sus estados observando las probabilidades y estados de sus padres. Los nodos sin padre se representarán por las probabilidades estimadas inicialmente o presupuestas

Para establecer la red bayesiana se pueden realizar los siguientes pasos:

- Asignar un nodo a cada variable (X_i) y se representa que otros nodos son causa directa de éste; a ese conjunto de nodos causas del nodo X_i se lo describe como el conjunto π_{X_i} y se lo llamará nodos padres de X_i .

- Se relacionan los padres y los hijos mediante flechas que parten de los primeros hacia los segundos

- A cada variable X_i se asigna una matriz $P(x_i | \pi_{X_i})$ que estima la probabilidad condicional de un caso $X_i = x_i$ dada la combinación π_{X_i} .

Ahora se tiene ya la estructura de la red bayesiana. Se especificarán las tablas de probabilidad condicional y se podrá comprobar la probabilidad de una variable determinada dependiendo del estado del resto de las variables de la red bayesiana. Para ello se debe calcular la probabilidad a posteriori de cada variable condicionada a la evidencia; estas probabilidades a posteriori se podrán obtener de forma inmediata a partir de la probabilidad conjunta de todas las variables $P(x_1, x_2, \dots, x_i)$. Este proceso se vera simplificado al aplicar la propiedad de independencia condicional que permite obtener la probabilidad conjunta a partir de las probabilidades condicionales de cada nodo en función de sus padres (Castillo, 1997).

Para ilustrar el proceso de construcción de una red bayesiana se empezará por la determinación de las variables para realizar una elección de las variables del sistema.

Esta tarea inicial de definición y relación no siempre es sencilla. Como parte de esta tarea se deberán identificar correctamente los objetivos de los modelos de predicción en varios frentes de la forma siguiente (Hommersom y Lucas, 2010):

- Comparar la explicación frente a la exploración
- Identificar las posibles observaciones que puedan ser relevantes para el problema
- Determinar qué subconjuntos de esas observaciones son importantes para modelar la red y cuales no
- Organizar las observaciones en las variables que son mutuamente excluyentes y sus colectivamente exhaustivos

Éstos problemas no son exclusivos de las redes bayesianas, sino que son comunes a la mayoría de los enfoques. Aunque no hay soluciones definitivas, se han realizado algunos enfoques interesantes al respecto (Tukey, 1977) y (Howard y Matheson, 1983). La determinación de la relación causal de las redes bayesianas es en gran parte responsable de su gran aplicación en los sistemas expertos (Heckerman et al., 1995).

A partir de las probabilidades inicialmente establecidas, la red bayesiana proporcionará las probabilidades de cada uno de sus nodos, después de cada inferencia realizada en otros nodos y añadirá los datos obtenidos por esta experiencia al nuevo cálculo probabilístico (Schiaffino, 2011). Se estudiarán como actúan este tipo de cálculos en los siguientes apartados.

2.3.3.2 Independencia condicional

Según lo que se ha descrito, la topología o estructura de una red bayesiana no sólo representa explícitamente dependencias probabilísticas entre variables, sino que también describe implícitamente las independencias condicionales existentes entre ellas. La siguiente definición muestra las condiciones que deben darse para que dos variables sean condicionalmente independientes (Felgaer, 2005):

Una variable X es condicionalmente independiente de otra Y dada una tercer variable Z , si el conocer Z hace que X e Y sean independientes. Es decir, si conozco Z , Y no tiene influencia en X . Esto es: $P(X | Y, Z) = P(X | Z)$

Por tanto, cada variable (o nodo) será independiente de todos los nodos que no sean sus hijos, y una vez conocidos los nodos padres.

Esto se verifica en los casos en que los nodos X e Y están separados por Z en el grafo. Esto implica que todos los caminos para ir de X a Y pasarán necesariamente por Z (Pearl, 1988).

En la red bayesiana de la Figura 47, $\{E\}$ es condicionalmente independiente de $\{A, C, D, F, G\}$ dado $\{B\}$; con lo cual $P(E | A, B, C, D, F, G) = P(E | B)$; se conoce a este efecto como *Separación-D*.

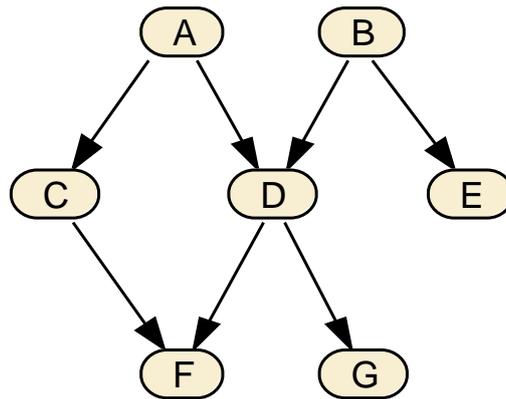


Figura 47. Ejemplo de red bayesiana

Corresponden a relaciones de independencia en la distribución de probabilidad, todas las relaciones de independencia condicional que se representan en la figura

Si se enumeran los nodos de una red bayesiana, X_1, X_2, \dots, X_{i-1} , de manera que se cumpla que cada nodo aparece en la secuencia antes que cualquiera de sus hijos, dicha red cumplirá la siguiente independencia:

Cada variable X_i es condicionalmente independiente de las variables de un conjunto $\{X_1, X_2, \dots, X_{i-1}\}$ si se conoce el valor de sus padres

Por tanto:

Conociendo los padres de X_i , este se hace independiente del resto de sus predecesores.

La regla de la cadena describe que la probabilidad conjunta puede ser calculada como (Pearl, 1986):

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{t=1}^n P(x_t | x_1, x_2, \dots, x_{t-1})$$

Mediante el uso de las tablas de probabilidad condicional y las independencias, se obtiene la tabla de probabilidad conjunta de todas las variables a partir de sus tablas condicionales y en función de sus nodos padres. Si se aplica la regla de la cadena y la independencia condicional:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{t=1}^n P(x_t | x_1, x_2, \dots, x_{t-1}) = \prod_{t=1}^n P(x_t | \pi_{x_t})$$

Para calcular la probabilidad conjunta una vez se conoce la estructura de la red (padres e hijos) y sus probabilidades condicionales, se usará el siguiente ejemplo de red bayesiana:

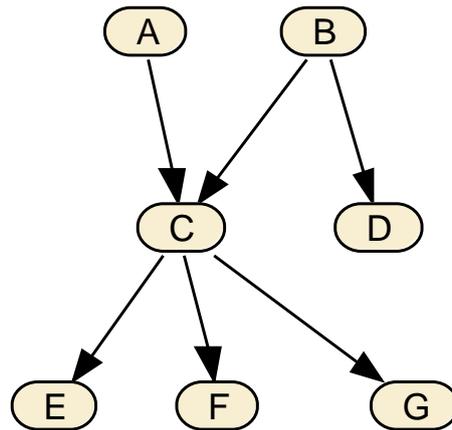


Figura 48. Aplicación de la Regla de la Cadena en una red bayesiana

Un conjunto de nodos $\{a, b, c, d, e, f, g\}$ está representado en la red bayesiana de la Figura 48; si se elige una ordenación de los nodos de manera que se cumpla que todo nodo aparece antes que sus hijos se obtiene, por ejemplo, el conjunto $\{a, b, c, d, e, f, g\}$; aplicando la regla de la cadena y que cada nodo es independiente de sus predecesores conocidos sus padres se obtiene que:

$$P(a, b, c, d, e, f, g) = P(a) P(b | a) P(c | a, b) P(d | a, b, c) P(e | a, b, c, d) P(f | a, b, c, d, e) P(g | a, b, c, d, e, f)$$

$$P(a, b, c, d, e, f, g) = P(a) P(b) P(c | a, b) P(d | b) P(e | c) P(f | c) P(g | c)$$

Por tanto se determinará la probabilidad conjunta de todos los nodos de la red bayesiana a partir de la probabilidad conjunta de cada nodo dependiendo de sus padres. Mediante esta expresión se observa como se ha simplificado el cálculo de la red, usando menos parámetros y haciendo más ligero el algoritmo de cálculo de probabilidades.

2.3.4 La Inferencia en redes bayesianas

Una vez se ha construido una red bayesiana, a partir de datos de conocimientos previos, experiencia o una combinación de los dos, se deseará determinar las probabilidades de interés a partir del modelo creado. Esta probabilidad de las variables no se observa directamente en el modelo y por lo tanto para conocerla se deberá calcularla. En general, el cálculo de una probabilidad buscada, dado un modelo, se conoce como inferencia probabilística (IP). (Leonard y Hsu, 1999). En este apartado se describirá la IP en redes bayesianas (Wang y Webb, 2002).

Debido a que una red bayesiana para la variable X , determina una distribución de probabilidad conjunta de X podemos, en principio, usar la red bayesiana para calcular cualquier probabilidad de interés. El proceso consistirá en calcular las probabilidades a posteriori $P(X | Y = y_i)$ de un conjunto de variables X después de obtener un conjunto de observaciones $Y = y_i$ (donde Y es la lista de variables observadas e y_i es la lista correspondiente a los valores observados) (Kuehl, 2001). Como ya expusimos antes, se usará el teorema de Bayes

$$P(y_j | x_i) = \frac{P(y_j) P(x_i | y_j)}{P(x_i)} = \frac{P(y_j) P(x_i | y_j)}{\sum_j P(x_i | y_j) P(y_j)}$$

Las probabilidades a posteriori, $P(X | Y = y_j)$, se obtendrán a partir de la probabilidad marginal $P(X | Y)$ que a su vez se obtiene de la probabilidad conjunta $P(x_1, x_2, \dots, x_i)$, de la suma de todas las variables que no pertenezcan al conjunto $X \cup Y$. Este tipo de cálculo no es práctico, ya que si se trabaja con redes con un número de nodos elevado, los cálculos aumentarían de forma muy considerable. Para afrontar esto, en la práctica se usan diferentes algoritmos para poder simplificar estos cálculos.

2.3.4.1 Algoritmos de propagación

Varios investigadores han desarrollado algoritmos de probabilidad de inferencia bayesiana para redes de variables discretas que se aprovechan de la independencia condicional mediante visiones diferentes. Por ejemplo Howard, Matheson, Olmsted y Shachter, desarrollaron un algoritmo que invierte los arcos en la estructura de la red hasta que la respuesta a la consulta realizada se puede visualizar directamente desde el gráfico (Howard y Matheson, 1983), (Olmsted, 1983) y (Shachter, 1988). En este algoritmo cada inversión arco corresponde a una aplicación del teorema de Bayes. Pearl desarrolló un esquema de transmisión de mensajes que actualiza las distribuciones de probabilidad para cada nodo en una red bayesiana, en respuesta a las observaciones de una o más variables (Pearl, 1986). Lauritzen y Spiegelhalter crearon un algoritmo que primero transforma la red bayesiana en un árbol donde cada nodo del árbol corresponde a un subconjunto de las variables de X . El algoritmo aprovecha varias propiedades matemáticas de este árbol para realizar inferencia probabilística (Lauritzen y Spiegelhalter, 1988).

Por otra parte se ha desarrollado un algoritmo de inferencia que simplifica sumas y productos simbólicamente (D'Ambrosio, 1999). El algoritmo más comúnmente utilizado para las variables discretas son los de Lauritzen y Spiegelhalter (Lauritzen y Spiegelhalter, 1988) (Jensen et al., 1990) y (Dawid, 1992). Desarrollando métodos que utilizan las afirmaciones de independencia condicional para simplificar los métodos de inferencia.

Con esta visión, se ve que hay dos tipos de métodos de cálculo de redes bayesianas: los exactos, poco prácticos, pero que calculan las probabilidades condicionales de toda la red y su inferencia, y los aproximados, con múltiples acepciones y estudios que facilitan de una forma práctica y resolutiva obtener resultados aceptablemente correctos de los cálculos de estas redes, mediante técnicas iterativas (Kuehl, 2001)

Se pueden encontrar y adaptar los diferentes tipos de algoritmos dependiendo del tipo de red bayesiana con la que tratemos. Se pueden agrupar dichas redes en tres tipos:

- Árboles
- Poliárboles
- Redes multiconectadas

2.3.4.2 Propagación de redes bayesianas en forma de árboles

Cada nodo corresponderá a una variable discreta $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ mediante su matriz condicional $P(B | A) = P(B_j | A_i)$. Si definimos una evidencia mediante E

(habiendo previamente instanciando varias variables) la probabilidad posterior de cualquier variable B es, por el teorema de Bayes (Morales, 2006):

$$P (B_i | E) = \frac{P (E | B_i) P (B_i)}{P (E)}$$

Esquemáticamente, el nodo B separa la red en dos subárboles y por tanto habrá dos tipos de evidencia:

- E- : Datos en el árbol que cuya raíz es B.
- E+ : Datos en el resto del árbol.

Aplicando Bayes

$$P (B_i | E) = \frac{P (E-, E+) P (B_i)}{P (E)}$$

Como los dos son independientes, se aplica nuevamente Bayes:

$$P (B_i | E) = \alpha P (B_i | E+) P (B_i | E-)$$

α se referirá a una constante de normalización

Esto separa la evidencia para actualizar la probabilidad de B. Como dicho nodo no tiene padres, y no se requiere de la probabilidad a priori, obtenemos:

$$P (A_i | E+) = P (A_i)$$

La expresión anterior se puede simplificar mediante la introducción de los términos:

$$\lambda (B_i) = P (E- | B_i)$$

$$\pi (B_i) = P (B_i | E+)$$

Entonces:

$$P (B_i | E) = \alpha \pi (B_i) \lambda (B_i)$$

Debido a que por la propiedad de independencia condicional, dado el padre, los hijos son condicionalmente independientes:

$$\lambda (B_i) = \prod_k P (E_k - | B_i) = \prod_k \lambda_k (B_i)$$

E_k corresponde a la evidencia que proviene del hijo k de B denotado por S_k .

Si se condicionan los términos de la ecuación a todos los valores que puede tener cada hijo:

$$\lambda(B_i) = \prod_k \left[\sum_j P(E_k - |B_i, S_j^k) P(S_j^k | B_i) \right]$$

Como B es condicionalmente independiente de la evidencia bajo cada hijo dado este y usando la anterior fórmula de λ :

$$\lambda(B_i) = \prod_k \left[\sum_j P(S_j^k | B_i) \lambda(S_j^k) \right]$$

Actuando de la misma forma se obtiene una expresión de π ; primero se la condiciona sobre todos los posibles valores del padre:

$$\pi(B_i) = \sum_j P(B_i | E+, A_j) P(A_j | E+)$$

Como hay independencia condicional, se elimina E+ del primer término. El segundo término representa la probabilidad posterior de A sin contar la evidencia del subárbol de B, por lo que se puede expresar usando la ecuación para $P(B_j | E)$ y la descomposición de λ .

$$\pi(B_i) = \sum_j P(B_i | A) \left[\alpha \pi(A_j) \prod_k \lambda_k(A_j) \right]$$

donde k incluye a todos los nodos hijos de A excepto B.

Resolviendo estas ecuaciones se obtiene un algoritmo apto para propagar las probabilidades donde cada nodo guarda los valores de los vectores π y λ así como las matrices de probabilidad P; se propagaran por un mecanismo de traspaso de mensajes en donde cada nodo envía los mensajes correspondientes a su padre e hijos:

Mensaje al padre (nodo B a su padre A):

$$\lambda_b(A_i) = \sum_j P(B_j | A_i) \lambda(B_j)$$

Mensaje a los hijos (nodo B a su hijo Sk):

$$\pi_k(B_i) = \alpha \pi(B_j) \prod_{l \neq k} \lambda_l(B_j)$$

Si se instancian varios nodos, se enviarán los mensajes correspondientes a sus hijos y a sus padres hasta llegar a los nodos primeros y últimos. El mensaje, por tanto, se propagará en un sólo paso y usará más o menos tiempo en propagarse dependiendo del tamaño de la red. Se pueden hacer pruebas de instanciación de variables y comprobando los efectos que ello produce en los nodos no instanciados de la red.

2.3.4.3 Propagación de redes bayesianas en forma de poliárboles

Un poliárbol es una red bayesiana en la que un nodo puede tener varios padres pero si sólo hay una trayectoria posible para cada nodo. El algoritmo de propagación es muy similar al de árboles; la principal diferencia es que se requiere de la probabilidad conjunta de cada nodo dado todos sus padres (Morales, 2009):

$$P(B_i | A_1, A_2, \dots, A_n)$$

Usando el mismo razonamiento que en los árboles, se puede obtener la probabilidad de un nodo cualquiera B en términos de sus padres e hijos:

$$P(B_i | E) = \alpha P(B_i | E_{1+}, \dots, E_{n+}) P(E_1 - | B_i) \dots P(E_m - | B_i)$$

A partir de esta ecuación se obtiene una forma de propagación similar al de árboles sin aumentar el orden de complejidad.

2.3.4.4 Propagación en redes multiconectadas (SCG)

Éste tipo de red no conecta a padres y a hijos de forma sencilla como los casos anteriores, sino que lo hace mediante múltiples trayectorias de conexión entre los nodos. No se pueden aplicar las mismas metodologías a estos procesos, pero se resuelven mediante diferentes técnicas que se comentan a continuación:

2.3.4.5 Condicionamiento

Si se instancia una variable, se bloquean todas las trayectorias de propagación entre esta variable y un grupo determinado de nodos. Este método consiste en realizar el proceso de propagación de la evidencia para cada valor posible de dichas variables y luego promediar las probabilidades ponderadas.

2.3.4.6 Simulación estocástica

Se asignan valores aleatorios a las variables no instanciadas, se calcula la distribución de probabilidad de las mismas y se obtienen valores de cada variable mediante una muestra; se repite el procedimiento para obtener un número adecuado de muestras y en base al número de veces que aparece cada valor resultante se determina la probabilidad de dicha variable.

2.3.4.7 Agrupamiento

El método de agrupamiento consiste en transformar la estructura de la red para obtener un árbol agrupando sus nodos usando la teoría de grafos (Lauritzen, 1988).

El origen es el gráfico de red original y a continuación:

- Se trianguliza el grafo agregando los arcos adicionales necesarios.

- Se identifican todos los conjuntos de nodos que están totalmente conectados
- Se ordenan estos conjuntos de nodos de forma que todos los nodos comunes estén en un sólo conjunto padre anterior
- Se construye un nuevo grafo en que cada conjunto de nodos sea un nuevo nodo formando un árbol de grupos de nodos.

Una vez se obtiene la probabilidad conjunta de cada grupo de nodos, trabajando con un zoom más elevado, donde cada nodo es un conjunto de nodos, y se resuelven las probabilidades como si se tratara de una estructura simple, se pueden resolver las distribuciones de probabilidad para cada nodo individual.

En general, la propagación en una red probabilística (RP) con una estructura compleja es un problema de complejidad NP-duro (Cooper, 1990); En muchas aplicaciones reales, la red bayesiana obtenida no es tan compleja y los tiempos de propagación son razonables.

2.3.5 Métodos para cálculo de redes bayesianas con datos desconocidos

A continuación se verán algunos métodos para el aprendizaje acerca de los parámetros de la red cuando la muestra aleatoria es incompleta, es decir, que en algunos casos no se tienen datos de las variables. Se deben separar de este análisis los casos en que faltan algunos datos de las variables de forma independiente de su estado o de otra forma hay variables ocultas o desconocidas en la red bayesianas. Para este último caso, se han realizado estudios (Rubin, 1978), (Robins, 1986) y (Pearl, 1995), pero no se abordaran en este resumen.

Para el caso de que en una red bayesiana hay un caso incompleto simple, Spiegelhalter y Lauritzen resolvieron cada caso como una distribución de Dirichlet (Spiegelhalter y Lauritzen, 1990).

Otro tipo de aproximaciones se basan en los métodos Monte-Carlo o de muestreo. Estos métodos son muy precisos siempre que se disponga de la potencia computacional necesaria para resolver los cálculos que se presentan. Hay múltiples metodologías. Uno de los más comunes es el de Gibbs (Geman y Geman, 1984), que permite que partiendo de una distribución de variables discretas y su distribución conjunta, se pueda plantear la función de probabilidad de estas variables discretas, obteniendo las probabilidades esperadas en caso de falta de datos en parte de las mismas. Dependiendo de la complejidad de la red, este método, puede ser intratable.

Otros métodos son el de la Aproximación Gaussiana (Kass et al., 1988), los Mapas y las aproximaciones ML con el algoritmo EM (Russell et al, 1995) y (Thiesson, 1995).

2.3.6 Ejemplo de propagación de una red bayesiana

Para mostrar como trabaja el algoritmo de paso de mensajes en una red simple y como transmite las probabilidades entre la red, se verá un ejemplo de una red simple, donde se seguirá paso a paso el mecanismo de esta transmisión.

Una de las redes clásicas usadas para este fin es la llamada “The dog problem” o “The dog barking problem” (Figura 49). La red la presentó Eugene Charniak (Charniak, 1991).

Para aplicar este ejemplo se usará el software para cálculo de redes bayesianas Netica (López, 2012) (Rodríguez y Dolado, 2007).

Las relaciones o arcos entre los nodos se muestran en la Figura 49:

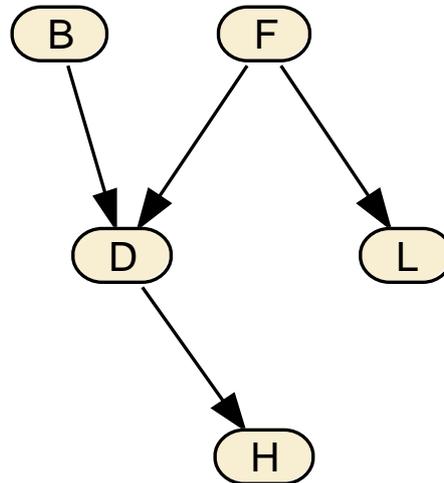


Figura 49. “The dog barking problem” (Charniak, 1991)

Las variables involucradas son discretas y binarias. En la Tabla 21 se muestran todas las probabilidades a priori del problema.

	P(f)	P(b)	P(l f)	P(l lf)	P(d f,b)	P(d f,lb)	P(d lf,b)	P(d lf,lb)	P(h d)	P(h ld)
Si	0,15	0,01	0,60	0,05	0,99	0,90	0,97	0,30	0,70	0,01
No	0,85	0,99	0,40	0,95	0,01	0,10	0,03	0,70	0,30	0,99

Tabla 21. Probabilidades condicionales de la red “The dog barking problem”

2.3.6.1 Propagación inicial

- Todos los mensajes λ y π de cada nodo son inicializados en 1.
- Se dispone inicialmente de las probabilidades de los nodos según la Tabla 21.
- A continuación se propagan los mensajes π para evaluar las probabilidades condicionales de los nodos hijos a partir de las probabilidades de los nodos padre.

Para propagar el mensaje π se hace de la siguiente forma:

Si se tiene en cuenta un padre: mensaje π a c en el estado i con el padre p .

$$\sum_j P(c_i|p_j) P(p_j)$$

Si se tienen en cuenta múltiples padres: mensaje π a c en el estado i con los padres a, \dots, n .

$$\sum_{j,k,\dots,z} P(c_i|a_j, b_k, \dots, n_z) P(a_j) P(b_k) \dots P(n_z)$$

- La probabilidad obtenida para cada estado de los nodos se obtiene realizando la suma normalizada de la transmisión de los mensajes π .

Por ejemplo la probabilidad inicial de que el nodo l se encuentre en el estado i :

$$P(l_i) = \text{Standard} (P(l_i|f_1)P(f_1) + P(l_i|f_2)P(f_2))$$

La probabilidad inicial de que el nodo d se encuentre en el estado i :

$$P(d_i) = \text{Standard} (P(d_i|f_1, b_1)P(f_1)P(b_1) + P(d_i|f_1, b_2)P(f_1)P(b_2) + P(d_i|f_2, b_1)P(f_2)P(b_1) + P(d_i|f_2, b_2)P(f_2)P(b_2))$$

- Se repite el proceso, partiendo del tercer paso, propagando el mensaje por toda la red y actuando de la misma forma hasta que se hayan calculado todos los nodos.

Se ha concluido la primera propagación de probabilidades. Esto se muestra en la Figura 50. El sistema ha calculado las probabilidades iniciales. A partir de este momento, el sistema está a la espera para recibir más observaciones basadas en nuevas experiencias para posteriormente recalculer otra vez las probabilidades de la red bayesiana.

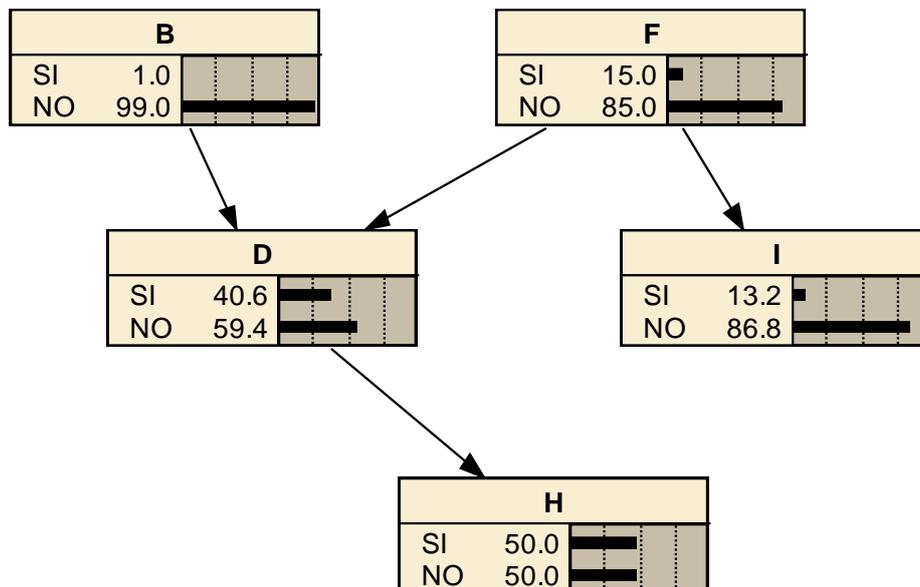


Figura 50. Propagación de probabilidades inicial para "The dog barking problem"

2.3.6.2 Instanciación de nodos

Si se instancia un nodo a un valor de los dos posibles

- A la evidencia λ para dicho estado se le asigna el valor 1.
- A la probabilidad para dicho estado se le asigna el valor 1.
- A la probabilidad para cada uno de los estados restantes se les asigna el valor 0.
- Los mensajes λ y π se transmiten hacia sus padres e hijos respectivamente.

Los mensajes π son los mismos que los representados en la primera transmisión.

Se realizarán los mismos cálculos que anteriormente. Para el mensaje λ tenemos:

Para un padre: mensaje λ a π en el estado k desde el hijo c .

$$\sum_j P(c_j|pk) \lambda(c_j)$$

Se aprecia que $\lambda(c_j)$ corresponde a la evidencia λ para el estado j del nodo c . En los casos en que sean nodos instanciados, el valor será igual a 1 para el estado instanciado y 0 para el resto de ellos.

Si se consideran múltiples padres: mensaje λ a π en el estado k desde el hijo c .

$$\sum_j P(pk) \sum_j P(c_j|pk, a_1, \dots, n_i) \lambda(c_j)$$

Se observa que $P(pk)$ corresponde a la evidencia p para el estado k del nodo p .

En los casos en que sean nodos instanciados, el valor será igual a 1 para el estado instanciado y 0 para el resto de ellos.

- La propagación de los mensajes continúa como se indica en el paso cuarto de manera recursiva respetando las siguientes reglas:

2.3.6.3 Propagación de mensajes

- A través de nodos instanciados no pueden propagarse los mensajes p .

Por ejemplo se tiene la red con el nodo D instanciado (Figura 51) y luego se instancia el nodo B. Esta última instanciación propagará un mensaje π hacia el nodo D pero no hacia H (ni a ninguno de sus otros hijos, si los tuviera).

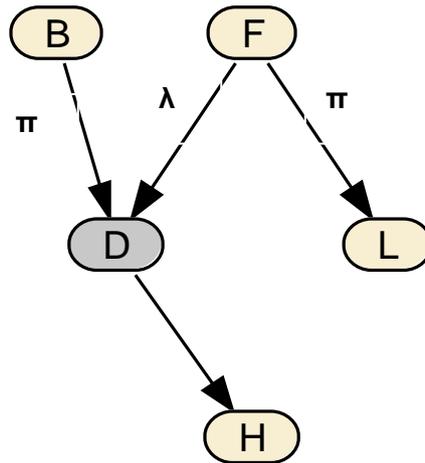


Figura 51. “The dog barking problem” – Instanciación del nodo D

- No se bloquean por parte de los nodos instanciados los mensajes λ como se vio antes. Sin embargo son bloqueados por nodos convergentes, los cuales no tienen la evidencia λ . Por ejemplo si el nodo D o un hijo de este no estuvieran instanciados entonces no se enviaría ningún mensaje λ al nodo F (Figura 52).

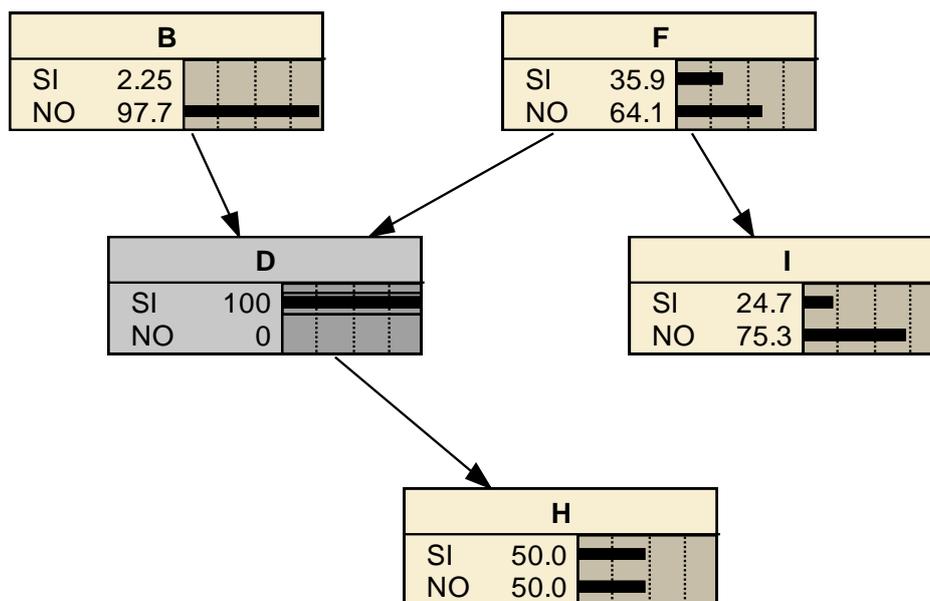


Figura 52. “The dog barking problem” Recálculo de probabilidades después de la instanciación del nodo D

2.3.6.4 Propagación completa de mensajes

- Los mensajes p son propagados por la red para volver a calcular las probabilidades. (Figura 53).

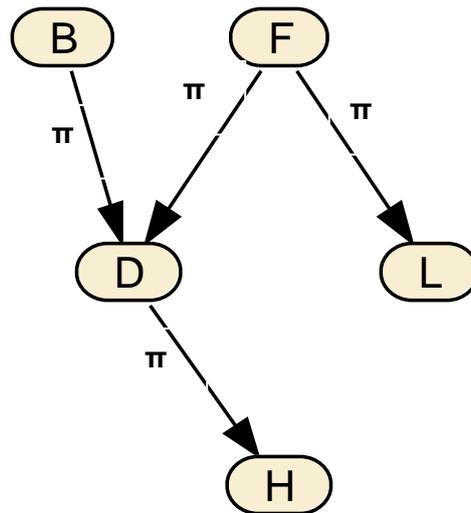


Figura 53. “The dog barking problem” – Estado inicial

No se envían mensajes λ hacia los nodos D, B o F debido a que se encuentran bloqueados por la falta de evidencia λ .

- Se instancia como siguiente ejemplo el nodo h (Figura 54).

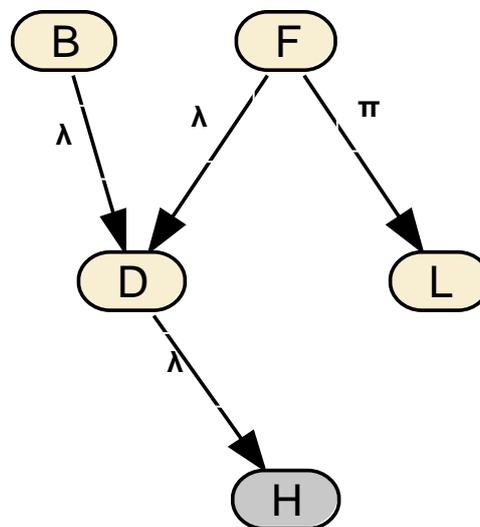


Figura 54. “The dog barking problem” – Instanciación del nodo h

- Se enviará un mensaje λ del nodo H al nodo D.
- Se recalculará la probabilidad a posteriori del nodo D a partir de la nueva evidencia.
- Se envían mensaje a todas las relaciones del nodo D exceptuando, como en el caso anterior, el nodo H.

- Se recalculan las probabilidades de los nodos B y F.
 - El nodo F envía un mensaje π al nodo L pero el nodo D no es sensible a ello
 - Se recalcula la probabilidad del nodo L.
- En el siguiente paso se instancia el nodo F, manteniendo el H instanciado (Figura 55).
- El nodo F envía mensajes π a los nodos D y L.
 - Son recalculadas las probabilidades de los nodos D y L.
 - Debido a que el nodo D tiene evidencia λ (proviene del nodo H) se envía un mensaje λ hacia el nodo B como así también un mensaje π al nodo H.
 - El nodo H no se altera puesto que está instanciado.
 - Debido al mensaje recibido por parte del nodo D, el nodo B recalcula su probabilidad.

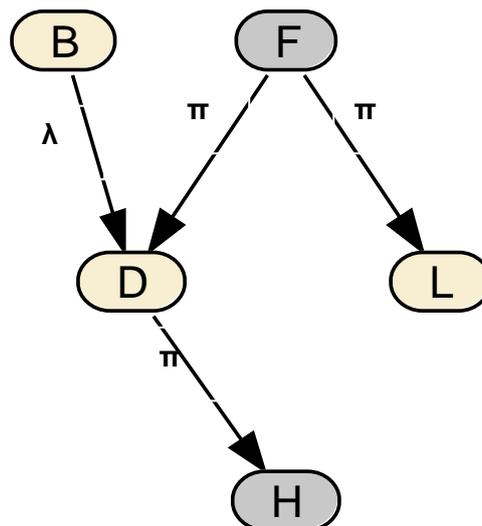


Figura 55. "The dog barking problem" – Instanciación de los nodos H y F

- Finalmente se instancia el nodo d (Figura 56).

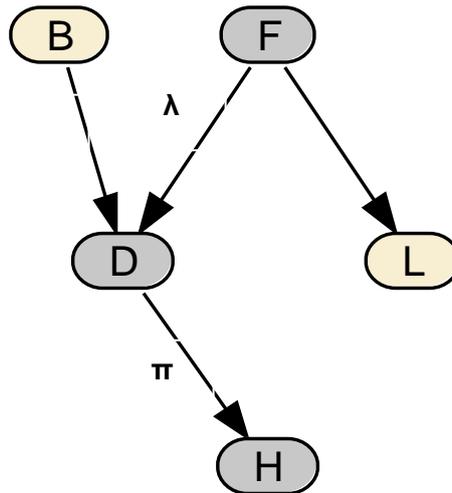


Figura 56. "The dog barking problem" – Instanciación de los nodos H, F y D

- Se envían mensajes λ a los nodos B y F mientras que el nodo H recibe un mensaje π .
- Los nodos F y H se mantienen sin modificaciones pero el nodo B recalcula su probabilidad.
- Dado que el nodo F se encuentra instanciado, éste no envía ningún mensaje π al nodo I (Figura 57).

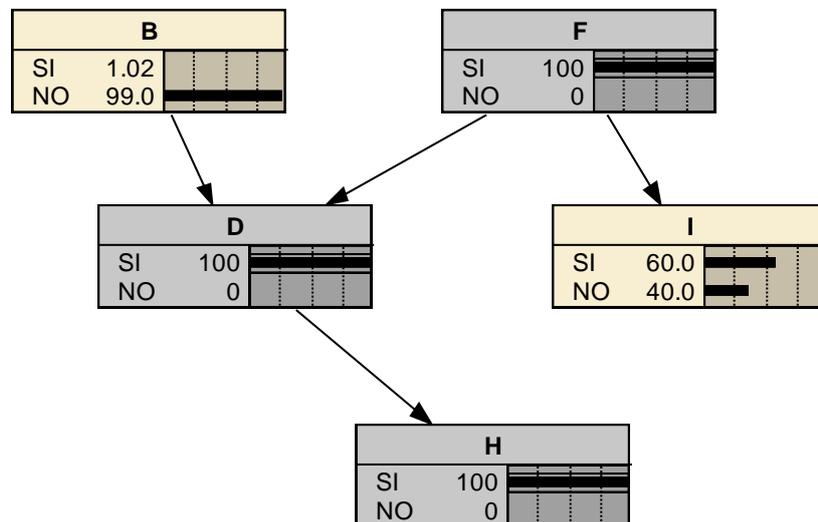


Figura 57. "The dog barking problem" Recálculo de probabilidades después de la instancia de los nodos F, D y H

2.3.7 Métodos de búsqueda

En éste apartado se examinan los métodos de búsqueda para la identificación de las estructuras de red optimizadas, usando algún criterio de clasificación. No es sencilla la resolución del problema de encontrar la mejor red del conjunto de todas las redes, en

las que cada nodo no tiene más que un número k de padres, para una aplicación concreta. Lamentablemente, para $k > 1$ el problema se convierte en NP-Duro, incluso cuando se usan restricciones mediante la distribución de Dirichlet (Chickering et al, 1995).

Los investigadores han utilizado para solucionar estos problemas, algoritmos de búsqueda heurística y los métodos de Monte-Carlo. Una propiedad que facilita la búsqueda es que estos métodos son más eficientes cuando la selección del modelo es *separable*, es decir: dada una estructura de red para el dominio X decimos que un criterio para que la estructura sea *separable* es que pueda representarse como un producto del criterio de la variable específica.

$$C(S^h, D) = \prod_{i=1}^n c(X_i, Pa_i, D_i)$$

Donde D_i son los datos restringidos a las variables X_i y Pa_i .

La mayoría de los métodos más comúnmente utilizados para la búsqueda de redes bayesianas hacen cambios sucesivos de los arcos en la red y emplean la separabilidad para evaluar la bondad de cada cambio. Los posibles cambios que se pueden hacer son fáciles de identificar. Para cualquier par de variables si hay un arco que los conecta, este arco puede ser invertido o eliminado. Si no hay un arco de conexión, se puede añadir uno en cualquier dirección.

Otro método encontrar la mejor red posible es el de *primera búsqueda* (Korf, 1993). En este enfoque se analizan las posibles estructuras de red de forma sistemática utilizando una medida heurística, que determina la mejor estructura de la misma. Chickering ha demostrado que para un tiempo de computación aceptable, produce modelos razonables (Chickering, 1996).

Existe una línea de investigación prometedora en aras de mejorar y simplificar estructuras de redes bayesianas complejas (Sprites y Meek, 1995).

2.3.8 Aprendizaje mediante Redes Bayesianas

En los apartados anteriores, se han tratado básicamente las redes bayesianas en el ámbito de su clasificación y modelos de regresión. Lo que hace especiales a las redes bayesianas en particular y a los sistemas expertos en general son su capacidad de aprendizaje. En realidad, esta capacidad es indispensable para formar parte del ámbito de la inteligencia artificial, ya que sin aprendizaje no existe la inteligencia (Simon, 1983). Los sistemas de aprendizaje son capaces de generar nuevo conocimiento y de ajustar el conocimiento existente.

Cuando se tiene un conjunto de datos y un conjunto de variables de proceso e intuitivamente no se tiene la capacidad de determinar el proceso causa-efecto, las redes bayesianas, junto a otras herramientas expertas, aportan una eficiente solución. Se ha demostrado que en procesos complejos las redes bayesianas no son más eficientes que otros sistemas como los árboles de decisión, pero que superan a éstos por su capacidad de aprender de los resultados y de la experiencia (Friedman, 1996).

Otras investigaciones comparan la precisión de las redes bayesianas y los árboles de decisión y confirman la ventaja de las redes bayesianas en el aprendizaje (Singh y Provan, 1995).

Cuando las variables de entrada producen que la variable de destino y los datos sean incompletos, conocer las dependencias entre las variables de entrada se convierte en un factor decisivo (Friedman, 1996).

Según Pearl, la función de aprendizaje de las redes bayesianas, permiten modelar la estructura de la red (aprendizaje estructural) y la relación de sus nodos para el ajuste (aprendizaje paramétrico) (Pearl, 1988).

2.3.8.1 Aprendizaje estructural

Para ser eficientes en este tipo de aprendizaje es fundamental conocer las relaciones de dependencia e independencia entre las variables de la red. Hay muchas técnicas, como ya se ha comentado, para la modelización de la red bayesiana. Dependiendo del tipo de red se podrán aplicar unas u otras metodologías. Se relacionará el aprendizaje estructural en tres tipos de redes (en árbol, en poliárbol y las redes multiconectadas (Tapia, 2007).

2.3.8.2 Aprendizaje estructural en árboles

Chow y Liu han desarrollado un método para aprendizaje estructural de árboles que se basa en un algoritmo donde se aproxima una distribución de probabilidad por un producto de probabilidades de segundo orden, correspondiente a un árbol (Chow y Liu, 1968). La probabilidad conjunta de n variables se puede representar como:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | X_{j(i)})$$

donde $X_{j(i)}$ es la causa o padre de X_i .

El objetivo es obtener la estructura en forma de árbol que se aproxime más y mejor a la distribución de la red actual. Con esta aproximación aparece un diferencial entre la distribución real, P y una distribución aproximada en árbol, P' , que se puede expresar cómo:

$$I(P, P') = \sum_x P(X) \log(P(X)/P'(X))$$

Por tanto, el objetivo será minimizar el error I . Para ello se define una diferencia en función de la información mutua entre pares de variables que se define como:

$$I(X_i, X_j) = \sum_x P(X_i, X_j) \log\left(\frac{P(X_i, X_j)}{P(X_i)P(X_j)}\right)$$

Chow demuestra que la diferencia de información es una función del negativo de la suma de las informaciones mutuas (pesos) de todos los pares de variables que constituyen el árbol, por lo que encontrar el árbol más próximo equivale a encontrar el árbol con mayor peso (Chow, 1968). Por tanto, el algoritmo de Chow para encontrar la red en forma de árbol óptima será el siguiente:

- Calcular la información mutua entre todos los pares de variables $(n(n-1)/2)$.
- Ordenar las informaciones mutuas de mayor a menor.
- Seleccionar la rama de mayor valor como árbol inicial.
- Agregar la siguiente rama mientras no forme un ciclo, si es así, desechar.
- Repetir el punto anterior hasta que se cubran todas las variables $(n-1$ ramas).

El algoritmo de Chow no define la dirección de los arcos. Esta dirección se puede realizar a criterio de la experiencia o de forma arbitraria.

2.3.8.3 Aprendizaje estructural en poliárboles

El algoritmo de Chow y Liu para árboles fue expandido por Rebane y Pearl para poliárboles; para ello parten de una estructura de red sin dirección en sus arcos y determinan estas direcciones utilizando pruebas de dependencia entre grupos de tres variables (Rebane y Pearl, 1989). Así se obtiene una red bayesiana en forma de poliárbol, en cuyo caso la probabilidad conjunta es:

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(X_i | X_{j1(i)}, X_{j2(i)}, \dots, X_{jm(i)})$$

donde $\{X_{j1(i)}, X_{j2(i)}, \dots, X_{jm(i)}\}$ es el conjunto de padres de la variable X_i .

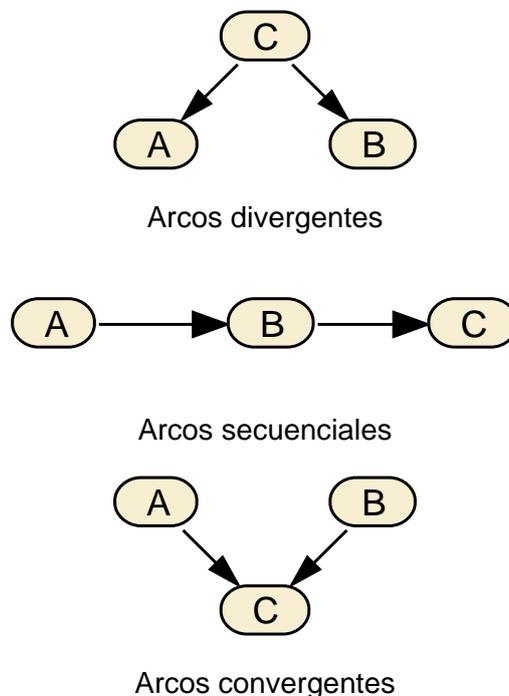


Figura 58. Tipo de conexión entre tres variables (Rebane y Pearl, 1989).

Rebane y Pearl prueban en su algoritmo todas las dependencias entre todos los grupos de tres variables en la estructura de red sin arcos. Se observan en la Figura 58 los tres tipos de relaciones de los arcos entre las tres variables (divergencia, secuencial y convergencia).

El algoritmo de Rebane y Pearl consiste en:

- Obtener el esqueleto utilizando el algoritmo de Chow y Liu.
- Recorrer la red hasta encontrar una tripleta de nodos que sean convergentes o multipadre
- A partir de un nodo multipadre determinar las direcciones de los arcos utilizando la prueba de tripletas hasta donde sea posible (base causal).
- Repetir segundo y tercer paso hasta que ya no se puedan descubrir más direcciones.
- Si quedan arcos sin direccionar utilizar criterios externos para obtener su dirección.

Dependiendo del tamaño y complejidad de la red puede suponer un trabajo de cálculo muy importante y es habitual usar reducciones empíricas en redes complejas.

2.3.8.4 Aprendizaje estructural en redes multiconectadas

El aprendizaje de una red multiconectada es el caso más complejo. El objetivo será el de optimizar la red intentando encontrar la estructura más simple posible, o sea, con el número mínimo de arcos. Como en el caso de los poliárboles, se parte del algoritmo de Chow y Liu para obtener un árbol inicial y se van agregando árboles hasta optimizar la red. Sucar y Pérez-Brito trabajaron en la solución de este tipo de aprendizaje estructural (Sucar y Pérez-Brito, 1995). Se puede establecer el siguiente algoritmo:

- Obtener una estructura de árbol inicial mediante el algoritmo de Chow-Liu.
- Hacer la variable hipótesis el nodo raíz y a partir de éste determinar la direccionalidad de los arcos.
- Producir un ordenamiento de los nodos $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ a partir de la raíz y siguiendo el árbol de acuerdo a la información mutua entre variables.
- Probar la capacidad predictiva del sistema:
 - (a) Si es satisfactoria finalizar la optimización
 - (b) Si no es satisfactorio, agregar un arco y volver a probar la capacidad predictiva del sistema. Seleccionar el arco de mayor información mutua basando su dirección en el ordenamiento anterior, de forma que su nodo inicial sea anterior al nodo final.

Como se ha visto anteriormente, la dirección de los arco no está definida de antemano y no hay una relación clara entre causa y efecto. Hay varias investigaciones en esta línea de trabajo para este tipo de redes multiconectadas.

En estos momentos hay varias técnicas que se usan en este tipo de aprendizaje de redes multiconectadas. Se basan en la verificación de la bondad del comportamiento de la estructura de la red respecto a los datos aportados de forma experimental y en la búsqueda de la mejor estructura posible mediante la visualización y análisis de un generador de estructuras que las compare entre si.

Existen varias formas de evaluar las redes multiconectadas, por ejemplo:

- Medida bayesiana: estima la probabilidad de la estructura dado los datos y se la trata de maximizar.
- Longitud de descripción mínima (MDL): estima la longitud en bits requerida para representar la probabilidad conjunta con una estructura modelo. En primer lugar se deberá representar la estructura y posteriormente representar el error que tiene la estructura respecto al modelo

Se ha demostrado que el sistema MDL presenta un mejor comportamiento que la medida bayesiana, ya que da como resultado estructuras más optimizadas.

Es importante usar el método, pero también la experiencia en la simplificación de las estructuras de una red bayesiana.

2.3.8.5 Aprendizaje paramétrico

Dada una estructura y las bases de datos, obtiene las probabilidades a priori y condicionales requeridas.

Uno de los principales trabajos en el campo del aprendizaje de redes bayesianas en el de Herkovits y Copper (Herskovits y Copper, 1991); el requisito principal para poder realizar la tarea de aprendizaje de redes bayesianas a partir de datos es disponer de bases de datos muy extensas en las que esté especificado el valor de cada variable en cada uno de los casos.

El aprendizaje en redes bayesianas a partir de bases de datos incompletas generalmente consiste en inferir de alguna manera los datos ausentes para completar la base de datos; investigaciones al respecto (Ramoni y Sebastiani, 1997) estiman los límites del conjunto de datos ausentes y obtienen un único punto de estimación que es modificado con diferentes pesos dependiendo del patrón que supuestamente siguen dichos datos; finalmente se construye una base de datos completa y se procede como se indicó anteriormente.

El aprendizaje paramétrico busca el estado inicial de una red bayesiana, eso es, las probabilidades a priori de todos los nodos de la red padres y las probabilidades condicionales de los nodos hijos. Si partimos de una red en forma de árbol, se pueden usar estas expresiones para encontrar sus probabilidades (Morales, 2010):

Previas:

$$P(A_i) = \frac{(a_i + 1)}{(s + 1)} ; i = k$$

$$P(A_i) = \frac{a_i}{(s + 1)} ; i \neq k$$

Probabilidades condicionales:

$$P (B_j | A_i) = \frac{(b_j + 1)}{(a_i + 1)} ; i = k \text{ y } j = l$$

$$P (B_j | A_i) = \frac{b_j}{(a_i + 1)} ; i = k \text{ y } j \neq l$$

$$P (B_j | A_i) = \frac{b_j}{a_i} ; i \neq k \text{ y } j \neq l$$

donde:

s corresponde al número de casos totales
i, j los índices de las variables,
k, l los índices de las variables observadas.

En las expresiones expuestas no se considera el factor incertidumbre en las probabilidades y éstas son puntuales. Otra visión es considerar las probabilidades como una función distribución de probabilidad continua. Normalmente se utiliza para el caso de variables binarias la distribución Beta y para variables mutievaluadas su generalización que es la distribución Dirichlet (Neapolitan, 1990)

2.3.8.6 Aprendizaje no supervisado mediante redes bayesianas

Ocurre que, en determinadas circunstancias, faltan datos de variables que presumimos importantes en el modelo. Se conocen como nodos no observables. Se estiman en relación a los nodos los que sí se tienen datos y esto permite tener estimaciones de su probabilidad. Se puede usar el siguiente algoritmo (Armagno, 2006):

- Instanciar todas las variables observables.
- Propagar su efecto y obtener las probabilidades posteriores de las no observables.
- Para las variables no observables, asumir el valor con probabilidad mayor como observado.
- Actualizar las probabilidades previas y condicionales de acuerdo a las formulas anteriores.
- Repetir los cuatro pasos para cada observación.

Existen a día de hoy otras técnicas para utilizar las redes bayesianas y aplicarlas en el aprendizaje no supervisado. Un ejemplo es el programa AutoClass (Cheeseman y Stutz, 1995) que realiza una agrupación de datos. El principio de AutoClass es suponer que hay una sola variable, oculta, que nunca se ha observado. Esta variable oculta es discreta y sus posibles estados corresponden a estados subyacentes de los datos de los que se dispone.

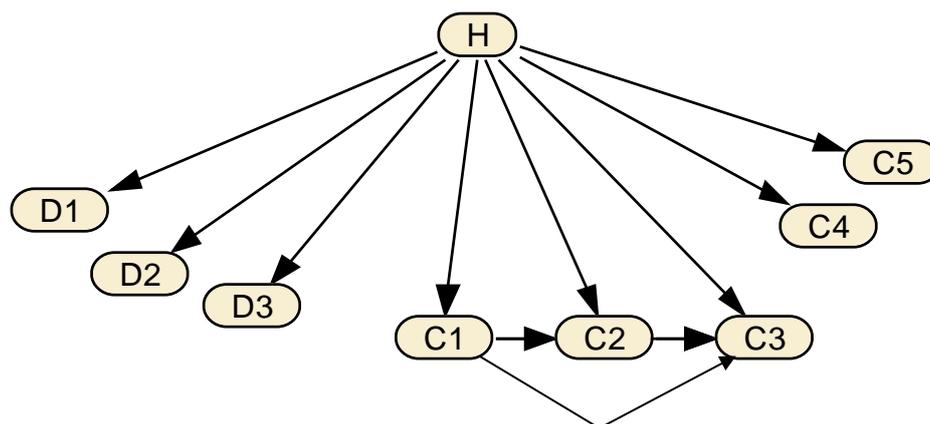


Figura 59. Estructura de la visión de una red bayesiana mediante AutoClass

Por razones de eficiencia de cálculo, Cheeseman y Stutz presuponen que las variables discretas $\{D1, D2, D3\}$ en la Figura 59 y los grupos de variables continuas definidas por el usuario $\{C1, C2, C3\}$ y $\{C4, C5\}$ son independientes entre sí dado el nodo oculto, H. Partiendo de un grupo de variables D, AutoClass busca variantes de este modelo, incluyendo cambio de estados de la variable oculta y selecciona la variante cuya probabilidad aproximada sea un máximo local.

En AutoClass se presupone la existencia de una variable oculta. Hay otras situaciones, en que no se está seguro de la presencia de una variable oculta. En estos casos, se tienen modelos con y sin variables ocultas para reducir la incertidumbre. Sprites proporciona un método para identificar las posibles variables ocultas en este tipo de situaciones (Spirtes y Glymour, 1993). Martin y VanLehn sugieren un enfoque distinto. Postulan que si un conjunto de variables son mutuamente dependientes, una explicación simple es que estas variables tienen una sola causa común oculta, que las hace mutuamente independientes entre sí. Entonces se buscan conjuntos de variables mutuamente dependientes en la red (Martin y VanLehn, 1995).

2.3.8.7 Capacidad de predicción de las redes bayesianas

Una de las mayores ventajas de las redes bayesianas es la de ofrecer un diagnóstico de efecto o predicción a una variable respecto a una situación actual. Mediante la entrada de información a la red, ésta se propaga de los nodos padres a los hijos y de los hijos a los padres, de forma que se produce un comportamiento deductivo que permite conocer una probabilidad de la ocurrencia de un hecho a partir de datos de entrada, aun así, como se ha visto en los apartados anteriores, aunque no se disponga de todos los datos (Jiménez, 2003).

2.3.8.8 Capacidad de interpretación de datos de las redes bayesianas

Si la inferencia de la red proporciona datos de padres a hijos y de hijos a padres, inferenciando estos, las redes bayesianas permitirán conocer las causas a los efectos observados. Por tanto pueden aportar una herramienta eficaz en el diagnóstico de fallos y efectos, así como realizar simulaciones a partir de un modelo en red junto a variables de entrada para obtener los parámetros de salida, como aportando éstos y obteniendo las probabilidades de entrada modificadas con cada experiencia

Las redes bayesianas recogen, como se ha visto ampliamente, información sobre dependencias e independencias entre variables. A parte combinan con rigor métodos

estadísticos junto con la experiencia y los aportes de los expertos en el aspecto en cuestión. Además, lo relaciona de una forma gráfica e intuitiva para aportar soluciones en múltiples campos de la vida real (Martínez et al., 2002).

Se supone que si una radiografía de tórax con resultado anómalo realizada a una persona puede ser síntoma de varias enfermedades distintas, por ejemplo cáncer de pulmón o bronquitis. Cada una de ellas con una serie de probabilidades de estar presente. Por otro lado, si se encuentran otros signos, por ejemplo tos seca, puede que esto confirme que el paciente sufra bronquitis y no cáncer de pulmón. Por un lado aumenta la probabilidad de tener bronquitis y disminuye la de cáncer (Fernández, 2002).

2.3.9 Software para RB

Actualmente existen muchas aplicaciones informáticas que resuelven el problema. Cada una de ellas tiene sus particularidades, sus propios algoritmos, simplificaciones, interfaz gráfica y modelización.

Se puede agrupar éste software en varios grupos según el tipo de código fuente, el sistema operativo para el que están diseñados, el sistema de inferencia estadística que usan y su coste. Se pueden ver en la Tabla 22 una lista de ellos.

Nombre	Autor	Cfi	S.O.	Coste	Inferencia	Comentarios
AgenaRisk	Agena	N	WU	SI	JTree	Simulación vía discretización dinámica
Analytica	Lumina	N	WM	SI	sampling	Compatible con hoja de calculo
Banjo	Hartemink	Java	WU M	NO	no	Aprendizaje vía estructura de redes estáticas o dinámicas de variable discreta
Bassist	U. Helsinki	C++	U	NO	MH	Generación de C++ para MCMC.
Bayda	U. Helsinki	Java	WU M	NO	?	Bayesiano Nativo Clasifica Bayes
Bayes Builder	Nijman (U. Nijmegen)	N	W	NO	?	-
BayesiaLab	Bayesia Ltd	N	-	SI	jtree, G	Aprendizaje vía estructura, interrogación adaptiva, modelos dinámicos
Bayesware Discoverer	Bayesware	N	WU M	SI	?	Aprendizaje vía colapso y limitación con datos parciales
B-course	U. Helsinki	N	WU M	NO	?	Corre en su Server: Vista de resultados vistos vía web browser.
Belief net power constructor	Cheng (U. Alberta)	N	W	NO	?	-

Nombre	Autor	Cfi	S.O.	Coste	Inferencia	Comentarios
BNT	Murphy(U.C. Berkeley)	Mitl a/C	WU M	NO	Varios	Gestiona modelos dinámicos como HMMs y filtros de Kalman
BNJ	Hsu (Kansas)	Jav a	-	NO	jtree, IS	-
BucketEli m	Rish (U.C. Irvine)	C++	WU	NO	Varelim	-
BUGS	MRC/Imp erial College	N	WU	NO	Gibbs	-
Business Navigator 5	Data Digest Corp	N	W	SI	Jtree	-
CABeN	Cousins et al. (Wash. U.)	C	WU	NO	5 Métodos de Muestreo	-
Causal discoverer	Vanderbil t	N	W	NO	-	Aprendizaje sólo estructuras
CoCo+Xlip	Badsberg (U. Aalborg)	C/li sp	U	NO	Jtree	Diseñado para tablas de contingencia
Cispace	Poole et al. (UBC)	Jav a	WU	NO	Varelim	-
DBNbox	Roberts et al.	Ma tlab	-	S	Varios	DBNs
Deal	Bottcher et al.	R	-	NO	No	Aprendizaje vía estructuras
Derivelt	Derivelt LLC	N	-	SI	Jtree	Explota la estructura local en CPDs.
Ergo	Noetic systems	N	WM	SI	jtree	-
GDAGsim	Wilkinso n (U. Newcastle)	C	WU M	NO	Exact	Análisis Bayesiano de grandes modelos lineales directos Gaussianos
Genie	U. Pittsburg h	N	WU	NO	Jtree	-
GMRFSim	Rue (U. Trondhei m)	C	WU M	NO	MCMC	Análisis Bayesiano de grandes modelos lineales in directos Gaussianos
GMTk	Bilmes (UW), Zweig (IBM)	N	U	NO	Jtree	Diseñado para reconocimiento de voces.
gR	Lauritzen et al.	R	-	NO	-	-

Nombre	Autor	Cfi	S.O.	Coste	Inferencia	Comentarios
Grappa	Green(Bristol)	R	-	NO	Jtree	-
Hugin Expert	Hugin	N	W	SI	Jtree	-
Hydra	Warnes (U. Wash.)	Java	-	NO	MCMC	-
Ideal	Rockwell	Lisp	WUM	NO	Jtree	GUI requiere Allegro Lisp.
Java Bayes	Cozman (CMU)	Java	WUM	NO	Varelim, jtree	-
KBaseAI	Codeas	N	WU	SI	varelim	Arquitectura cliente/servidor, múltiples usuarios, control de acceso, lenguaje "query"
LibB	Friedman (Hebrew U)	N	W	NO	none	Aprendizaje vía estructura
MIM	Hyper Graph Software	N	W	SI	Jtree	Maneja hasta 52 variables.
MSBNx	Microsoft	N	W	NO	Jtree	-
Netica	Norsys	N	W	SI	jtree	-
Optimal Reinsertion	Moore, Wong	N	WU	NO	none	Aprendizaje vía estructura
PMT	Pavlovic (BU)	Matlab /C	-	NO	Propósito especial	-
PNL	Eruhimov (Intel)	C++	-	NO	Jtree	Versión C++ de BNT
Pulcinella	IRIDIA	Lisp	WUM	NO	?	Evalúa sistemas con computo no probabilístico
RISO	Dodier (U. Colorado)	Java	WUM	NO	Polytree	Implementación distribuida.
Samlam	Darwiche (UCLA)	N	WU	NO	Recursivo condicional	Efectúa análisis sensitivo
Tetrad	CMU	N	WU	NO	No	-
UnBBayes	?	Java	-	NO	Jtree	K2 para aprendizaje vía estructura
Vibes	Winn & Bishop (U. Cambridge)	Java	WU	NO	Variacional	No disponible
Web Weaver	Xiang (U. Regina)	Java	WUM	NO	?	-

Nombre	Autor	Cfi	S.O.	Coste	Inferencia	Comentarios
WinMine	Microsoft	N	W	NO	None	Aprende vía BN o estructuras de red dependientes
XBAIES2.0	Cowell (City U.)	N	W	NO	Jtree	-

Tabla 22. Lista de software que aplican sistemas de RB (Sacerdoti, 2010)

2.4 ESTABLECIMIENTO DEL PROBLEMA

Después de haber realizado el estado del arte de las tres afecciones de esta tesis, como son el yeso (su uso y su fabricación), la automatización industrial y los sistemas expertos en el campo de la inteligencia artificial, enfocada a las redes bayesianas, en este apartado se resume la problemática en que se va a centrar esta tesis.

La tesis realizará un análisis y establecerá, con la tecnología actual, la mejor práctica para la fabricación de anhídrita, evolucionando los actuales sistemas de fabricación de este semiterminado, su sistema de calidad y la regulación de los equipos, especialmente el horno y el quemador de dicho horno.

Por otra parte se analizarán y modelarán los sistemas térmico y energético del sistema horno y quemador, realizando los balances de masa y energía que corresponda para su completa definición y aprovechamiento en los puntos sucesivos.

La implantación de un sistema de automatización que permita una eficiente generación y reporte de datos en tiempo real, así como el análisis de los mismos y su relación entre todas las variables implicadas en el sistema.

Se establecerán los lazos de control necesarios para, una vez determinadas las variables clave, automatizar su funcionamiento y su autorregulación. El sistema, trabajará como experto en la tarea de la calcinación de anhídrita.

Se implantarán estructuras de redes bayesianas que permitan conocer el funcionamiento del sistema y los riesgos a los que se enfrenta. Así mismo, el operador y el ingeniero de planta podrán conocer la situación de cada estado de cada variable, para que le permita esto tomar las mejores decisiones en cada momento.

Estas problemáticas son las que abordará la tesis en los capítulos siguientes, donde se intentará poner en claro y evolucionar el actual sistema de fabricación de anhídrita con métodos actuales, que permitan mejorar en eficiencia, coste y en tener seguridad a la hora de tomar las decisiones a bajo y alto nivel en esta línea concreta de fabricación.

3 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Como se ha planteado en la introducción, las aportaciones de la presente tesis permitirán una revisión actualizada de todo el proceso de la calcinación de anhídrita, así como la automatización del proceso mediante una eficiente regulación automática, aportando mejoras sustanciales en la estabilidad del proceso.

La aportación de los sistemas expertos en dicho proceso permitirá obtener un autodiagnóstico a la deshidratación de la anhídrita, permitiendo al ingeniero de planta y al operador tomar decisiones correctas a partir de los porcentajes obtenidos de fallo en cada parte, o en cada variable, del mismo proceso.

En este apartado se desarrolla la propuesta de este trabajo. Se analizan desde diferentes puntos de vista, mediante diferentes herramientas, todos los factores que intervienen, de forma más o menos directa, en la concepción de éste estudio y que llevarán a las formulaciones de las tesis que se plantean.

En la primera parte, el análisis se centrará en los equipos físicos, mecánicos y de combustión. Se verán las características de los mismos, sus parámetros de regulación, sus modos de trabajar y se relacionarán sus elementos críticos. El trabajo se centrará en el horno, en el quemador y su regulación, el sistema de aspiración y filtraje. Seguidamente se analizará y establecerá la operativa de trabajo, en definitiva, la operativa de la producción. Se realizarán diagramas de proceso y flujos, así como se definirán las consignas y se establecerán las pautas de control. Como no puede ser de otra manera, se relacionarán intrínsecamente las operativas de producción propiamente dichas con las de control de calidad. En este apartado se estudiarán y se establecerán todos los análisis que se realizan, tanto a las materias primas como al producto terminado, del proceso de calcinación de anhídrita en un horno rotativo de cocción directa. Se detallarán asimismo las operativas de dichos ensayos de calidad para el material que concierne.

En una segunda etapa del planteamiento de ésta tesis, se entrará básicamente en el estudio energético del horno de calcinación. Se elaborarán los balances de masa y energía del sistema. Para ello se mostrarán dentro de un conjunto, de un perímetro de producción más amplio, que incluirá el resto de componentes energéticos de una planta de fabricación de yeso, donde los diagramas simplificados de Sankey aportarán una visión general y particular de la estratificación energética del perímetro. No se estima posible estudiar este apartado energético sin este componente de gasto global, tanto en su componente del gas natural como en el de la electricidad. Aquí se aportarán datos de consumos energéticos dilatados en el tiempo, siempre en aras de aportar generalidad y visión global a éste estudio.

Posteriormente, y una vez definido los procesos implicados, se analizarán todas las variables directas e indirectas que puedan afectar de una u otra forma a la parametrización del mismo. Se realizará un estudio estadístico clásico pero se tratarán los datos de las variables mediante herramientas modernas de gestión de este tipo de datos. Se usarán programas informáticos que permitan tratar la ingente cantidad de datos generados por las múltiples fuentes de ellos, que se han definido en esta misma parte cuando se han establecido las pautas de control. Se analizarán medias y dispersiones, regresiones y curvas de correlación. Otra aportación del estudio será las técnicas para el cruce de variables entre sí para encontrar relaciones de dependencia

e influencia entre ellas. Todo ello permitirá encontrar y definir los parámetros clave que se deberán posteriormente regular para la armonización del sistema de referencia.

El siguiente apartado versará sobre la automatización del sistema. Se analizará el control de la automatización partiendo de un punto más alto, con una visión global, a un punto de detalle, con la visión particular de la gestión de calcinación de anhídrita. Se redefinirá e implantará una gestión del nivel MES de la automatización aplicada, así como los demás niveles de mando y de control sucesivos. Las secuencias de control definidas en los apartados previos permitirán establecer la programación de todos estos niveles para que sean representados en un nivel Scada, que será el que a posteriori registre los datos históricos de cada una de las variables de control de proceso para su trato posterior.

Una vez establecida la automatización general, el estudio se centrará en la regulación automática mediante controladores PID integrados en la programación de bloques. La implantación de estos controladores, apoyados por el conocimiento exhaustivo del sistema y por el análisis previo de las variables implicadas, permitirá obtener una ajustada curva de trabajo, muy cercana a la óptima. Esto hará que los equipos estén gobernados de una forma eficiente y auto gestionados, con balances de error muy menores que si se gestionaran con sistemas clásicos de control o evidentemente, si se controlaran de una forma manual.

Todo el trabajo previo realizado dará el punto de partida a otra, y quizás una de las más importantes aportaciones de esta tesis, que será realizar una implantación de inteligencia artificial. Se realizará un modelo estadístico moderno, mediante un sistema experto como es una red bayesiana, del conjunto o línea de producción de calcinación de anhídrita. Se avanzará respecto al estudio clásico de las variables del sistema y se introducirán nuevas variables que pueden afectar al mismo y que quizás no se tuvieron en cuenta en los primeros análisis. El modelo mediante RB aportará una visión de qué afecta a quien en el proceso, y lo más importante, cómo lo afecta. Estas modernas técnicas están siendo aplicadas actualmente en amplios campos de la investigación, pero también se entran introduciendo en la gestión de los procesos, ya que permiten tomar decisiones consensuadas al conocer el grado de riesgo que se asume tomando dicha determinación.

El modelo estadístico mediante RB está programado para proporcionar respuestas al comportamiento del sistema en condiciones cambiantes. Está testeado y ajustado a un gran número de variables y casos estudiados, así como avalado por una gran cantidad de datos de los mismos. Una de las ventajas del sistema respecto a estudios anteriores, puede que la principal, es que el sistema es receptivo con los cambios, que aprende con cada nuevo caso y hace que sus ajustes sean más finos día tras día. Esta ventaja competitiva es una de las causantes de que la moderna gestión de casos se esté tratando con este tipo de sistemas expertos.

3.1 PROCESO DE CALCINACIÓN DE ANHIDRITA

3.1.1 El horno de calcinación de AN

Fabricante y distribuidor: TALLERES A. MONTERDE, S.A. Ramón y Cajal, 2. Polígono Industrial el Pla. 08750-Molins de Rei (Barcelona)

Los datos identificativos del equipo son:

Serie y modelo:

Marca: ARAMIR

Modelo: HR3

Nº de serie: 1.151

Año de fabricación: 1990

Las dimensiones y el peso están indicados en la Figura 60.

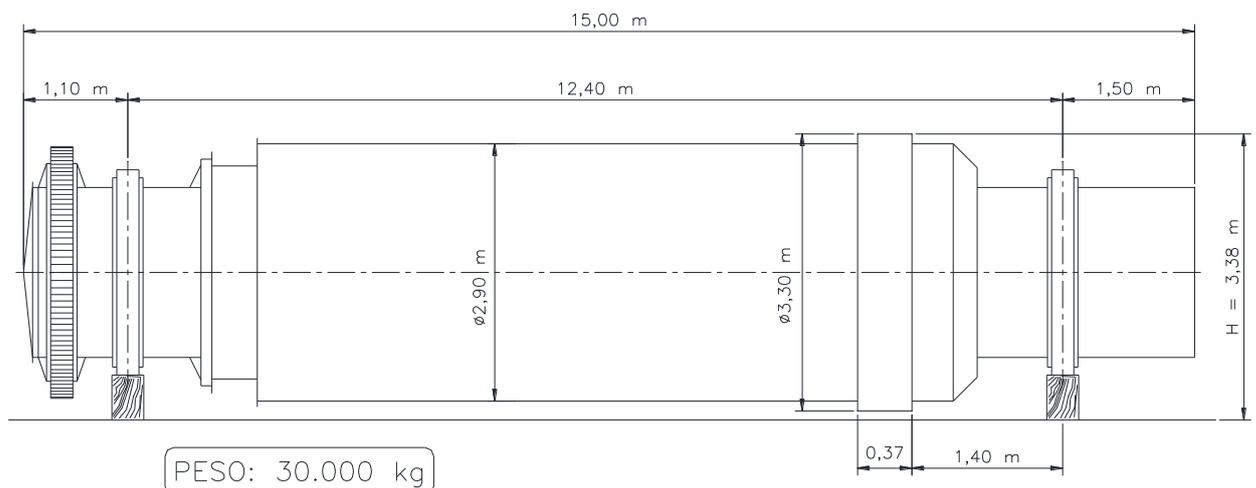


Figura 60. Dimensiones y peso del equipo

3.1.1.1 Indicaciones de la máquina

En la Figura 61 se puede apreciar el cuerpo de un horno rotativo. Dicho horno está formado por tres cuerpos tubulares cilíndricos, montados coaxialmente (Figura 62). El tubo interior o de cocción (T1), el intermedio o de precalentamiento (T2) y el exterior o enfriador (T3) Entre estos tres tubos se forman tres cámaras: la interior (A), la intermedia (B) y la exterior (C)

El tubo interior (T1), de 15 m de largo, va provisto en cada uno de sus extremos de un aro de rodadura (7), apoyado en sus respectivos rodillos (8) Situados en el aro de rodadura más alejado del quemador se hallan dos rodillos axiales (9), cuya función es evitar desplazamientos longitudinales del horno. La corona dentada (10), situada también en el extremo posterior, recibe el accionamiento por medio de un motor con su correspondiente reducción de velocidad, que es el que proporciona el movimiento de giro al tubo interior (T1) y por consiguiente a la totalidad del horno.

En la parte posterior del cuerpo tubular (T1) se hallan las aberturas (2), que ponen en comunicación la cámara (B) con la cámara (A) En estas bocas, hay unas aletas helicoidales cuya función es facilitar el paso y avance del material, evitando que éste vuelva a reintroducirse en la cámara (B).



Figura 61. Cuerpo de un horno de combustión rotativo

En la parte delantera, se abren las bocas (3), que ponen en comunicación la cámara (A) de cocción con la cámara (C) de enfriamiento. En el extremo posterior del mismo tubo (T1), se tiene la entrada (1b), por donde entra el polvo, que ha sido arrastrado por los gases y recuperado por el filtro de mangas.

El conjunto de los tres cuerpos que componen la totalidad del horno se halla dispuesto de manera que presentan una inclinación del 1,5% en sentido descendente desde el extremo delantero al posterior (es decir el hogar está más alto) Esta disposición favorece la circulación y avance del material.

Hay que destacar la presencia de aletas en el interior de cada una de las cámaras, que varían de forma y disposición según sea la función que deban desempeñar.

Las paredes del hogar en el T1, donde se halla el quemador (5) están recubiertas con material refractario (11), dándoles una forma cónica, siendo la parte más ancha la que está más cerca del quemador. En esta zona hay paletas de avance y volteo, más con la inclinación del 3% se consigue que el material siga su recorrido a la parte delantera del horno.

El material entra al horno por la caja de alimentación (1a) en la parte delantera del horno directamente a la cámara B, y realiza el recorrido indicado en la Figura 62, saliendo finalmente por la caja de descarga (4) situada en la parte posterior del horno.

El carro porta quemador (6) tiene la posibilidad de desplazarse hacia atrás, separándose del horno para permitir el acceso al interior del horno (que también puede hacerse quitando las tapas de la parte posterior)

El horno dispone de un hogar de combustión revestido de refractario interiormente, situado entre el carro porta-quemador y el tubo rotativo. Este hogar de combustión está situado sobre una estructura de HEB con ruedas para poder girarlo libremente.

El recorrido de los gases de combustión por el interior del horno es inverso al recorrido del material. Una compuerta de mariposa (12) permite regular el tiro del horno, y una compuerta de dilución (13) posibilita la entrada de aire a temperatura ambiente para bajar la temperatura de los gases que entran en el filtro de mangas.

Una cámara de expansión situada sobre la caja de alimentación del horno, reduce la cantidad de polvo que es arrastrada por los gases en su recorrido hacia el filtro de mangas (Figura 63 y Figura 64). Esta cámara de expansión está calorifugada.

Tres captadores de temperatura suministran información sobre las temperaturas en otros tantos puntos del horno. Una caña pirométrica (S1) fijada al carro porta quemador indica la temperatura del hogar. Una termosonda (S2) situada en la tapa de los pasos de anhídrita muestra la temperatura de cocción de la anhídrita II. Por último otra termosonda (S3) informa de la temperatura de salida de material del horno.

El sistema de accionamiento del horno consiste en un motor conectado por medio de unas poleas a un reductor, el cual reduce la velocidad de rotación del motor y la comunica a un piñón dentado recto que hace girar una corona dentada solidaria al horno.

El horno está diseñado para calcinar piedra de yeso cuyo tamaño máximo no exceda de 8 mm.

Las características técnicas del equipo son:

1.- Horno produciendo anhídrita II:

- Potencia del motor: 30 kW (1500 rpm)
- Velocidad de rotación del horno: 3 rpm
- Temperatura de cocción: 600°C
- Potencia calorífica necesaria para la cocción: 2.910 kW (2.500.000 kcal/h)
- Temperatura de la anhídrita II a la salida del tubo enfriador: 170-190°C
- Temperatura de salida de los gases: 100-110°C
- Alimentación máxima: 125 kg/min
- Producción de anhídrita II: de 5 a 10 T/h
- Granulometría de yeso crudo : de 0 a 8 mm

2.- Horno produciendo semihidrato:

- Potencia del motor: 22,5 kW
- Velocidad de rotación del horno: de 1 a 3 rpm *
- Temperatura de cocción: 170-200°C
- Potencia calorífica necesaria para la cocción: 2.910 kW (2.500.000 kcal/h)
- Temperatura del semihidrato a la salida del tubo enfriador: 150-170°C
- Temperatura de salida de los gases: 90-100°C
- Alimentación máxima: 165 kg/min
- Producción de semihidrato: de 7 a 11 T/h
- Granulometría: de 0 a 8 mm
- Potencia calorífica aproximada radiada por las paredes del horno: 670 kW

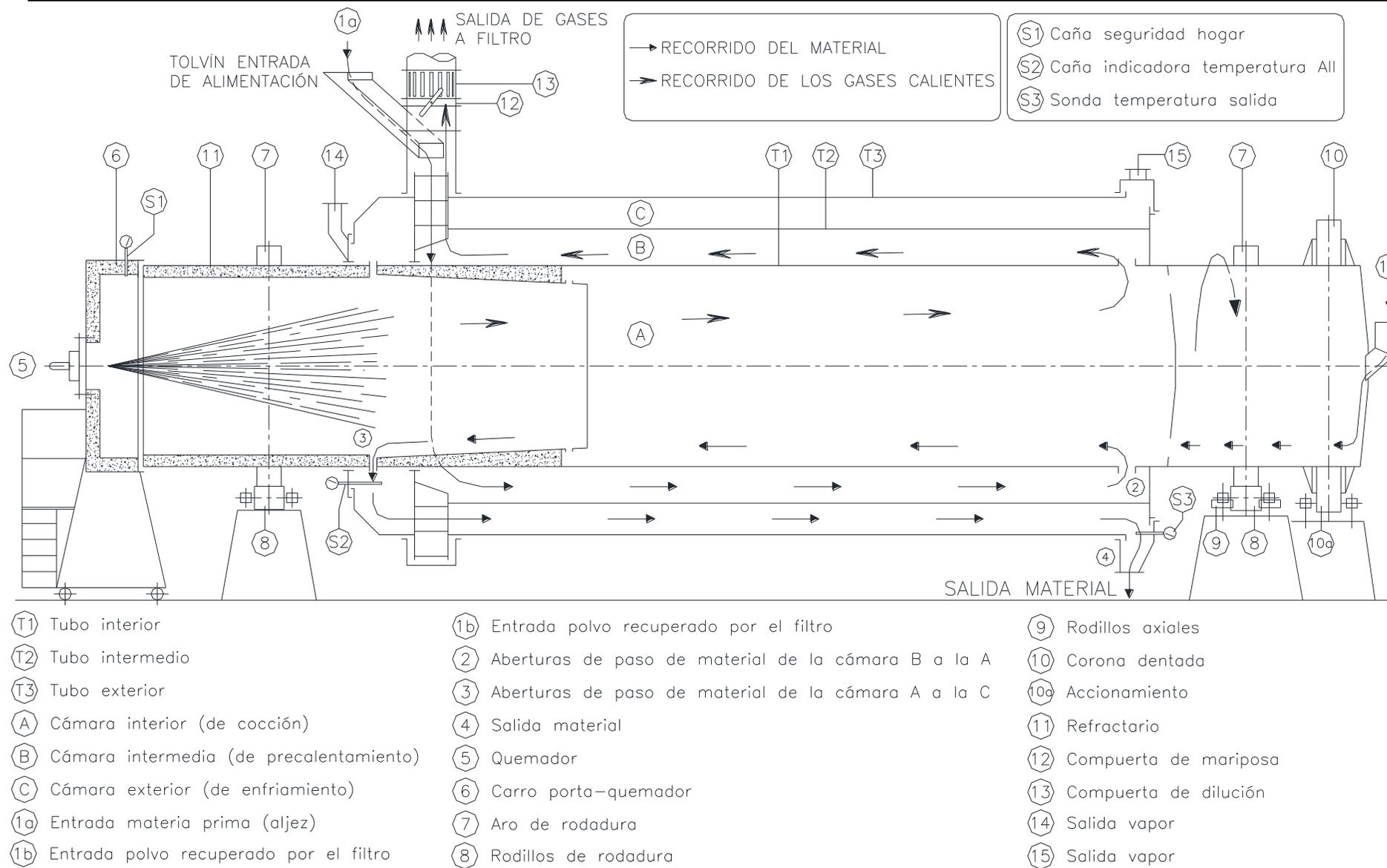


Figura 62. Esquema general de funcionamiento de un horno de anhídrita

* La velocidad de rotación del horno afectará a las características del semihidrato producido, por lo que será tras analizar en el laboratorio los tiempos de fraguado del semihidrato obtenido cuando se decida una velocidad definitiva (puede variar entre 1 y 3 rpm).



Figura 63. Vista válvulas de descarga de mangas de un filtro



Figura 64. Filtro de mangas de un horno de calcinación

3.1.1.2 Trabajo con el horno de calcinación

Para poner en marcha el horno es preciso seguir los siguientes pasos:

1. Poner en marcha las máquinas de transporte del yeso cocido desde el horno al silo de almacenamiento (o al silo de arranques). Las máquinas han

- de seguir la secuencia de arranque prevista en la descripción del cuadro eléctrico.
2. Poner en marcha el motor del aspirador del filtro. La mariposa de regulación del aire del filtro debe estar en la posición cerrada o en el punto de abertura 1 (Figura 65 y Figura 66). Si se trabaja con el variador electrónico de velocidad, arrancar en la posición número 3 (en una escala de 1 a 10) y la mariposa totalmente abierta.
 3. Poner en marcha el quemador.
 4. Inmediatamente después de encendido el quemador poner en marcha el motor del horno de forma que el horno gire solamente media vuelta y pare, repetir esta operación cada medio minuto o minuto aproximadamente (esto debe hacerse para evitar que el tubo del horno se doble y también para facilitar la dilatación del mismo, evitando daños a los rodamientos de los rodillos). En los hornos con variador electrónico, inmediatamente después de encendido el quemador poner en marcha el horno a velocidad lenta (nº 1 en una escala de 1 a 10)
 5. Cuando los gases calientes que salen del horno hacia el filtro alcanzan los 90°C se pone definitivamente el motor del horno en marcha continua y se conectan los motores de las máquinas de alimentación de yeso crudo al horno.
 6. Poner en marcha los motores de transporte de retorno del polvo recogido por el filtro al horno (sinfines y alveolar).
 7. Previamente a la operación de primer encendido del horno, se habrá regulado la cantidad de yeso crudo que debe entrar en el horno, para ello se procederá de la siguiente forma. Se abre el desvío que hay en la boca de alimentación del horno, se pone en marcha la cinta transportadora a horno y el alimentador, cuando cae el yeso crudo por el desvío, se recoge en un recipiente el equivalente a un minuto (si el recipiente no es suficientemente grande el control puede hacer en medio o en un cuarto de minuto). A continuación se pesa (en un minuto debe alimentarse el horno un máximo de 165 kg cuando se produce semihidrato y 125 kg cuando se produce anhídrita II) Si la regulación de la alimentación se realiza mediante un alimentador con báscula electrónica, conviene también comprobar manualmente que la cantidad de yeso que se alimenta al horno sea la correcta, procediendo como se ha indicado anteriormente. La primera regulación, puede ser aproximada y cuando el horno está en funcionamiento se afina. Es conveniente comprobar la alimentación durante el funcionamiento del horno, al menos una vez cada 8 horas.

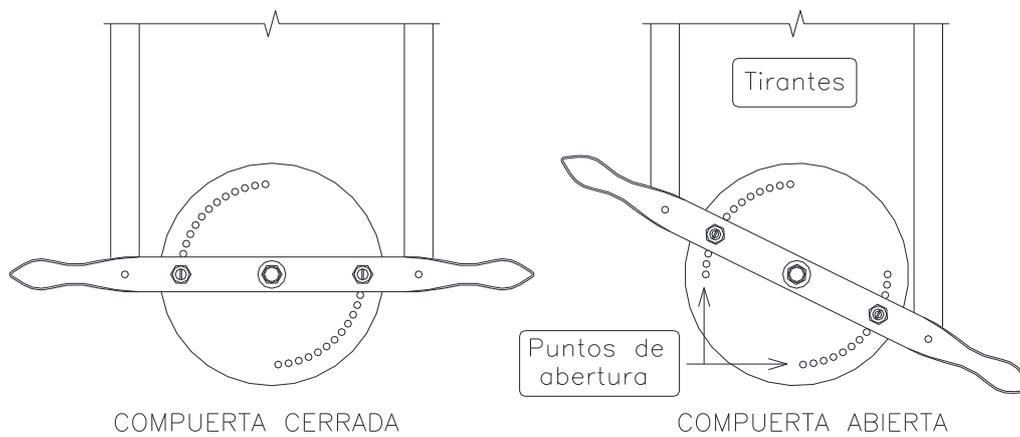


Figura 65. Posiciones de la válvula de mariposa en la aspiración

8. Tanto si se arranca el horno para producir semihidrato, como si se arranca para producir anhidrita II, el material producido debe enviarse a un silo previsto para los arranques hasta que la temperatura de consigna de dicho material sea la deseada.

Para parar el horno es preciso seguir los siguientes pasos:

1. Apagar el quemador.
2. Parar la alimentación de yeso crudo.
3. A los tres minutos parar el horno y durante media hora, cada cinco minutos darle media vuelta, esto debe hacerse para que el horno no se doble y para evitar esfuerzos axiales a los rodamientos de los rodillos de rodadura. Hasta pasada la media hora no debe pararse el aspirador del filtro del horno. Trabajando con variador electrónico, bajar inmediatamente a velocidad lenta nº1, manteniéndola durante 15 minutos. Dejar el aspirador del filtro en marcha durante 15 minutos más. Una vez parado el aspirador del filtro mantener aún la limpieza de mangas durante 15 minutos. Es preferible parar el horno cuando se está produciendo semihidrato, al ser la temperatura de cocción menor. No se debe parar nunca de forma brusca el horno cuando se está produciendo anhidrita II, pues los esfuerzos generados por la contracción del horno sobre los rodillos son mucho mayores que cuando se está produciendo semihidrato.



Figura 66. Regulador de la aspiración en un horno de anhidrita

4. Antes de parar el horno hay que parar la rosca del filtro, el alveolar del filtro y la rosca del polvo al horno. Teniendo en cuenta que el horno después de unas cuantas horas de marcha ha alcanzado una dilatación que aproximadamente es de 35 mm, cuando se vaya a parar, una vez cortada la alimentación y apagado el quemador (Figura 67), el horno deberá seguir girando hasta que en su enfriamiento se haya realizado la contracción de los 35 mm.
5. El material que sale del horno durante el tiempo que transcurre desde que se para el quemador hasta que deja de girar definitivamente el horno debe enviarse al silo de arranques. Al realizar un paro estándar como el descrito se queda cierta cantidad de material dentro del horno. No es necesario vaciar el horno de material si se realiza el paro según el procedimiento descrito.

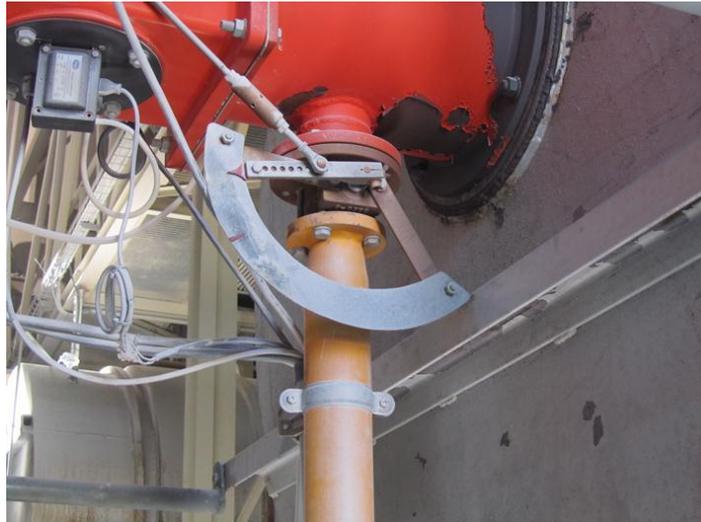


Figura 67. Regulador del caudal de gas en un horno de anhidrita

Al producirse un paro imprevisto del horno, todas las máquinas que lo alimentan se pararán siguiendo la secuencia descrita en los esquemas eléctricos. Los paros imprevistos del horno se detectan instalando un detector de control de rotación en el mismo; este dispositivo al comprobar que el horno no gira, dará la señal para realizar el paro de la alimentación.

Para fabricar anhidrita II estando el horno produciendo semihidrato se deben cambiar los siguientes parámetros:

- Alimentación horno: Pasar de 165 kg/minuto a 125 kg/minuto.
- Temperatura salida material: Pasar de la temperatura de consigna del semihidrato a la de la anhidrita II.
- Velocidad rotación horno: Pasar de la velocidad de rotación produciendo semihidrato a 3 rpm.
- Potencia del quemador: No varia
- Al pasar de producir semihidrato a producir anhidrita II, el material debe enviarse al silo previsto para los arranques hasta que el material alcanza su temperatura de consigna.

Para fabricar semihidrato estando el horno produciendo anhidrita se deben cambiar los siguientes parámetros:

- Alimentación horno: Pasar de 125 kg/minuto a 165 kg/minuto.
- Temperatura salida material: Pasar de la temperatura de consigna de la anhidrita II a la del semihidrato.
- Velocidad rotación horno: Pasar la velocidad de rotación de 3 rpm a la del semihidrato.
- Potencia del quemador: No varia

Al pasar de producir anhidrita II a producir semihidrato, el material debe enviarse al silo previsto para los arranques hasta que el material alcanza su temperatura de consigna.

En todos los casos el criterio de apreciación de que el material obtenido es válido es la temperatura de cocción del mismo (esta temperatura se mide con el termopar S2 de la

Figura 62). Si la temperatura de cocción no coincide con la consigna establecida se echará el material en el silo previsto para los arranques.

La máquina dispone de un paro de categoría cero y 2 paros de emergencia, uno en la cabina de mandos y otro al lado del horno. El paro de emergencia cumple con la norma EN 418.

Reglaje de los rodillos del horno:

Algunas veces el aro de rodadura se apoya excesivamente en uno de los rodillos axiales debido a que se ha producido un desplazamiento longitudinal del horno. Cuando esto ocurre es necesario realizar un reglaje de los rodillos radiales, consistente en ajustar la inclinación de los rodillos radiales respecto del aro de rodadura de forma que se reduzca e incluso elimine su empuje contra uno de los rodillos axiales. La manera de proceder depende del sentido de giro del horno.

1.- Si el horno gira en el sentido de las agujas del reloj (visto desde el quemador):

- Si el horno se desliza en dirección contraria al quemador, deberán inclinarse los rodillos tal como indica la Figura 68 superior. Para ello se aconseja roscar 1/4 de vuelta el tornillo B de ajuste de cada uno de los 4 rodillos, se hace rodar el horno media hora y se vuelve a verificar la posición del horno. Esta operación se repetirá hasta que el aro de rodadura se encuentre sin ejercer presión sobre ninguno de los dos rodillos axiales.
- Si el horno se desliza hacia el quemador se inclinarán los rodillos en la dirección contraria por lo que deberá roscar 1/4 de vuelta el tornillo A de ajuste de cada rodillo.

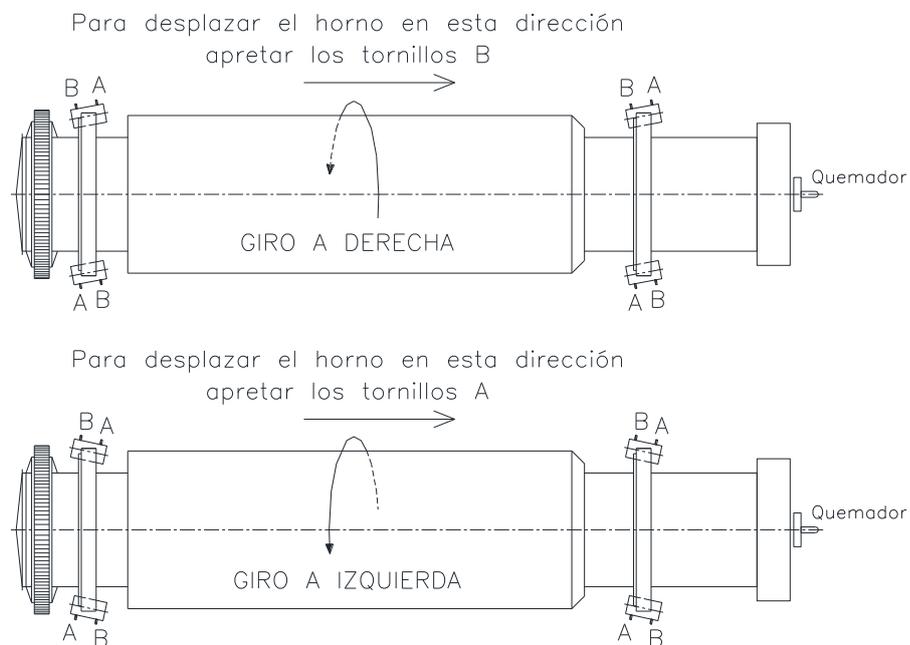


Figura 68. Ajuste de un horno Monterde según sentido de giro

2.- Si el horno gira en sentido contrario al de las agujas del reloj (visto desde el quemador)

- Si el horno se desliza en dirección contraria al quemador deberán inclinarse los rodillos tal como indica la Figura 68 inferior. Para ello hay que realizar el mismo proceso que el descrito para la Figura 68 superior pero girando 1/4 de vuelta los tornillos A. En este mismo caso si el horno se desliza hacia el quemador deberá girarse los tornillos B.

Identificación y localización de averías

Véase la Tabla 23.

AVERÍA	CAUSA	SOLUCIÓN
Deterioro del refractario	Envejecimiento del refractario	Correcto mantenimiento del refractario
	Sobrecalentamiento	Comprobar aspiración del filtro mangas
Rotura de los rodamientos	Envejecimiento Sobresfuerzo en los rodillos	Correcto mantenimiento de los rodillos
		Lubricación correcta rodillos y rodamientos.
		Efectuar arranque y paro del horno correctamente.
		Véase Manual de Instrucciones.
		La contracción del horno debe efectuarse con el horno rodando, nunca en parado

Tabla 23. Cuadro de localización de averías de un horno de anhídrita

3.1.2 Quemador de gas natural

Fabricante y distribuidor: ECLIPSE COMBUSTIÓN, S.A. (Rockford, IL – USA)

Los datos identificativos del equipo son:

Marca: HERAR
Modelo: H-2500
Nº de serie: 5/98
Año de fabricación: 1998
Combustible: Gas Natural

3.1.2.1 Descripción del quemador

Se trata de un quemador compacto (monobloc) totalmente automático (Figura 69), diseñado para conseguir la combustión total con muy bajo exceso de aire y una regulación 1/5. El quemador se compone básicamente de dos partes principales:

1.- Un elemento base formado por:

- Carcasa
- Estabilizador de llama.
- Cabezal de combustión.
- Colector de gas con multiinyectores.
- Dispositivo de encendido compuesto por doble electrodo.
- Presostato de aire.
- Grupo motor-ventilador.
- Sistema de regulación gas-aire ajustable a través de una caja GASTHECNIC LKS y accionado por un servomotor.

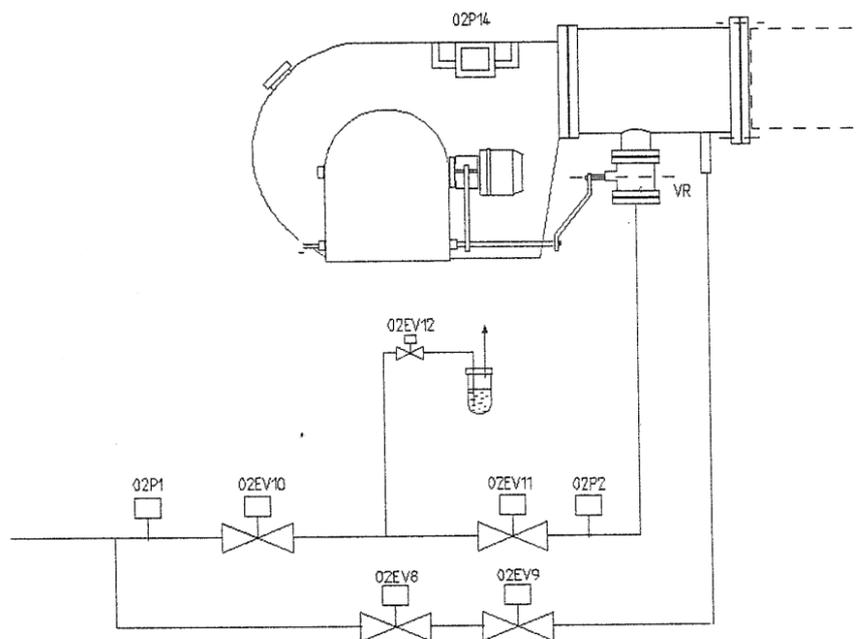


Figura 69. Componentes del quemador de gas natural

2.- Un circuito de gas (Tren de válvulas) compuesto por los siguientes elementos (Figura 70):

- 2 Electroválvulas KROMS VK-80 de 3"
- Presostato de gas máxima KROMS DWG-500
- Presostato de gas mínima KROMS DWG-50U
- Válvula VMG-50.
- Borboteador de 1/4.
- Electroválvula piloto KROMS VG-15 1/2"



Figura 70. Tren de válvulas del quemador

3.1.2.2 Funcionamiento del quemador para gases combustibles

El quemador HERAR H-2500 (Figura 71) constituye un aparato patentado en España para la combustión de gases combustibles: Gas Natural, Gas Ciudad, Gas Propano y Gas Butano. Es de sistema de aire insuflado, mediante grupo motor-ventilador y mezcla realizada en la zona de combustión. Tiene un cabezal de mezcla, mediante deflector de gran turbulencia para el aire y un multiinyector formado por varias cañas para el gas. Con ello se logra una correcta mezcla de aire y gas en todas las marchas, con bajo exceso de aire en la combustión, cumpliendo la norma UNE-EN 676:1997.



Figura 71. Vista del quemador de gas natural H-2500

Las funciones del quemador serán:

- Asegurar la mezcla de gas combustible con aire, en la proporción conveniente y en el momento deseado.

- Realizar la combustión completa de dicha mezcla, de tal forma que los residuos sean solamente vapor de agua y anhídrido carbónico, no encontrándose muestras de inquemados (H₂ y CO).
- Mando de los paros y puestas en marcha según las necesidades caloríficas y vigilancia de funcionamiento de acuerdo con las normas DIN 4788 relativas a la construcción de quemadores de gas.

Las características técnicas del quemador son:

- Potencia calorífica: 580-2.900kW
- Tensión de alimentación: 380V 50Hz
- Presión de distribución de gas: 40-80hPa (sistema de regulación de presión, válvula manual de seccionamiento y un filtro para evitar que entre la suciedad en las válvulas de seguridad)
- Consumo de gas máximo: 278 Nm³/h
- Tiro o depresión en el hogar: 6-8hPa (tiro artificial, nunca a contrapresión)
- Caudal de extracción: 30.000 m³/h.

3.1.2.3 Calibración de los parámetros del quemador

Analizaremos en éste apartado los difusores y flujos del quemador. Para calcular el coeficiente de descarga para diferentes tipos de orificios:

El flujo de aire o gas Q a través de un orificio se puede determinar por la fórmula:

$$Q = 107 A C_d \sqrt{\frac{h}{g}}$$

donde:

A: área del orificio en centímetros cuadrados

C_d: coeficiente de descarga del orificio

h: caída de presión a través del orificio

g: densidad relativa del gas

Para dimensionar una placa de orificios, la ecuación puede expresarse como sigue:

$$A = \frac{Q}{107 C_d} \sqrt{\frac{h}{g}}$$

Para evaluar el efecto de los cambios en las condiciones operativas del flujo a través de un orificio:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{A_2}{A_1} \frac{C_{d2}}{C_{d1}} \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \sqrt{\frac{g_1}{g_2}}$$

Si cualquiera de los factores en esta relación permanece constante a partir de la Condición 1 a Condición 2, se puede prescindir de esta ecuación, obteniéndose las relaciones simplificadas:

- Si el flujo varía respecto a la superficie del orificio:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{A_2}{A_1}$$

- Si el flujo varía respecto a la caída de presión:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

La ecuación se denomina *ley de raíz cuadrada*.

- Si el flujo varía respecto al peso específico:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{g_1}{g_2}}$$

El efecto de los cambios en las condiciones operativas de caída de presión a través de un orificio se calculará como sigue:

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \left(\frac{C_{d1}}{C_{d2}}\right)^2 \frac{g_2}{g_1}$$

Una vez más, si alguno de los factores en esta ecuación no se han modificado desde la condición del 1 a la 2, se pueden formar relaciones simplificadas:

- Variación de la caída de presión frente a la variación del flujo

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2$$

Ésta es otra expresión de la *ley de raíz cuadrada*

- Variación de la caída de presión frente a la superficie del orificio

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

- Variación de la caída de presión frente a la variación del peso específico

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{g_2}{g_1}$$

Para calcular los efectos de los cambios en la temperatura del gas en el flujo y la caída de presión a través de un orificio, se tiene que tener en cuenta que el aumento de la temperatura de un gas tiene dos efectos: que aumenta el volumen y disminuye la densidad relativa, en el ratio de las temperaturas absolutas. Se deberán usar las siguientes ecuaciones:

- Variación del flujo frente a la variación de la temperatura

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{T_{ADS1}}{T_{ABB2}}}$$

- Variación de la presión frente a la variación de la temperatura

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{T_{ABS2}}{T_{ABS1}}$$

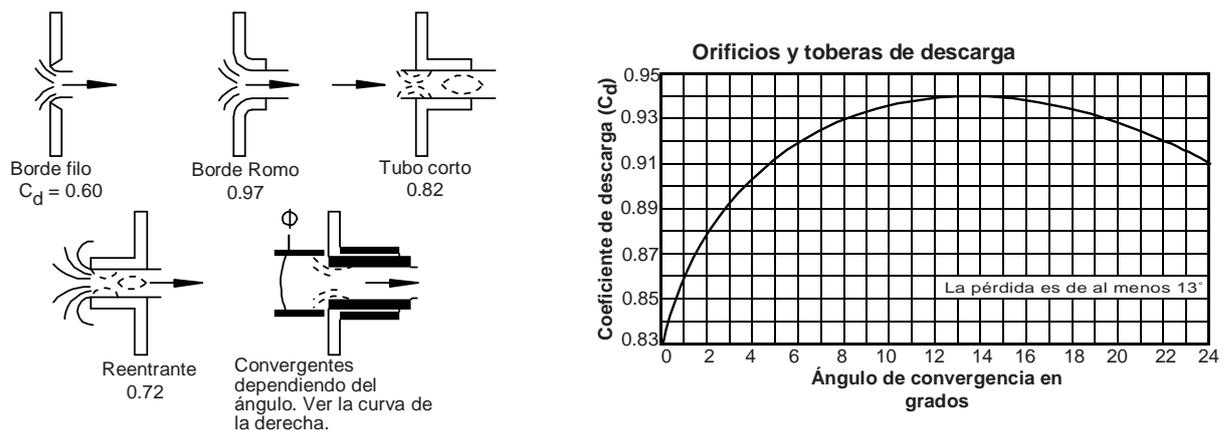


Figura 72. Cálculo de toberas según el flujo

Para gases a baja presión como es el caso del quemador para el horno de anhídrita se pueden aplicar tablas de referencia. Los flujos de estas tablas se basan en una caída de presión del orificio de 2,49hPa y un coeficiente de descarga C_d de 1,0.

Para determinar el flujo a través de un orificio de un diámetro conocido, se deberá:

- Localizar el diámetro del orificio en la columna de la izquierda de la tabla.
- Leer a través de la columna correspondiente al gas que se mide. Da el flujo sin corregir.
- Multiplicar este flujo por el coeficiente de descarga del orificio. (Figura 72)
- Corregir este flujo a la caída de presión realmente medida, usando la ley de raíz cuadrada anterior.

Para determinar el tamaño del orificio adecuado para un flujo conocido en una caída de presión especificada, se invertirá el proceso:

- Corregir el flujo conocido a una caída de presión de 2,49hPa, usando la *ley de raíz cuadrada*.
- Dividir el flujo por el coeficiente de orificio.
- En la tabla orificio, localizar la columna para el gas bajo consideración. En esta columna, localizar el flujo más próximo al valor corregido encontrado en el segundo paso.
- Ver a la columna izquierda y encontrar el tamaño del orificio corregido

Para el cálculo se deberá evaluar con la Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26, la pérdida de presión en tuberías trabajando a baja presión

Taladro	Diám. Int.	Diám. Superior	G.Natural 0,60 Sp.Gr.	Aire 0,60 Sp.Gr.	Taladro	Diám. Int.	Diám. Superior	G.Natural 0,60 Sp.Gr.	Aire 0,60 Sp.Gr.
80	.0135	.000143	.308	.239	3	.213	.0356	76.4	59.2
79	.0145	.000165	.355	.275	7/32	.2187	.0376	80.7	62.5
1/64	.0156	.00019	.409	.317	2	.221	.0384	82.4	63.8
78	.016	.00020	.431	.334	1	.228	.0409	87.8	68.
77	.018	.00025	.538	.417	A	.234	.0430	92.3	71.5
76	.020	.00031	.668	.517	15/64	.2343	.0431	92.5	71.6
75	.021	.00035	.754	.584	B	.238	.0444	95.3	73.8
74	.0225	.00040	.861	.668	C	.242	.0460	98.7	76.5
73	.024	.00045	.969	.751	D	.246	.0475	102.	78.9
72	.025	.00049	1.06	.817	1/4	.250	.0491	105.	81.6
71	.026	.00053	1.14	.884	F	.257	.0519	111.	86.3
70	.028	.00062	1.33	1.03	G	.261	.0535	115.	88.9
69	.0292	.00067	1.44	1.12	17/64	.2656	.0554	119.	92.1
68	.030	.00075	1.61	1.25	H	.266	.0556	119.3	92.4
1/32	.0312	.00076	1.64	1.27	I	.272	.0580	124.	96.4
67	.032	.00080	1.72	1.33	J	.277	.0601	129.	99.9
66	.033	.00086	1.85	1.43	K	.281	.0620	133.	103.
65	.035	.00092	2.07	1.60	9/32	.2812	.0621	133.2	103.2
64	.036	.00102	2.20	1.70	L	.290	.0660	142.	110.
63	.037	.00108	2.33	1.80	M	.295	.0683	147.	113.
62	.038	.00113	2.43	1.88	19/64	.2968	.0692	148.	115.
61	.039	.00119	2.56	1.98	N	.302	.0716	154.	119.
60	.040	.00126	2.71	2.10	5/16	.3125	.0767	165.	127.
59	.041	.00132	2.84	2.20	O	.316	.0784	168.	130.
58	.042	.00138	2.97	2.30	P	.323	.0820	176.	136.
57	.043	.00145	3.12	2.42	21/64	.3281	.0846	182.	141.
56	.0465	.00170	3.66	2.84	Q	.332	.0866	186.	144.
3/64	.0469	.00173	3.73	2.89	R	.339	.0901	193.	150.
55	.0520	.00210	4.52	3.50	11/32	.3437	.0928	199.	154.
54	.0550	.0023	4.95	3.84	S	.348	.0950	204.	158.
53	.0595	.0028	6.03	4.67	T	.358	.1005	216.	167.
1/16	.0625	.0031	6.68	5.17	23/64	.3593	.1014	218.	169.
52	.0635	.0032	6.89	5.34	U	.368	.1063	228.	177.
51	.0670	.0035	7.54	5.84	3/8	.375	.1104	237.	184.
50	.070	.0038	8.18	6.34	V	.377	.1116	239.	185.
49	.073	.0042	9.04	7.01	W	.386	.1170	251.	194.
48	.076	.0043	9.26	7.17	25/64	.3906	.1198	257.	199.
5/64	.0781	.0048	10.3	8.01	X	.397	.1236	265.	205.
47	.0785	.0049	10.5	8.17	Y	.404	.1278	274.	212.
46	.081	.0051	11.	8.51	13/32	.4062	.1296	278.	215.
45	.082	.0053	11.4	8.84	Z	.413	.1340	288.	223.
44	.086	.0058	12.5	9.67	27/64	.4219	.1398	300.	232.
43	.089	.0062	13.4	10.3	7/16	.4375	.1503	322.	250.
42	.0935	.00687	14.8	11.4	29/64	.4531	.1613	346.	268.
3/32	.0937	.0069	14.9	11.5	15/32	.4687	.1726	370.	287.
41	.096	.0072	15.5	12.	31/64	.4843	.1843	395.	306.

Taladro	Dian. Int.	Dian. Superior	G.Natural 0,60 Sp.Gr.	Aire 0,60 Sp.Gr.	Taladro	Dian. Int.	Dian. Superior	G.Natural 0,60 Sp.Gr.	Aire 0,60 Sp.Gr.
40	.098	.0075	16.2	12.5	1/2	.50	.1963	421.	326.
39	.0995	.0078	16.8	13.	33/64	.5156	.2088	448.	347.
38	.1015	.0081	17.4	13.5	17/32	.5312	.2217	476.	368.
37	.104	.0085	18.3	14.2	35/64	.5468	.2349	504.	390.
36	.1065	.0090	19.4	15.	9/16	.5625	.2485	533.	413.
7/64	.1093	.0094	20.2	15.7	37/64	.5781	.2625	563.	436.
35	.110	.0095	20.5	15.8	19/32	.5937	.2769	594.	460.
34	.111	.0097	20.9	16.2	39/64	.6093	.2916	626.	485.
33	.113	.0100	21.5	16.7	5/8	.625	.3068	658.	510.
32	.116	.0106	22.8	17.7	41/64	.6406	.3223	691.	536.
31	.120	.0113	24.3	18.8	21/32	.6562	.3382	725.	562.
1/8	.125	.0123	26.4	20.4	43/64	.6718	.3545	760.	589.
30	.1285	.0130	27.9	21.6	11/16	.6875	.3712	796.	617.
29	.136	.0145	31.1	24.1	45/64	.7031	.3883	833.	645.
28	.1405	.0155	33.3	25.8	23/32	.7187	.4057	870.	674.
9/64	.1406	.0156	33.5	25.9	47/64	.7343	.4236	909.	704.
27	.144	.0163	35.	27.1	3/4	.750	.44179	948.	734.
26	.147	.0174	37.3	28.9	49/64	.7656	.46040	988.	765.
25	.1495	.0175	37.5	29.1	25/32	.7813	.47937	1029.	796.
24	.152	.0181	38.8	30.1	51/64	.7969	.49873	1070.	829.
23	.154	.0186	39.9	30.9	13/16	.8125	.51849	1112.	862.
5/32	.1562	.0192	41.2	31.9	53/64	.8281	.53862	1156.	895.
22	.157	.0193	41.4	32.1	27/32	.8438	.55914	1200.	929.
21	.159	.0198	42.5	32.9	55/64	.8594	.5800	1244.	964.
20	.161	.0203	43.6	33.7	7/8	.8750	.60132	1290.	999.
19	.166	.0216	46.3	35.9	29/32	.9062	.64504	1384.	1072.
18	.1695	.0226	48.5	37.6	15/16	.9375	.69029	1481.	1147.
11/64	.1719	.0232	49.8	38.6	31/32	.9688	.73708	1581.	1225.
17	.175	.0235	50.4	39.1	1	1.0	.7854	1685.	1305.
16	.177	.0246	52.8	40.9	1-1/16	1.063	.88664	1902.	1474.
15	.180	.0254	54.5	42.2	1-1/8	1.125	.99402	2133.	1652.
14	.182	.0260	55.8	43.2	1-3/16	1.188	1.1075	2376.	1841.
13	.185	.0269	57.7	44.7	1-1/4	1.250	1.2272	2633.	2040.
3/16	.1875	.0276	59.2	45.9.	1-5/16	1.313	1.3530	2903.	2249.
12	.189	.02805	60.2	46.6	1-3/8	1.375	1.4849	3186.	2468.
11	.191	.02865	61.5	47.6	1-1/2	1.5	1.7671	3791.	2937.
10	.1935	.0294	63.1	48.9	1-9/16	1.563	1.9174	4114.	3187.
9	.196	.0302	64.8	50.2	1-5/8	1.625	2.0739	4450.	3447.
8	.199	.0311	66.7	51.7	1-11/16	1.688	2.2365	4799.	3717.
7	.201	.0316	67.8	52.5	1-3/4	1.75	2.4053	5161.	3998.
13/64	.2031	.0324	69.5	53.8	1-13/16	1.813	2.5802	5536.	4288.
6	.204	.0327	70.2	54.3	1-7/8	1.875	2.7612	5924.	4589.
5	.2055	.0332	71.2	55.2	1-15/16	1.938	2.9498	6329.	4903.
4	.209	.0343	73.6	57.0	2	2.0	3.1416	6741.	5221.
					2-1/8	2.125	3.5466	7610.	5894.
					2-1/4	2.250	3.9761	8531.	6608.
					2-3/8	2.375	4.4301	9505.	7363.
					2-1/2	2.50	4.9087	10532.	8158.
					2-5/8	2.625	5.4119	11612.	8995.
					2-3/4	2.75	5.9396	12744.	9872.
					2-7/8	2.875	6.4918	13929.	10789.

Tabla 24. Capacidad del difusor en gases trabajando a baja presión (unidades inglesas) y con caída de presión del orificio de 2,49hPa y un coeficiente de descarga (C_d) de 1,0

Scfh Aire	1/2"	3/4"	1"	1-1/4"	1-1/2"	2"	2-1/2"	3"
40	0,7	—	—	—	—	—	—	—
50	1,2	—	—	—	—	—	—	—
100	5,2	1,2	—	—	—	—	—	—
200	20,9	4,7	1,2	—	—	—	—	—
300	45,6	10,5	3,0	0,7	—	—	—	—
400	—	18,7	5,2	1,2	—	—	—	—
500	—	29,4	8,2	2,0	1,0	—	—	—
600	—	42,1	11,7	2,7	1,2	—	—	—
700	—	—	15,9	3,7	1,7	—	—	—
800	—	—	20,7	5,0	2,2	—	—	—
900	—	—	26,2	6,2	2,7	0,7	—	—
1.000	—	—	32,4	7,7	3,5	1,0	—	—
1.500	—	—	—	17,4	8,0	2,0	0,7	—
2.000	—	—	—	30,9	13,9	3,5	1,5	—
3.000	—	—	—	—	31,4	8,0	3,2	1,0
4.000	—	—	—	—	—	14,4	5,5	2,0
5.000	—	—	—	—	—	22,4	8,7	3,0
6.000	—	—	—	—	—	32,4	12,5	4,2
7.000	—	—	—	—	—	43,8	17,2	5,7
8.000	—	—	—	—	—	—	22,4	7,5
9.000	—	—	—	—	—	—	28,1	9,5
10.000	—	—	—	—	—	—	34,9	11,7
12.000	—	—	—	—	—	—	50,3	16,9
14.000	—	—	—	—	—	—	—	22,9
16.000	—	—	—	—	—	—	—	29,9
18.000	—	—	—	—	—	—	—	37,9
20.000	—	—	—	—	—	—	—	46,8

Scfh Aire	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"
4.000	—	—	—	—	—	—	—	—
6.000	1,0	—	—	—	—	—	—	—
8.000	1,7	—	—	—	—	—	—	—
10.000	2,7	—	—	—	—	—	—	—
12.000	4,0	—	—	—	—	—	—	—
14.000	5,5	0,7	—	—	—	—	—	—
16.000	7,0	0,7	—	—	—	—	—	—
18.000	9,0	1,0	—	—	—	—	—	—
20.000	11,0	1,2	—	—	—	—	—	—
25.000	17,2	2,0	—	—	—	—	—	—
30.000	24,7	3,0	0,7	—	—	—	—	—
35.000	33,6	4,0	1,0	—	—	—	—	—
40.000	43,8	5,2	1,2	—	—	—	—	—
50.000	—	8,2	1,7	—	—	—	—	—
60.000	—	11,7	2,5	0,7	—	—	—	—
70.000	—	15,9	3,5	1,2	—	—	—	—
80.000	—	20,7	4,7	1,5	—	—	—	—
90.000	—	26,2	6,0	2,0	0,7	—	—	—
100.000	—	32,4	7,2	2,2	1,0	—	—	—
120.000	—	46,6	10,5	3,2	1,2	0,7	—	—
140.000	—	—	5,7	1,8	0,7	0,4	—	—
160.000	—	—	7,4	2,4	0,9	0,5	0,3	—
180.000	—	—	9,4	3,0	1,2	0,7	0,3	—
200.000	—	—	11,6	3,7	1,4	0,8	0,4	—

Scfh Aire	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"
250.000	—	—	45,3	14,4	5,5	3,2	1,5	0,7
300.000	—	—	—	20,9	8,0	4,7	2,2	1,2
350.000	—	—	—	28,4	11,0	6,2	3,2	1,5
400.000	—	—	—	37,1	14,2	8,2	4,0	2,0
450.000	—	—	—	46,8	17,9	10,5	5,2	2,7
500.000	—	—	—	—	22,4	13,0	6,5	3,2
550.000	—	—	—	—	26,9	15,4	7,7	4,0
600.000	—	—	—	—	32,1	18,4	9,2	4,7
650.000	—	—	—	—	37,6	21,7	11,0	5,5
700.000	—	—	—	—	43,6	25,2	12,5	6,2
800.000	—	—	—	—	—	32,9	16,4	8,2
900.000	—	—	—	—	—	41,6	20,7	10,5
1.000.000	—	—	—	—	—	51,3	25,7	13,0
1.100.000	—	—	—	—	—	—	31,1	15,7
1.200.000	—	—	—	—	—	—	36,9	18,7
1.300.000	—	—	—	—	—	—	43,3	21,9
1.400.000	—	—	—	—	—	—	50,3	25,4
1.600.000	—	—	—	—	—	—	—	33,1
1.800.000	—	—	—	—	—	—	—	41,8
2.000.000	—	—	—	—	—	—	—	51,8

Tabla 25. Pérdidas de presión de una tobera trabajando a baja presión en hPa por cada 30,5m de tubería de diámetro 40 para aire (unidades inglesas)

Gas Nat.	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1-1/4"	1-1/2"	2"
25	0,7	—	—	—	—	—	—
50	2,7	0,7	—	—	—	—	—
75	6,2	1,7	—	—	—	—	—
100	11,0	3,0	0,7	—	—	—	—
125	17,2	4,7	1,0	—	—	—	—
150	24,7	7,0	1,5	—	—	—	—
175	33,6	9,5	2,2	—	—	—	—
200	43,8	12,5	2,7	0,7	—	—	—
300	—	27,9	6,2	1,7	—	—	—
400	—	49,3	11,2	3,0	0,7	—	—
500	—	—	17,4	4,7	1,2	—	—
600	—	—	25,2	7,0	1,7	0,7	—
700	—	—	34,4	9,5	2,2	1,0	—
800	—	—	44,8	12,2	3,0	1,2	—
900	—	—	—	15,7	3,7	1,7	—
1.000	—	—	—	19,2	4,7	2,0	—
1.500	—	—	—	43,3	10,5	4,7	1,2
2.000	—	—	—	—	18,7	8,2	2,2
2.500	—	—	—	—	29,4	13,0	3,2
3.000	—	—	—	—	42,1	18,7	4,7
4.000	—	—	—	—	—	32,9	8,5
5.000	—	—	—	—	—	51,6	13,5
6.000	—	—	—	—	—	—	19,2
7.000	—	—	—	—	—	—	26,2
8.000	—	—	—	—	—	—	34,4
9.000	—	—	—	—	—	—	43,3

Gas Nat.	2-1/2"	3"	4"	6"	8"
2.000	0,7	—	—	—	—
2.500	1,2	—	—	—	—
3.000	2,0	0,7	—	—	—
4.000	3,2	1,0	—	—	—
5.000	5,2	1,7	—	—	—
6.000	7,5	2,5	—	—	—
7.000	10,2	3,5	0,7	—	—
8.000	13,5	4,5	1,0	—	—
9.000	16,9	5,7	1,5	—	—
10.000	20,9	7,0	1,7	—	—
12.000	30,1	10,0	2,5	—	—
14.000	40,9	13,7	3,5	—	—
16.000	—	17,9	4,5	—	—
18.000	—	22,7	5,5	0,7	—
20.000	—	27,9	7,0	0,7	—
22.000	—	33,9	8,2	1,0	—
24.000	—	40,1	10,0	1,0	—
26.000	—	47,1	11,7	1,2	—
28.000	—	—	13,5	1,5	—
30.000	—	—	15,4	1,7	—
35.000	—	—	21,2	2,5	—
40.000	—	—	27,4	3,0	0,7
45.000	—	—	34,9	4,0	0,7
50.000	—	—	43,1	5,0	1,0
55.000	—	—	52,1	6,0	1,2
60.000	—	—	—	7,0	1,5
70.000	—	—	—	9,5	2,0
80.000	—	—	—	12,5	2,7
90.000	—	—	—	15,7	3,5
100.000	—	—	—	19,4	4,2
110.000	—	—	—	23,4	5,2
120.000	—	—	—	27,9	6,0
130.000	—	—	—	32,9	7,2
140.000	—	—	—	38,1	8,2
150.000	—	—	—	43,8	9,5
200.000	—	—	—	—	16,9
250.000	—	—	—	—	26,4
300.000	—	—	—	—	38,1

Tabla 26. Pérdidas de presión de una tobera trabajando a baja presión en *hPa* por cada 30,5m de tubería de diámetro 40 para aire (unidades inglesas)

Modelo simplificado de la relación entre la mezcla de aire y gas y el tamaño de la tubería:

El sistema de mezcla de aire y gas y las tuberías debe estar dimensionado para proporcionar un flujo en una distribución de presión uniforme y sin pérdidas de presión excesivas en tránsito.

Hay dos factores que causan la pérdida de presión de aire y la consiguiente presión de las variaciones:

- La fricción en tuberías y codos

- Las pérdidas de presión de velocidad debido a los cambios de dirección.

En el trabajo de la combustión, las longitudes de tuberías son generalmente cortas (menos de 1,3m), pero a menudo tienen muchas curvas. Asumiendo que la presión se reduce en cada cambio de dirección y usando una tubería para baja presión, pueden pasar por alto otras pérdidas. En general, una presión de 75 a 125Pa es correcta en estos casos. Esto es equivalente a la velocidad del aire a unos 11 a 14m/s. Para otros gases, esta velocidad es inversamente proporcional a su densidad y, en consecuencia, el aumento de velocidades se puede admitir con gas natural, pero trabajando con otros gases como propano o butano, las tuberías deben ser dimensionadas para velocidades más bajas que la del aire.

La precisión de los medidores de tobera también es sensible a la velocidad de la tubería, por lo que se debe hacer un esfuerzo para mantener la presión por debajo de 75Pa en las mediciones.

La Figura 73 muestra la relación entre la velocidad, la presión y el flujo en diferentes tamaños de tubos para aire, gas natural, propano y butano. Debido a que la densidad relativa de la mayoría de las mezclas de gases con aire es cercana a la del aire, los conductos de mezcla pueden ser de un tamaño igual que las tuberías de aire. El error será insignificante.

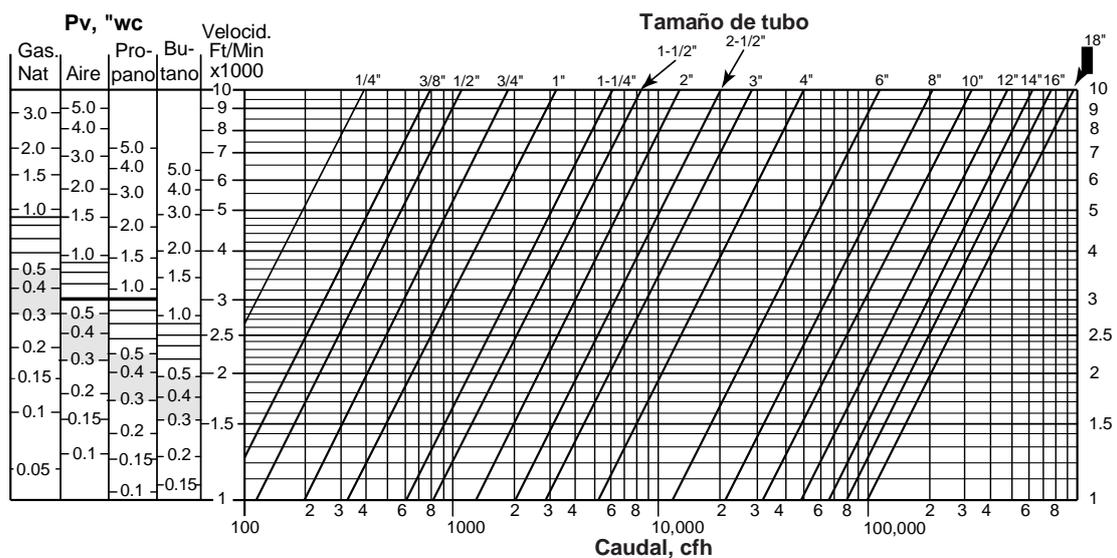


Figura 73. Relación entre la velocidad, la presión y el flujo en diferentes tamaños de tubos para aire, gas natural, propano y butano (unidades inglesas)

Método de dimensionado de los conductos de aire por el método de la igual superficie:

El método se basa en mantener constante el área total de la sección transversal de todas las partes de un tren de tuberías, independientemente del número de ramas que tenga cada parte. En el esquema siguiente (Figura 74), el método de igual superficie requiere que:

$$\text{Área de la zona X} = 2 \text{ veces el área de la zona Y} = 6 \text{ veces el área de Z}$$

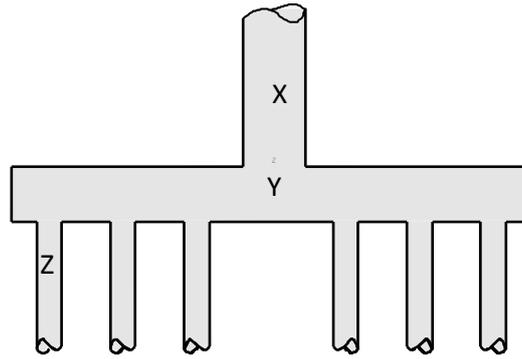


Figura 74. Dimensionamiento de los conductos de aire mediante el método de igual superficie

La ventaja de este método es que una vez que el tamaño de la rama más pequeña se ha determinado, a través de las presiones o mediante cualquier otro método válido, el resto del sistema de tubería se dimensiona sin ningún cálculo adicional. Se debe recordar, sin embargo, que si el cálculo de las ramas más pequeñas es erróneo, todo el sistema estará mal dimensionado (Tabla 27).

Tamaño de conexión	Número de ramas o conexiones							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1/4	1/4	3/8	1/2	3/4	3/4	1	1	1
3/8	3/8	3/4	3/4	1	1-1/4	1-1/4	1-1/4	1-1/4
1/2	1/2	3/4	1	1	1	1-1/4	1-1/2	2
3/4	3/4	1-1/4	1-1/4	1-1/2	2	2	2	2-1/2
1	1	1-1/4	2	2	2-1/2	2-1/2	3	3
1-1/4	1-1/4	2	2-1/2	3	3	4	4	4
1-1/2	1-1/2	2-1/2	3	3	4	4	4	6
2	2	3	4	4	6	6	6	6
2-1/2	2-1/2	4	4	6	6	6	6	6
3	3	4	6	6	8	8	8	8
4	4	6	8	8	10	10	10	12
6	6	8	10	12	14	16	18	18
8	8	12	14	16	18	20	20 o 24	24
10	10	14	18	20	24	24	30	30

Tabla 27. Cálculo de la dimensión de las tuberías de aire mediante el método de igual superficie (unidades inglesas)

La potencia del ventilador aumenta con el flujo de aire que se suministra y la presión (Tabla 28, Tabla 29 y Tabla 30). Las cuatro ecuaciones siguientes se pueden utilizar para predecir el consumo de potencia del ventilador. Difieren en las unidades de trabajo. El término eficiencia es la eficiencia global del ventilador - una combinación de la del ventilador, el motor y la del tren de mando.

$$Potencia = \frac{scfm \text{ hPa}}{2.552 \text{ eficiencia}}$$

$$Potencia = \frac{scfm\ osi}{3.670\ eficiencia}$$

$$Potencia = \frac{scfh\ hPa}{153.100\ eficiencia}$$

$$Potencia = \frac{scfh\ osi}{220.200\ eficiencia}$$

Presión Medida hPa	Presión Absoluta hPa	Densidad Kg/m3	Densidad Relativa	Volumen Específico m3/kg
0	1.014	1,201	1,000	0,832
69	1.082	1,283	1,068	0,779
138	1.151	1,365	1,136	0,733
207	1.220	1,447	1,204	0,691
276	1.289	1,528	1,272	0,654
345	1.358	1,610	1,340	0,621
689	1.703	2,019	1,680	0,495
1.034	2.048	2,427	2,020	0,412
1.379	2.392	2,836	2,361	0,353
1.724	2.737	3,245	2,701	0,308
2.068	3.082	3,653	3,041	0,274
2.413	3.427	4,062	3,381	0,246
2.758	3.771	4,470	3,721	0,224
3.103	4.116	4,879	4,061	0,205
3.447	4.461	5,288	4,401	0,189
4.137	5.150	6,105	5,082	0,164
4.826	5.840	6,922	5,762	0,144
5.516	6.529	7,739	6,442	0,129
6.205	7.219	8,557	7,122	0,117
6.895	7.908	9,374	7,802	0,107
8.618	9.632	11,417	9,503	0,088
10.342	11.356	13,460	11,204	0,074
12.066	13.079	15,504	12,905	0,065
13.790	14.803	17,547	14,605	0,057
17.237	18.250	21,633	18,007	0,046
20.684	21.698	25,719	21,408	0,039
27.579	28.593	33,892	28,211	0,030
34.474	35.487	42,065	35,014	0,024

Tabla 28. Efecto de la presión en el aire (condición básica de 21,1°C de aire seco al nivel del mar y presión barométrica 1.013hPa)

Temp. °C	Ratio Temp. Absol.	Densidad Kg/m3	Densidad Específica	Volumen Específico m3/kg	Temp. °C	Ratio Temp. Absol.	Densidad Kg/m3	Densidad Específica	Volumen Específico m3/kg
-51	0,755	1,592	1,325	0,628	271	1,849	0,650	0,541	1,539
-40	0,793	1,516	1,262	0,660	277	1,868	0,643	0,535	1,555
-34	0,811	1,481	1,233	0,675	282	1,887	0,637	0,530	1,571
-29	0,830	1,447	1,205	0,691	288	1,906	0,630	0,525	1,586
-23	0,849	1,415	1,178	0,707	293	1,925	0,624	0,520	1,602
-18	0,868	1,384	1,152	0,722	299	1,943	0,618	0,515	1,618
-7	0,906	1,326	1,104	0,754	304	1,962	0,612	0,510	1,633
4	1,019	1,179	0,981	0,848	310	1,981	0,606	0,505	1,649
16	0,981	1,224	1,019	0,817	316	2,000	0,601	0,500	1,665
21	1,000	1,201	1,000	0,832	321	2,019	0,595	0,495	1,680
27	0,943	1,179	1,060	0,848	327	2,038	0,590	0,491	1,696
32	1,038	1,158	0,964	0,864	332	2,057	0,584	0,486	1,712
38	1,057	1,137	0,946	0,880	338	2,075	0,579	0,482	1,727
43	1,075	1,117	0,930	0,895	343	2,094	0,574	0,477	1,743
49	1,094	1,098	0,914	0,911	349	2,113	0,568	0,473	1,759
54	1,113	1,079	0,898	0,927	354	2,132	0,564	0,469	1,775
60	1,132	1,061	0,883	0,942	360	2,151	0,559	0,465	1,790
66	1,151	1,044	0,869	0,958	366	2,170	0,554	0,461	1,806
71	1,170	1,027	0,855	0,974	371	2,189	0,549	0,457	1,822
77	1,189	1,011	0,841	0,989	377	2,208	0,544	0,453	1,838
82	1,208	0,995	0,828	1,005	382	2,226	0,540	0,449	1,853
88	1,226	0,980	0,815	1,021	388	2,245	0,535	0,445	1,869
93	1,245	0,965	0,803	1,036	393	2,264	0,531	0,442	1,884
99	1,264	0,950	0,791	1,052	399	2,283	0,526	0,438	1,900
104	1,283	0,936	0,779	1,068	404	2,302	0,522	0,434	1,916
110	1,302	0,923	0,768	1,084	410	2,321	0,518	0,431	1,932
116	1,321	0,910	0,757	1,099	416	2,340	0,514	0,427	1,947
121	1,340	0,897	0,747	1,115	421	2,358	0,509	0,424	1,963
127	1,358	0,884	0,736	1,131	427	2,377	0,505	0,421	1,979
132	1,377	0,872	0,726	1,147	441	2,425	0,495	0,412	2,018
138	1,396	0,861	0,716	1,162	454	2,472	0,486	0,405	2,058
143	1,415	0,849	0,707	1,178	468	2,519	0,477	0,397	2,096
149	1,434	0,838	0,697	1,194	482	2,566	0,468	0,390	2,136
154	1,453	0,827	0,688	1,209	496	2,613	0,460	0,383	2,175
160	1,472	0,816	0,679	1,225	510	2,660	0,452	0,376	2,215
166	1,491	0,806	0,671	1,241	524	2,708	0,444	0,369	2,254
171	1,509	0,796	0,663	1,256	538	2,755	0,436	0,363	2,293
177	1,528	0,786	0,654	1,272	552	2,802	0,429	0,357	2,332
182	1,547	0,777	0,646	1,288	566	2,849	0,420	0,350	2,380
188	1,566	0,767	0,639	1,304	593	2,943	0,408	0,340	2,450
193	1,585	0,758	0,631	1,319	621	3,033	0,395	0,329	2,528
199	1,604	0,749	0,623	1,335	649	3,132	0,384	0,319	2,607
204	1,623	0,740	0,616	1,351	677	3,226	0,372	0,310	2,685
210	1,642	0,732	0,609	1,366	704	3,321	0,362	0,301	2,764
216	1,660	0,724	0,602	1,382	732	3,415	0,352	0,293	2,843
221	1,679	0,715	0,595	1,398	760	3,509	0,342	0,285	2,921
227	1,698	0,708	0,589	1,413	816	3,698	0,325	0,270	3,078
232	1,717	0,700	0,582	1,429	871	3,887	0,309	0,257	3,235
238	1,736	0,692	0,576	1,445	927	4,075	0,295	0,245	3,393
243	1,755	0,685	0,570	1,461	982	4,264	0,282	0,235	3,549
249	1,774	0,677	0,564	1,476	1.038	4,453	0,270	0,225	3,707
254	1,792	0,670	0,558	1,492	1.093	4,642	0,259	0,215	3,863
260	1,811	0,663	0,552	1,508	1.149	4,830	0,249	0,207	4,020
266	1,830	0,656	0,546	1,523	1.204	5,019	0,239	0,199	4,179

Tabla 29. Efecto de la temperatura en el aire (condición básica de 21,1°C de aire seco al nivel del mar y presión barométrica 1.013hPa)

Altura m	Presión hPa	Densidad Kg/m ³	Densidad Relativa	Volumen Específico m ³ /kg
0	1.013	1,201	1,000	0,832
152	993	1,180	0,980	0,848
305	979	1,159	0,960	0,863
457	958	1,137	0,950	0,879
610	945	1,117	0,930	0,895
762	924	1,097	0,910	0,912
914	910	1,076	0,900	0,929
1.067	889	1,057	0,880	0,946
1.219	876	1,038	0,860	0,964
1.372	862	1,018	0,850	0,982
1.524	841	0,999	0,830	1,001
1.676	827	0,981	0,820	1,019
1.829	814	0,963	0,800	1,039
1.981	800	0,945	0,790	1,058
2.134	779	0,927	0,770	1,079
2.286	765	0,910	0,760	1,099
2.438	752	0,892	0,740	1,121
2.591	738	0,875	0,730	1,142
2.743	724	0,858	0,710	1,165
2.896	710	0,842	0,700	1,187
3.048	696	0,826	0,690	1,210
4.572	572	0,678	0,560	1,475
6.096	466	0,552	0,460	1,811

Tabla 30. Efecto de la altura en el aire (condición básica de 21,1°C de aire seco al nivel del mar y presión barométrica 1.013hPa)

Las propiedades caloríficas del gas natural utilizado se pueden seguir en la Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33.

Tipo de Gas	Cont. kJ	Dens. Relat.	Mez.Equiv. Butano /aire kJ	Dens. Relat.
Gas agua carburatada	546	0,65	747	1,20
Mezcla agua y horno de coque	559	0,46	918	1,25
Horno de coque	622	0,42	1.116	1,31
Natural	950	0,56	1.456	1,41
Natural	1.108	0,60	1.635	1,46
Natural	1.203	0,65	1.772	1,50

Tabla 31. Equivalencia en kJ de la mezcla butano-aire

Composición y características	Gas de Libia	Gas de Argelia
Metano CH ₄ (%Vol.)	85,97	91,88
Etano C ₂ H ₆ (%Vol.)	12,88	6,78
Propano C ₃ H ₈ (%Vol.)	0,37	0,64
Butanos C ₄ H ₁₀ (%Vol.)	0,05	0,09
Pentanos C ₅ H ₁₂ (%Vol.)	-	-
Hexanos C ₆ H ₁₄ (%Vol.)	-	-
Dióxido de carbono CO ₂ (%Vol.)	-	-
Nitrógeno N ₂ (%Vol.)	0,75	0,61
PCS (Kcal/Nm ³)	10.462	10.084
PCI (Kcal/Nm ³)	9.468	9.088
Peso específico (Kg/Nm ³)	0,81	0,77
Densidad relativa	0,63	0,60
CO ₂ total en humos (m ³ /m ³ gas)	1,13	1,08
N ₂ total en humos (m ³ /m ³ gas)	8,32	8,02
Volumen tot. humos secos (m ³ /m ³ gas)	9,45	9,09
Índice de Wobbe	13.230	13.037

Tabla 32. Propiedades caloríficas del gas natural

kJ/m ³ de la mezcla	MEZCLA BUTANO/AIRE				MEZCLA BUTANO/AIRE			
	Porcentaje de Propano por Vol.	Porcentaje de Aire por Vol.	Porcentaje de Oxígeno por Vol. (Orsat)	Densidad Relativa de la mezcla	Porcentaje de Butano por Vol.	Porcentaje de Aire por Vol.	Porcentaje de Oxígeno por Vol. (Orsat)	Densidad Relativa de la mezcla
119.229	—	—	—	—	100,00	0,00	0,000	1,950
117.366	—	—	—	—	98,44	1,56	0,328	1,935
115.503	—	—	—	—	96,88	3,12	0,656	1,920
113.640	—	—	—	—	95,32	4,68	0,984	1,905
111.777	—	—	—	—	93,75	6,25	1,312	1,891
109.914	—	—	—	—	92,20	7,80	1,643	1,875
108.051	—	—	—	—	90,62	9,38	1,967	1,861
106.188	—	—	—	—	89,08	10,92	2,297	1,846
104.325	—	—	—	—	87,51	12,49	2,625	1,831
102.462	—	—	—	—	85,95	14,05	2,953	1,817
100.599	—	—	—	—	84,38	15,62	3,280	1,802
98.736	—	—	—	—	82,82	17,18	3,612	1,786
96.873	—	—	—	—	81,25	18,75	3,935	1,771
95.010	100,00	0,00	0,000	1,523	79,70	20,30	4,268	1,755
93.147	98,04	1,96	0,409	1,513	78,18	21,82	4,590	1,744
91.284	96,08	3,92	0,819	1,502	76,58	23,42	4,921	1,728
89.421	94,12	5,88	1,288	1,492	75,00	25,00	5,249	1,712
87.559	92,16	7,84	1,639	1,482	73,44	26,56	5,576	1,698
85.696	90,19	9,81	2,050	1,472	71,86	28,14	5,899	1,683
83.833	88,24	11,76	2,458	1,461	70,30	29,70	6,238	1,668
81.970	86,27	13,73	2,869	1,451	68,79	31,21	6,561	1,653
80.107	84,31	15,69	3,279	1,441	67,20	32,80	6,889	1,638
78.244	82,35	17,65	3,688	1,431	65,63	34,37	7,219	1,623
76.381	80,39	19,61	4,098	1,420	64,09	35,91	7,548	1,608
74.518	78,43	21,56	4,506	1,410	62,52	37,48	7,869	1,593
72.655	76,47	23,53	4,918	1,400	60,96	39,04	8,200	1,579
70.792	74,51	25,49	5,317	1,390	59,38	40,62	8,542	1,564

	MEZCLA BUTANO/AIRE				MEZCLA BUTANO/AIRE			
68.929	72,55	27,45	5,737	1,379	57,87	42,13	8,868	1,550
67.066	70,58	29,42	6,149	1,369	56,25	43,75	9,162	1,535
65.203	68,62	31,38	6,558	1,359	54,69	45,31	9,500	1,520
63.340	66,67	33,33	6,964	1,349	53,17	46,83	9,850	1,505
61.477	64,70	35,30	7,378	1,338	51,60	48,40	10,180	1,490
59.614	62,74	37,26	7,787	1,328	50,00	50,00	10,488	1,475
57.751	60,78	39,22	8,197	1,318	48,50	51,50	10,817	1,461
55.888	58,82	41,18	8,606	1,308	46,92	53,08	11,130	1,446
54.025	56,86	43,14	9,016	1,297	45,35	54,65	11,490	1,431
52.163	54,90	45,10	9,246	1,287	43,75	56,25	11,810	1,416
50.300	52,94	47,06	9,835	1,277	42,22	57,78	12,130	1,401
48.437	50,98	49,02	10,245	1,267	40,60	59,40	12,481	1,386
46.574	49,02	50,98	10,654	1,256	39,09	60,91	12,795	1,371
44.711	47,06	52,94	11,064	1,246	37,50	62,50	13,137	1,356
42.848	45,09	54,91	11,476	1,236	35,92	64,08	13,462	1,340
40.985	43,13	56,87	11,886	1,226	34,38	65,62	13,787	1,326
39.122	41,17	58,83	12,295	1,215	32,80	67,21	14,100	1,312
37.259	39,21	60,79	12,705	1,205	31,25	68,75	14,412	1,296
35.396	37,25	62,75	13,115	1,195	29,75	70,25	14,775	1,282
33.533	35,29	64,71	13,524	1,185	28,20	71,80	15,100	1,266
31.670	33,33	66,67	13,934	1,174	26,55	73,45	15,425	1,252
29.807	31,37	68,63	14,344	1,164	25,00	75,00	15,712	1,237
27.944	29,41	70,59	14,753	1,154	23,50	76,50	16,081	1,223
26.081	27,45	72,55	15,163	1,144	21,88	78,12	16,400	1,206
24.218	25,49	74,51	15,573	1,133	20,38	79,62	16,750	1,194
22.355	23,53	76,47	15,982	1,123	18,75	81,25	17,081	1,178
20.492	21,56	78,44	16,394	1,113	17,25	82,75	17,412	1,163
18.629	19,61	80,39	16,892	1,103	15,63	84,37	17,712	1,148
16.767	17,65	82,35	17,211	1,092	14,13	85,87	18,081	1,135
14.904	15,69	84,31	17,621	1,082	12,50	87,50	18,375	1,120
13.041	13,73	86,27	18,031	1,072	11,00	89,00	18,687	1,105
11.178	11,76	88,24	18,442	1,062	9,38	90,62	19,031	1,089
9.315	9,80	90,20	18,852	1,051	7,75	92,25	19,313	1,074
7.452	7,84	92,16	19,261	1,041	6,25	93,75	19,687	1,059
5.589	5,88	94,12	19,670	1,031	4,75	95,25	20,000	1,045
3.726	3,92	96,08	20,081	1,021	3,13	96,87	20,342	1,029

Tabla 33. Especificaciones de la mezcla gas y aire

En los siguientes párrafos analizaremos la transferencia de calos en el equipo quemador. El ajuste para la optimización de un quemador de gas es complejo. Hay muchos elementos que determinan u transferencia de calor: tasas de producción, dimensiones del horno, aislamiento, etc. Un balance de calor consiste en calcular los requisitos de carga de calor y la adición de las pérdidas a los mismos para determinar la entrada de calor necesaria.

Los términos utilizados en el cálculo del balance térmico (Figura 75) y sus definiciones, son:

- Entrada de calor bruto: cantidad total de calor consumido por el quemador. Es igual a la cantidad de combustible quemado multiplicado por su poder calorífico.

- Calor disponible: calor que está disponible para el horno y su carga de trabajo. Serán igual a la entrada bruta menos las pérdidas por los gases de combustión.
- Pérdidas por los gases de combustión: calor contenido en los gases de combustión a medida que salen del horno.
- Calor almacenado: calor absorbido por los componentes de aislamiento y estructurales de la caldera o el horno para elevarlos a la temperatura de funcionamiento. Este calor acumulado se convierte en una pérdida cada vez que se enfría el quemador, porque tiene que ser remplazado en el siguiente arranque. La acumulación de calor por lo general puede ser ignorada en condiciones de poca variación de temperatura, fuera de ciclos de arranque y paro.
- Pérdidas en la pared: calor conducido a través de las paredes, el techo y el piso del horno debido a la diferencia de temperatura entre el interior y exterior (Tabla 34 y Tabla 35). A una temperatura constante, las pérdidas de pared permanecerán constantes, independientemente de la tasa de producción.
- Pérdidas por radiación (Figura 76): las pérdidas de calor del horno por calor radiante se escapan a través de aberturas en las paredes, puertas, etc.
- Las pérdidas de transporte de calor: que está almacenado en dispositivos de transporte tales como elementos del horno, cintas transportadoras, etc. y que se pierde cuando la cinta transportadora calentada se retira del horno.
- La producción neta: Es el calor que finalmente llega al producto en el horno.

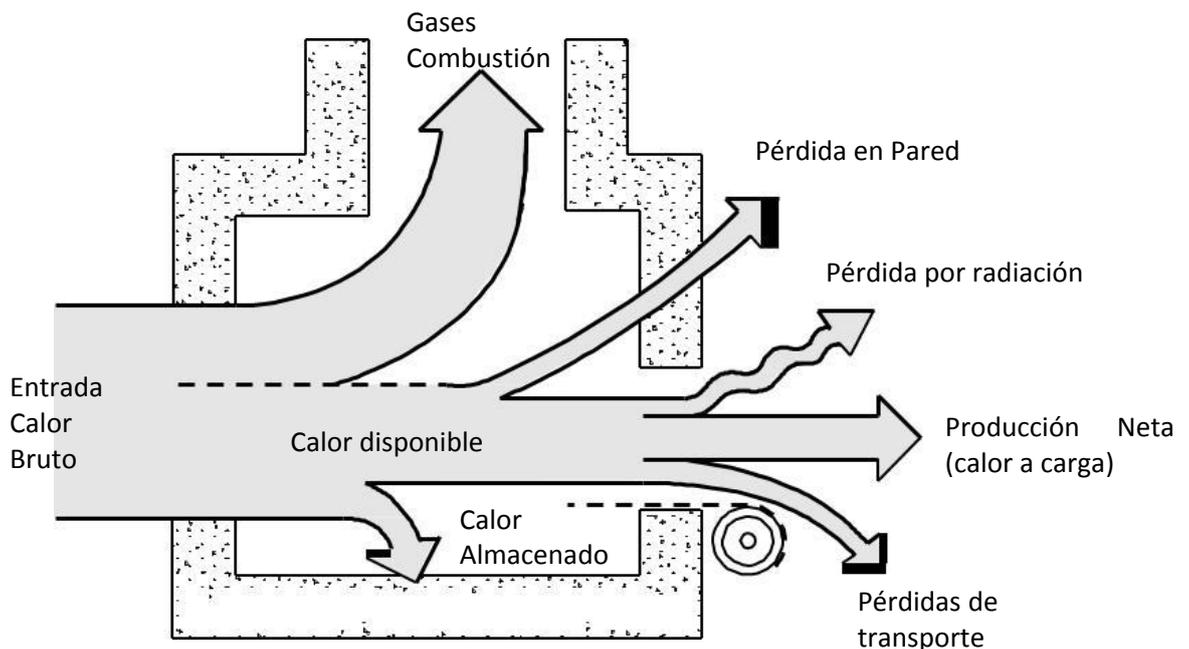


Figura 75. Balance térmico en un quemador de gas

Cálculos de transferencia de calor para un quemador

$$\begin{aligned}
 & \text{Calor de entrada Bruto en carga (kJ/h)} \\
 & = \text{Calor de carga} + \text{Pérdidas de pared} + \text{Pérdidas por radiación} \\
 & + \text{Pérdidas de transporte}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Calor de entrada Bruto en vacío (kJ/h)} \\
 & = \text{Pérdidas de pared} + \text{Pérdidas por radiación}
 \end{aligned}$$

$$\text{Grado de cobertura del horno} = \frac{\text{Calor de entrada Bruto en carga}}{\text{Calor de entrada Bruto en vacío}}$$

$$\text{Eficiencia térmica teórica (\%)} = 100 \frac{\text{Calor de carga}}{\text{Calor de entrada Bruto en carga}}$$

donde:

Calor de carga

$$\text{Calor de carga} = \text{kg por hora} \cdot \text{Calor específico} \cdot \text{Aumento de la temperatura}$$

	Densidad (kg/m ³ a 15,5°C)	Calor específico (kJ/kg a 15,5°C)	Punto de fusión (°C)
Yeso	2.323	1,084	1.360
Cemento refractario KILOCALOR K-1025	2.403	1,507	-

Tabla 34. Propiedades térmicas de los materiales que intervienen en la transferencia de calor

Pérdidas de pared

$$\text{Pérdidas de pared} = \text{Superficie interior} \cdot \text{Calor perdido (kJ/m}^2/\text{h)}$$

Temperatura cara caliente (°C)	982,2
Temperatura cara fría (°C)	221,1
Calor perdido (kJ/h)	1,372
Calor almacenado (kJ/h)	15,636

Tabla 35. Propiedades térmicas del material KILOCALOR K-1025 aplicado en una capa de 114,3mm

Pérdidas de calor por radiación:

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas por radiación} \\ = \text{Superficie de apertura} \cdot \text{Tasa de radiación del cuerpo negro} \\ \cdot \text{Factor de forma} \end{aligned}$$

Normalmente se asume un factor de forma de 1.

Pérdidas por transporte:

Se tratarán estas pérdidas como como si fueran una carga del horno.

Pérdidas por transporte

$$= \text{Ritmo de calentamiento del transporte en } \frac{kg}{h} \cdot \text{Calor específico} \cdot (\text{Temperatura de salida del horno} - \text{Temperatura de entrada})$$

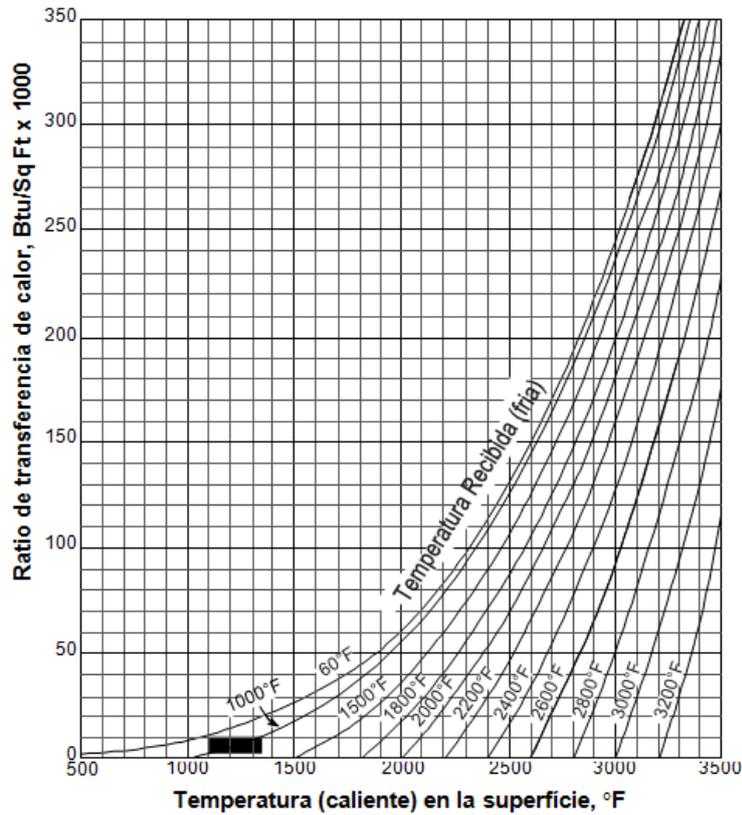


Figura 76. Radiación del cuerpo negro

Otro aspecto importante para el ajuste del quemador es el análisis de la emisión de gases (humos) del mismo.

Parámetros a conocer de proceso

- Flujo de caudal de humos, scfm o acfm. (Si se usa acfm, se deberá especificar la temperatura a la cual se mide el flujo. Es necesario conocer el flujo máximo y mínimo.
- Temperatura de los humos a la entrada del quemador en las tasas de flujo máximo y mínimo.
- Contenido de oxígeno de los gases.
- Cantidad de partículas u otro material no volátil en la corriente de gases.
- Temperatura de incineración requerida, por lo general de 650-815°C para aplicaciones en anhidrita
- Tiempo de residencia requerido en la cámara de combustión, por lo general, de 0,3 a 0,7 segundos.

Tipo de quemador:

Existen dos tipos básicos de quemadores. Los quemadores de gas crudo, que obtienen su aire de combustión de la corriente de gases entrante, y los quemadores de aire fresco, que lo obtienen de una fuente externa.

Los quemadores de gas en bruto permiten una mayor eficiencia de combustión, pero no pueden ser utilizados en todas las condiciones de operación. La Tabla 36 da algunas pautas generales para la selección del quemador.

Factor de selección	Gas Crudo	Aire fresco
Contenido de O ₂ emitido en humos	18-21%	SI
	13-18%	Depende
	<13%	NO
Temperatura de aire entrante	>593°C	Depende
	<593°C	NO
Nº de partículas no volátiles en humos	No	SI
	Bajo	Posiblemente
	Alto	Comprobar

Tabla 36. Selección de un quemador

Cálculo de la entrada del quemador

Para los quemadores de gas en bruto, se usa el gráfico de la Figura 77. Para los quemadores de aire fresco se usará el de la Figura 78.

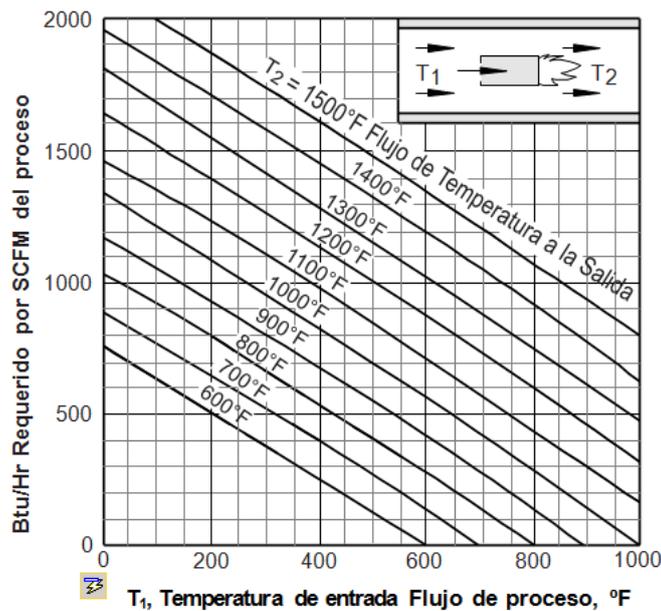


Figura 77. Requisitos térmicos para un quemador de gas en bruto

Si el quemador usara parte de su aire de combustión procedente de la corriente de humos y el resto de una fuente externa, la entrada de calor se puede evaluar con la fórmula:

$$B \text{ (parte de aire fresco)} = B_r + \frac{\% \text{ Aire fresco de Combustión}}{100} (B_f - B_r)$$

Donde B_f será la entrada de calor con 100% de aire fresco en kJ/h y B_r la entrada de calor en condiciones actuales

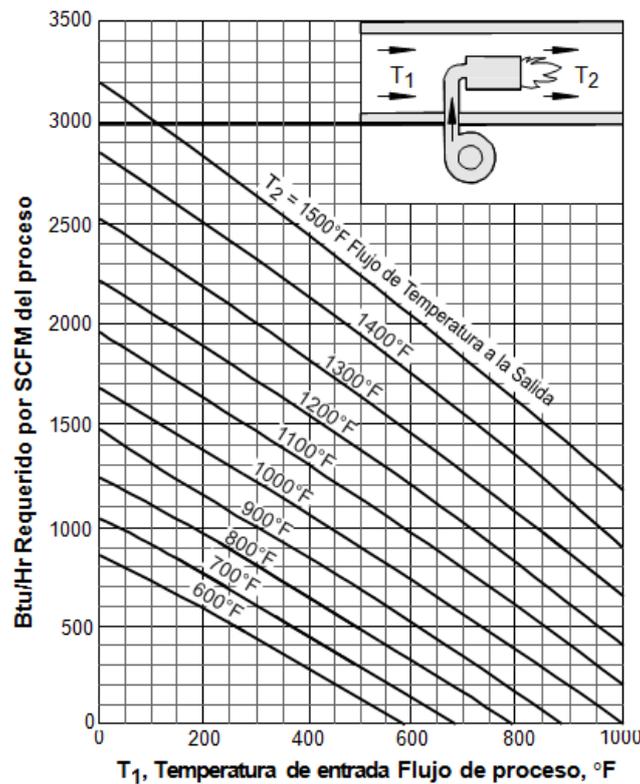


Figura 78. Requisitos térmicos para un quemador de aire fresco

Dimensionamiento de placas de perfil

Si el quemador es del tipo que se coloca dentro del conducto de humos, tendrá que estar rodeado por una placa de perfil. Los humos son forzados a pasar a través de la espacio entre la placa de perfil y el quemador, asegurando que se mezclan completamente con la llama del quemador.

Para calcular el tamaño de la brecha de perfil, se necesita saber:

- La temperatura de la corriente de los gases que pasan sobre el quemador,
- La caída de presión de la corriente de humos necesaria a través de la brecha a favor de perfil tal como se ha visto en la parte anterior de selección de perfiles.

$$\text{Espacio del perfil (m}^2\text{)} = \frac{\text{Caudal de humos acfm}}{\text{Velocidad de humos } \left(\frac{\text{m}}{\text{min}}\right)}$$

Combustión de gas con exceso de aire:

El grafico de la Figura 79 calcula las curvas para el gas natural en diferentes condiciones de exceso de aire.

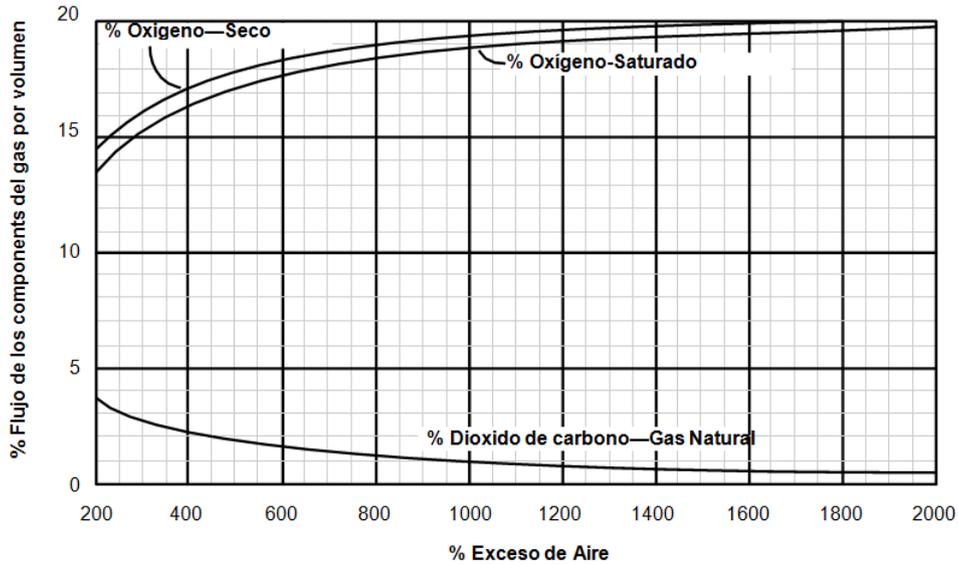


Figura 79. Comportamiento de los componentes de los gases de combustión del gas natural frente al exceso de aire (%)

Pre calentamiento de aire:

Tanto la entrada de aire caliente y el enriquecimiento del mismo en oxígeno aumentan la temperatura teórica de llama de un quemador. Los gráficos de la Figura 80 y Figura 81 muestran el efecto de la temperatura teórica de llama de gas natural en la variación de estos parámetros

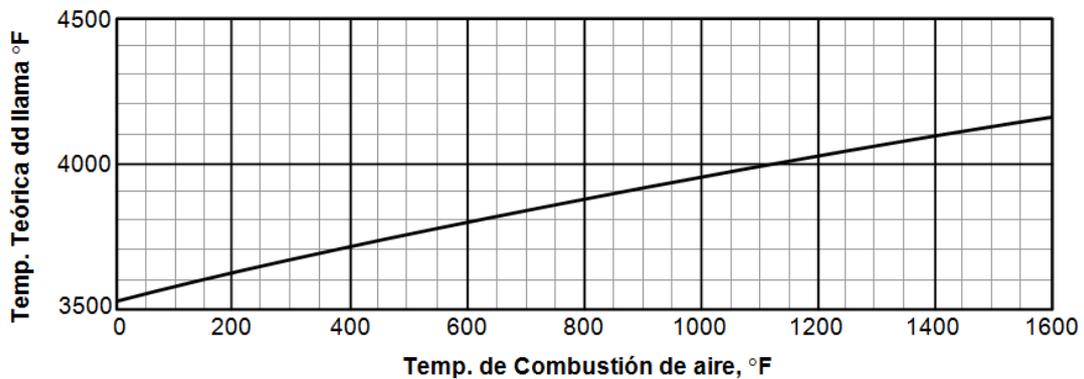


Figura 80. Temperatura teórica de llama vs Pre calentamiento

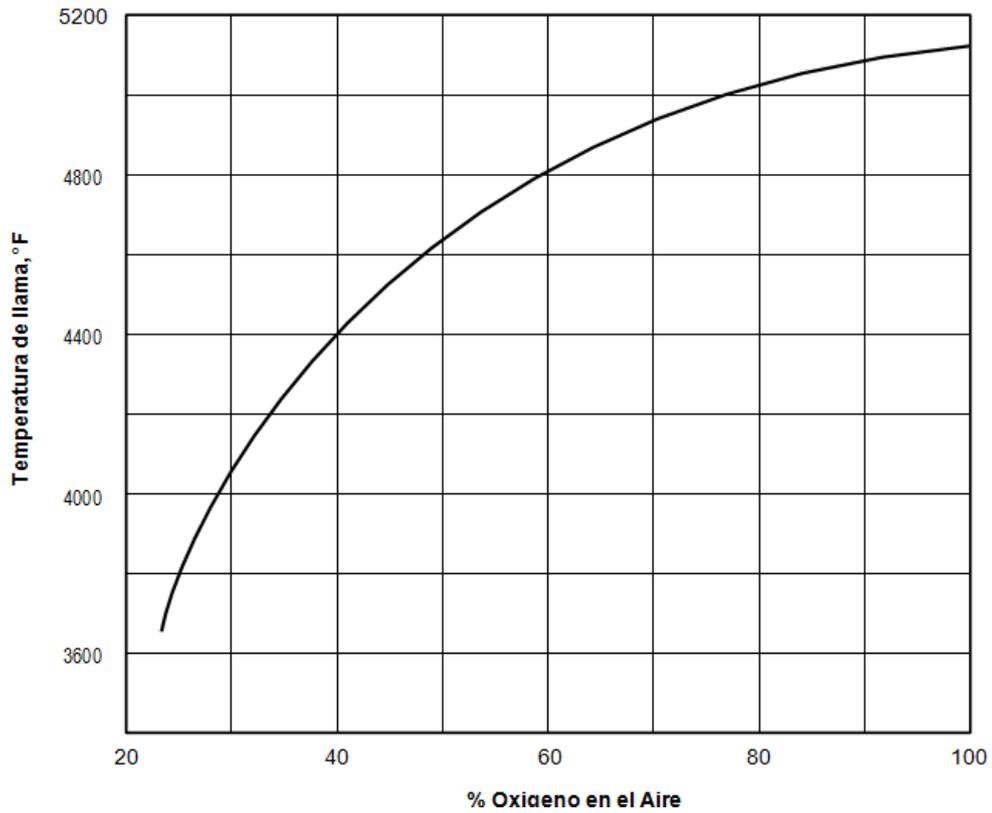


Figura 81. Temperatura teórica de llama vs el porcentaje de O₂ del aire

3.1.3 Proceso de fabricación de anhídrita

A continuación se realiza un análisis más detallado del que se avanzó en el estado del arte sobre el proceso seguido para la fabricación de anhídrita en el contexto de una planta de fabricación de yeso. La Figura 82 muestra el proceso completo.

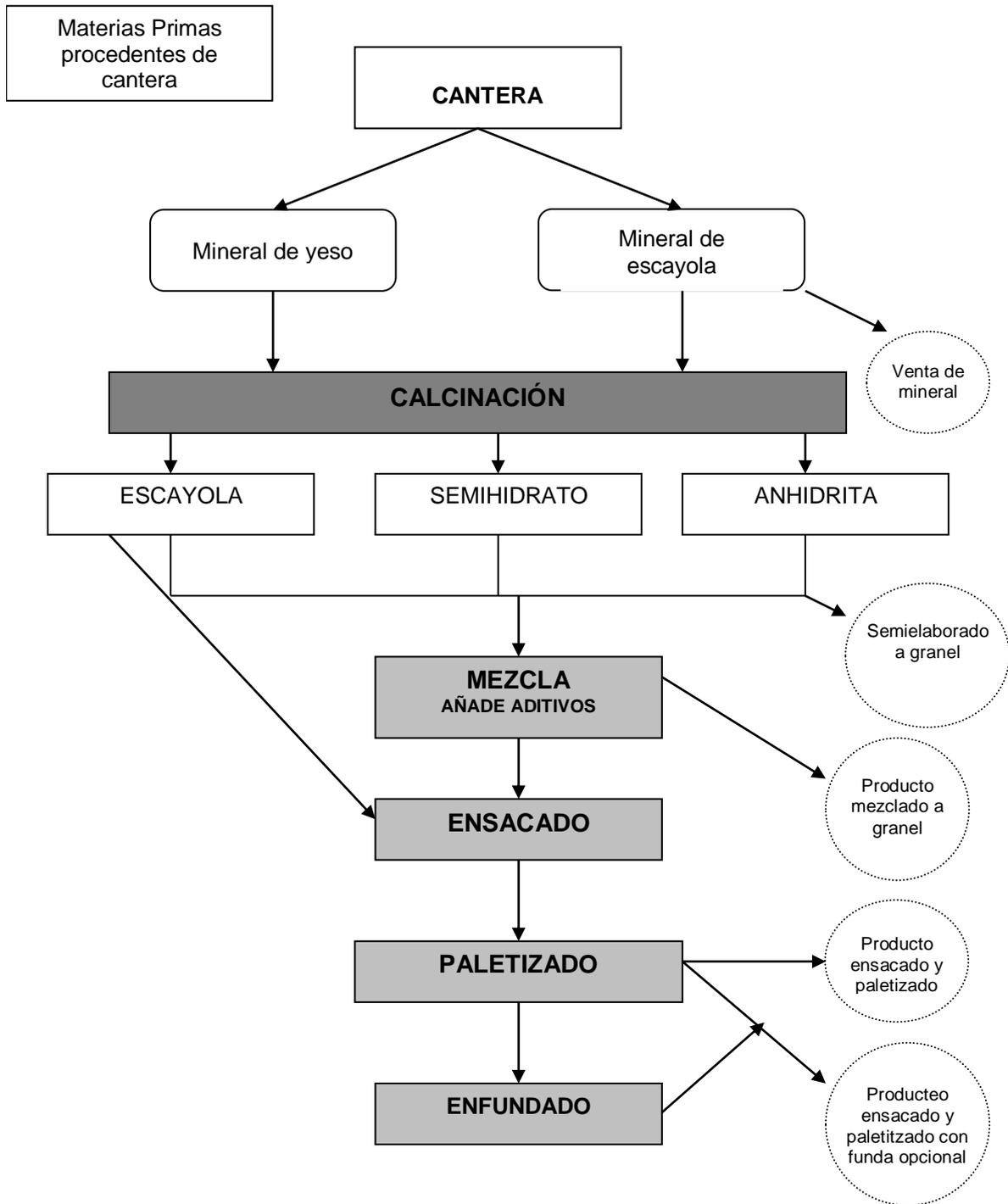


Figura 82. Esquema de proceso de una planta de fabricación de yeso en polvo

3.1.3.1 Proceso de entrada de material y molienda primaria

El principal objetivo será el de controlar el mineral procedente de cantera y poder asegurar así la calidad de la materia prima del proceso de producción.

El proceso empieza en la recepción del mineral procedente de cantera a una granulometría no apta para la alimentación del horno. A continuación se alimenta un molino de forma controlada. Este tiene como misión moler y adecuar la granulometría del mineral a la de entrada al horno. Una vez triturado, mediante cintas y elevadores se transporta el mineral a los silos de entrada al horno.

Se considera parámetro de control, la riqueza en $\text{Ca} (\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, cuyo valor optimo se especificará en las condiciones de calidad del material en crudo.

Se consideran equipos e instalaciones asociados a este proceso:

- Alimentador: Elemento mecánico que a través de un movimiento alimenta al molino (Figura 83).
- Silos: Elemento para almacenar.
- Cintas: Elementos de transporte horizontal o inclinado de mineral.
- Elevadores varios: Elementos de transporte vertical de mineral.
- Molino: Elemento mecánico que disminuye el tamaño de partícula de la salida respecto al de la entrada (Figura 84).



Figura 83. Vista de la tolva de material de entrada al proceso



Figura 84. Vista de molino primario de yeso

En el laboratorio se analiza la pérdida de agua de cristalización y la granulometría del mineral, con la periodicidad y tolerancias indicadas en las condiciones de calidad del material en crudo.

Definimos:

- Estériles: Presencia de objetos que no son mineral. Ej. : Plásticos, arcillas e otros.
- Granulometría: Tamaño del grano del mineral una vez machacado.
- Stock: Producto que se guarda para posterior utilización.

El esquema completo del proceso se aprecia en la Figura 85, con la siguiente anotación:

1. El mineral de yeso seleccionado en cantera, llega a fábrica en un tamaño de 0-20 cm. Se vacía en una tolva en fábrica para entrar en la molienda saliendo el mineral a tamaño 0-1,5 cm. El mineral sube por unas cintas hasta una serie de 6 silos agrupados en 2 secciones de tres silos cada una.

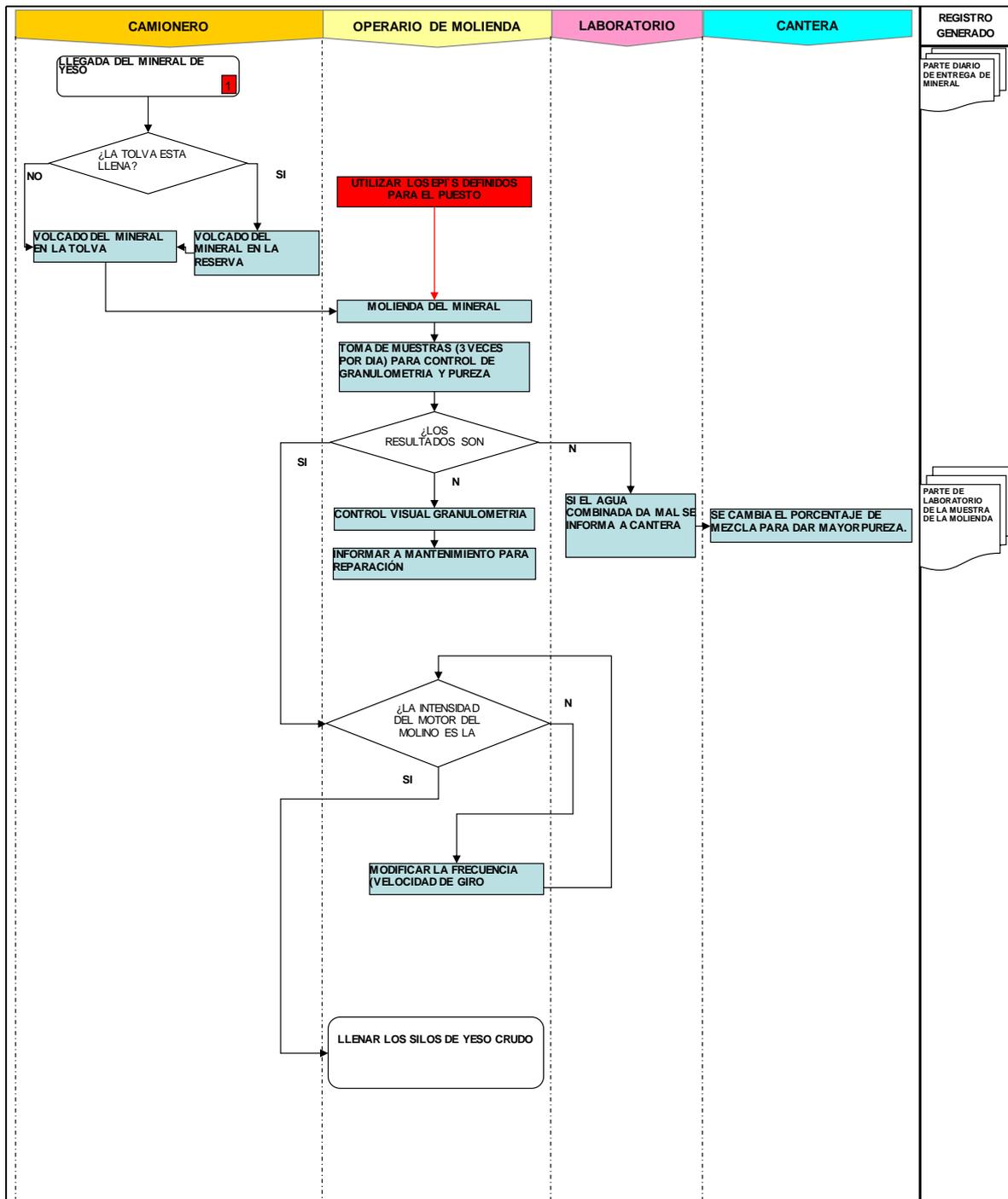


Figura 85. Proceso y registros molienda primaria de yeso

3.1.3.2 Proceso de calcinación del mineral de anhidrita

El objetivo es el de obtener una buena cocción del mineral para la fabricación de anhidrita y asegurar la calidad del producto semielaborado



Figura 86. Vista general de un horno de anhidrita

El proceso empieza a la salida de los silos de stock de mineral. Mediante cintas y elevadores se transporta a la entrada del horno donde el mineral entra de forma controlada. El mineral se deshidrata para obtener la anhidrita o el semihidrato. Se recoge el producto calcinado a la salida del horno (Figura 86) mediante sinfines que lo transportan hasta un elevador que alimenta a los silos de stock de producto calcinado.

Se considera parámetro crítico del proceso la temperatura que alcanza el material en el horno y que coincide con la temperatura de caída al tercer tubo en los hornos de anhidrita. Estas temperaturas críticas se especificaran en las normas de control de calcinación.

Otros parámetros de fabricación son la temperatura de gases a la entrada del filtro, temperatura de refractario en el hogar (Figura 87), caudal de gas, caudal de salida de aire y caudal alimentación de hornos.

Los equipos de trabajo serán:

- Silos: Elemento para almacenar.
- Cintas: Elementos de transporte horizontal o inclinado de mineral.
- Elevadores varios: Elementos de transporte vertical de mineral.
- Sinfines: Elemento de transporte del producto a T elevadas.
- Horno: Elemento mecánico destinado a la deshidratación del mineral de yeso. Horno de cocción directa a contracorriente. Horno de tres tubos concéntricos donde el material circula a contracorriente con respecto a los gases de calcinación en los internos, mientras que en el tercero es de enfriamiento sin circulación de aire. Ver el capítulo dedicado al funcionamiento del horno.



Figura 87. Vista de la cámara de combustión de un horno de anhidrita

La temperatura máxima del material se obtiene a través de un termopar fijo situado en este punto, indicando en cada momento la T^a del producto. La frecuencia y registro de la T^a de los hornos se indica en las condiciones de control de calidad.

Los demás parámetros de control ayudan al correcto funcionamiento del horno (caudal de gas, caudal de salida de aire y caudal alimentación del horno) o a la seguridad de este. (T^a filtro, T^a refractario).

El esquema completo del proceso se aprecia en la Figura 88, con las siguientes anotaciones:

1. El horno se alimenta del mineral existente en 6 silos de 100 Tm de capacidad. La mezcla de los silos que seleccione el hornero se hace de forma temporizada extrayendo un tiempo determinado de cada uno de los silos seleccionados para la carga.
2. El horno lo gobierna el hornero de forma que la temperatura de consigna a la salida del horno es de 550° , variando parámetros de alimentación de mineral, de entrada de aire y de caudal de gas aportado al horno.
3. Una vez salida la anhidrita se une la producción de ambos para ser enviada directamente al circuito de molienda.
4. Se prioriza el silo con menor cantidad de material. Y se cambia de silo por los siguientes motivos:
 - Por llenado del silo en curso.
 - Si el silo contrario se queda vacío.

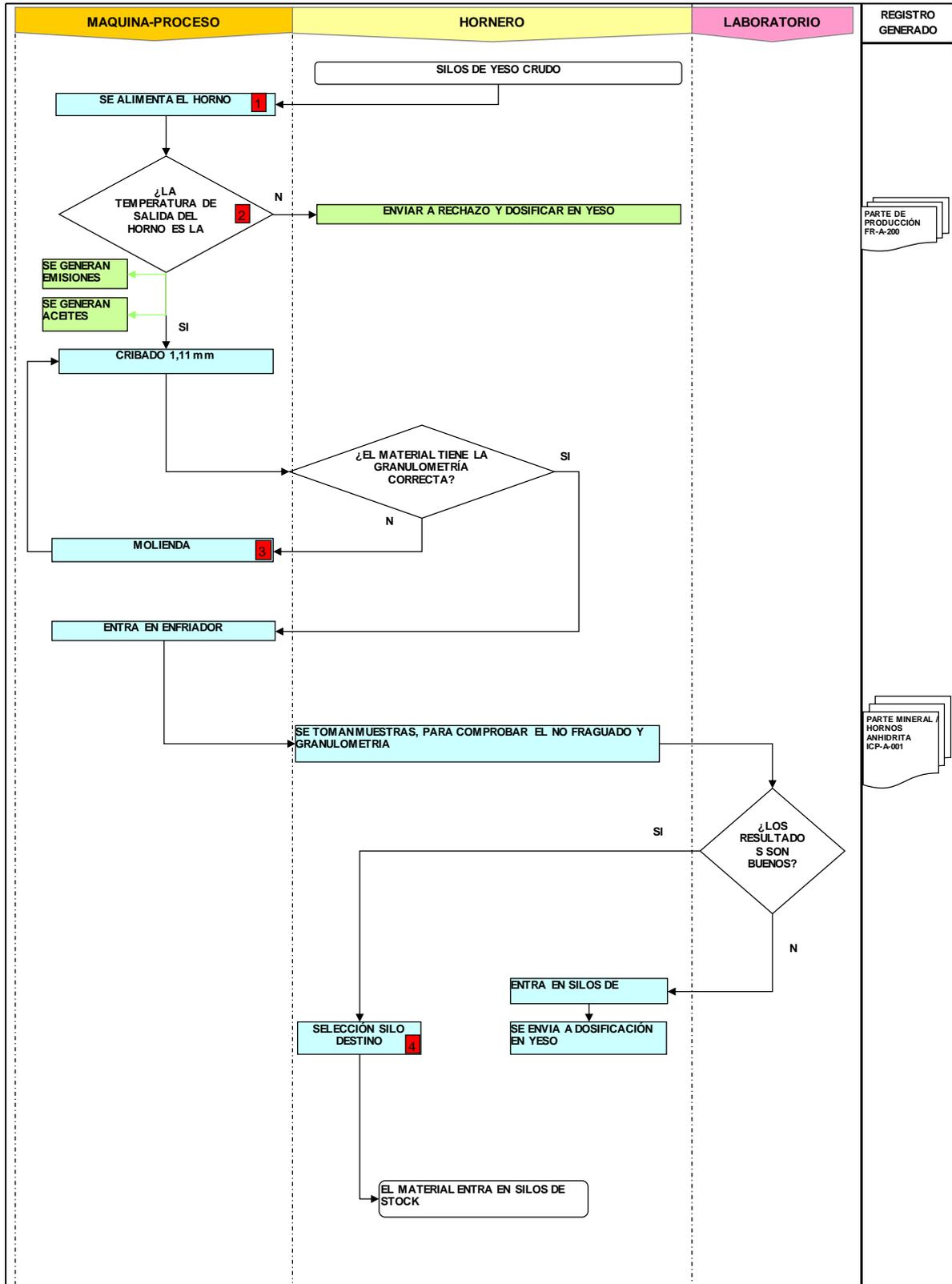


Figura 88. Proceso y registros molienda primaria de yeso

Las premisas indispensables en circuito de molienda de anhidrita son:

- En el circuito de molienda siempre ha de estar en marcha una criba y uno de los dos molinos. Ha de tenerse en cuenta el sentido de giro del sinfín intermedio, que tiene doble sentido de giro, para que se alimente correctamente al molino elegido. Cuando se elija un molino alineado con la criba no se deberá poner en marcha la rosca.
- En los paros del circuito por cualquier motivo se tendrá siempre en cuenta lo siguiente:
 - o La primera es la fracción mezcla fino-grueso va desde la salida de los hornos hasta la división en la criba.
 - o La segunda es la fracción fina.
 - o La tercera es la fracción gruesa.

Para el arranque del horno de anhidrita:

El yeso de la cantera es un mineral que tiene asociado un % de agua que varía entre 18.5 / 20.0 %. Cuando este mineral se calienta a cierta temperatura pierde parte o totalmente el agua de cristalización dependiendo de la temperatura a la que llega el material (Tabla 37). Estas formas deshidratadas son las que interesan.

Fórmula	SO₄ Ca
T^a aproximada del material	520 - 560°C
% agua asociada al producto	0.0%

Tabla 37. Propiedades de la deshidratación de la anhidrita

Como ya se ha dicho, el horno es el elemento mecánico donde se calcina el mineral de yeso procedente de cantera y donde se realiza la deshidratación.

Los parámetros de control para una buena calcinación son:

- El caudal de yeso que entra en el horno se controla con el reductor de la cinta alimentadora.
- El caudal de aire que circula por el horno se controla con la válvula que hay en el circuito de aspiración. (Manual)
- Caudal de gas. Controlado con una electroválvula instalada en el quemador.
- Temperatura del material a la salida del horno o a la caída del 2o al 3er tubo.
- Temperatura del aire a la entrada del filtro.
- Temperatura del refractario.

Cuando el horno llega a régimen de trabajo, los parámetros quedan fijos en un punto óptimo y que al ser siempre el mismo ya están anotados y/o marcados en los puntos de manipulación de cada uno de ellos.

El esquema del arranque del horno se puede ver en la Figura 90, con las siguientes anotaciones:

1. El cuadro de diálogo del programa tiene todas las pestañas de las diferentes fases de trabajo, de posicionamiento de trabajo de los silos pulmón (Bypass, Sincronizado o coincidente), de selección del molino de trabajo y de parada o puesta en marcha del circuito de molienda en tres colores diferentes:

- Color Rosa: es el color de los botones activos y que se pueden seleccionar.
 - Color Verde: es el color de trabajo en el momento actual.
 - Color Negro: es el color de los botones no activos y que no pueden seleccionarse.
2. Cuando se accede a esta fase se están preparando todos los elementos para la puesta en marcha del horno. El programa habilita el silo de mineral que alimenta al horno para su llenado, con lo que todos los elementos anteriores al silo se van a poner en marcha para el trasiego de mineral de los silos exteriores hacia el silo que alimenta al horno. El programa también permite la selección del molino (Sólo va a funcionar uno) y de la criba (Sólo va a funcionar una) que van a trabajar, así como activa las dos formas de puesta en marcha del circuito de molienda: directo a rechazo y hacia silo pulmón. El hornero en esta fase debe seleccionar primeramente el molino y la criba para que el programa posicione correctamente el sentido de giro de la rosca intermedia entre molinos y criba en la puesta en marcha del circuito de molienda. En segundo lugar ha de elegir una de las dos formas activas de puesta en marcha recomendándose siempre la puesta en marcha de forma directa a rechazo. En este momento debe pasar a la siguiente fase, Fase 1: Calentamiento de mangas.
 3. El programa pone en marcha el filtro (Sólo el ventilador de filtro y la expulsión de las mangas) y da permiso para que se encienda el quemador.
 4. El hornero, después de que se haya puesto en marcha el ventilador, abre la válvula del filtro hasta un 50 % de la posición habitual de trabajo, enciende el quemador de gas y cuando este se ha encendido correctamente, abre paso de gas hasta 100 % de la posición normal de trabajo. En estas condiciones se queda hasta que la temperatura del refractario llega a 180 °C momento en que se da paso a la fase siguiente, Fase 2: estabilización mineral.
 5. En esta fase el programa elige el destino de la anhídrita molida hacia el silo rechazo y automáticamente pone en marcha todos los elementos de transporte desde este silo hasta llegar al horno. Por último pone en marcha la cinta de alimentación de mineral al horno y el sinfín de salida de finos del filtro hacia el horno.
 6. El hornero mira que la aportación de mineral al horno sea el mínimo posible (Variador de la cinta de alimentación a 0%), abre el paso de aire al filtro hasta 100 % de la posición normal de trabajo y abre el paso de gas al quemador hasta un 110 % de la posición normal de trabajo.
 7. Después de unas 3 o 4 horas de funcionamiento en estas condiciones y con diferentes pequeñas modificaciones en el paso de gas, las diferentes parámetros de control del horno se estabilizan (Temperatura de refractario, temperaturas de mangas y temperatura del mineral 540/560 °C). En este momento el personal de laboratorio toma una muestra para analizar y dar el OK al cambio; por el contrario si no hay personal de laboratorio se asegurará dejando un mínimo de 30 minutos que la temperatura de la anhídrita sea estable a 540/560 °C para pasar a la Fase 3: trabajo.

El programa habilita la posibilidad de elegir destino y da un aviso acústico informándonos de que ya se puede escoger destino.

El hornero debe escoger el destino de la anhídrita tan pronto recibe el aviso acústico. También tiene la posibilidad de dar más mineral a la entrada del horno teniendo en cuenta que ello le obligará a pequeños retoques en el paso de gas.

Cosas a tener en cuenta en el cuadro de diálogo de la Figura 90:

- Es muy importante que el hornero tenga en cuenta que el filtro ha de ponerse en marcha con la válvula de entrada de aire al filtro cerrada como medida de protección de las correas del ventilador.
- El silo pulmón es un silo cuyo destino se habilita de forma automática cuando hay un paro en alguno de los elementos del circuito de molienda entre este y el silo final de destino para evitar el paro del horno. Es por ello que no se recomienda el uso de este silo para otro menester que no sea un paro de emergencia, un paro para el cambio de molino, un paro de criba o el paro de un horno dejando el otro en marcha. Para un paro a voluntad (Los tres últimos casos), primero ha de girarse de forma manual la válvula superior al silo.
- El programa no permite volver hacia atrás en las diferentes fases ni saltarse una de las fases, así se observa que siempre se tiene activa para seleccionar la siguiente fase en la que se está trabajando y desactivas todas las demás.
- El paro del circuito de molienda es independiente de la parada del horno, de esta forma se podrá trabajar sólo con la molienda sin necesidad de poner en marcha el horno. Lo único que no se podrá hacer es variar el destino de la molienda, ya que por programa este irá hacia el silo de rechazo.
- Cuando por cualquier motivo inesperado se pare todo el circuito de hornos y molienda (Bajada de tensión en la corriente), y se apague el quemador, el hornero ha de pasar de forma muy rápida todas las fases hasta la fase de Parada de Horno dejando activa la Fase Previa-Selección Destino. Si no se actúa de esta forma cuando la tensión se recupera el programa vuelve a la fase de trabajo, pero con el quemador parado.
- En la fase previa de selección de destinos se puede seleccionar el molino y la criba que van a trabajar (Figura 89). Para un cambio de molino o de criba mientras se está en la fase de trabajo ha de pararse la molienda, y una vez todo el circuito de molienda parado se activan todas las opciones de molinos, seleccionar el nuevo molino y volver a poner en marcha la molienda.
- El silo de rechazo tiene la misión de acumular la anhidrita de dudosa calidad (Puesta en marcha y paradas del horno, salidas de rango de temperatura, etc.) y que se incorpora de forma muy lenta junto con la anhidrita correcta.
- La anhidrita que se acumula en el silo pulmón por causas concretas se mezclara de forma gradual con el caudal de anhidrita buena o de calidad activando la descarga y variando los tiempos de marcha y paro de la esclusa de salida del silo.



Figura 89. Molinos de afino o secundarios para anhidrita

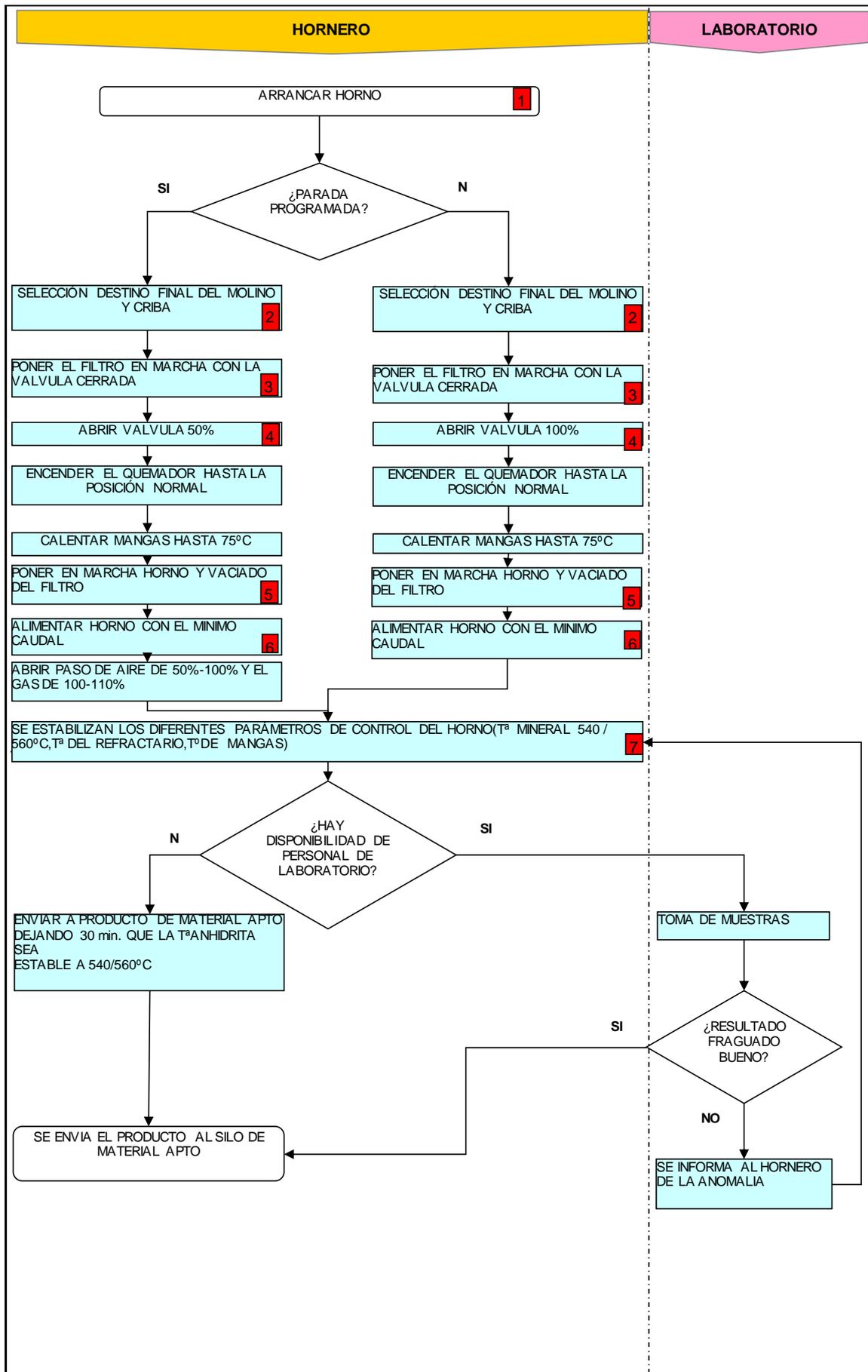


Figura 90. Proceso de arranque de un horno de anhidrita

3.1.4 Control de calidad en la fabricación de anhídrita

En este apartado, se analizarán todos los controles de calidad referentes a la anhídrita y a la piedra cruda antes de entrada a hornos (Figura 91).

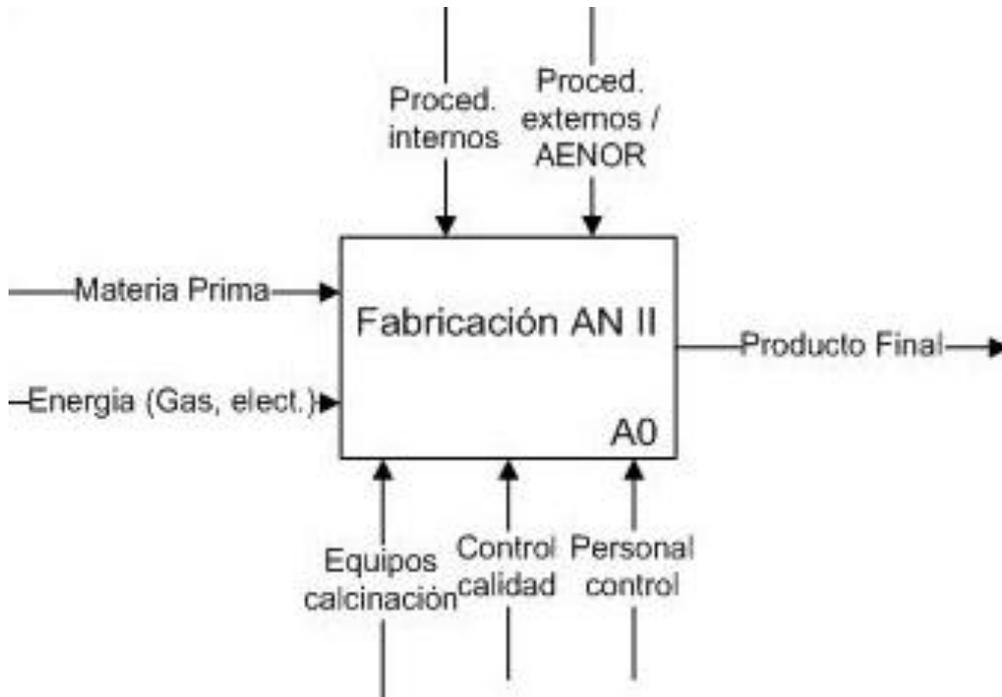


Figura 91. Factores implicados en la calcinación de la anhídrita

Los controles de calidad aplicados (Figura 92) y sus parámetros de control se resumen en la Tabla 38.



Figura 92. Operario realizando registros de control de calidad en horno de anhídrita

	Ud.	Control	Periodo	Objetivo	Admisible
MP ENTRADA DE MINERAL					
Granulometría	%>1 mm	Tamiz manual 1mm	1 mu./8h	30-60	30-60
Pureza mineral	% agua combinada	Estufa microondas	1 mu./4h	17,5-19,9	>17
	% agua combinada	Analizador halógeno	1 mu./4h	18,5-19,5	>18
PRODUCTO FINAL ANII					
Grado calcinación / Reactividad de la AnII / % de AnIII	mmH ₂ O en probeta	Decantación de agua	1 mu./8h	3-8	3-8
	¿Es Reactivo? 0/1	Decantación de agua	1 mu./8h	0	0
	% agua combinada 2ª	Analizador halógeno 20min	1 mu./8h	0,3-0,6	0,2-0,8
Granulometría An salida de molino >0,2mm	%>0,2mm	Tamiz manual 0,2mm	1 mu./8h	22-26	20-30
Granulometría salida de molino >0,8mm	%>0,8mm	Tamiz manual 0,8mm	1 mu./8h	1,5-3,0	0,5-4,0
pH	pH	pHmetro	1 mu./8h	9-11	8-12
Densidad	Kg/m ₃	Vaso	1 mu./8h	900-1.000	850-1.050

Tabla 38. Ensayos y rango de control para la fabricación de anhidrita

3.1.4.1 Determinación de la humedad del mineral

Todo material tiene la característica de absorber una cantidad de agua libre. La determinación de esta cantidad de agua es el principio del ensayo. Se realizará por dos métodos distintos.

Material de ensayo:

- Estufa termostática
- Cápsulas o crisoles de porcelana
- Balanza de 0,01 gr. de sensibilidad

Operativa

En una cápsula de porcelana se pesan 10 gr. de la muestra (P_0). Se coloca la cápsula en la estufa a la temperatura seleccionada y diferente para cada producto hasta peso constante (aprox. 2 h.) Antes de volver a pesar (P_1) la cápsula, se deja enfriar en un desecador de gel de sílice.

Se expresarán los resultados como la disminución en peso, referida a 100 gr. de muestra, expresa el tanto por ciento de humedad.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_0 - P_1}{P_1}$$

Se puede realizar el ensayo por un método alternativo:

Material:

- Estufa
- Balanza de precisión.
- Desecador.
- Analizador de humedad.
- Molino RETSCH
- El propio de un laboratorio de química analítica.

Tratamiento de la muestra:

- Tomar una muestra de 5 Kg de mineral de cantera
- Moler la muestra con molino RETSCH y tamiz 0,5 mm.
- Separar por cuarteos la cantidad de muestra a utilizar en el ensayo.

Método operativo:

a) Utilización de estufa

- De la muestra a ensayar, se separan 10 gr. (M_1).
- Se dispone en un recipiente adecuado, convenientemente extendida la muestra en capa fina.
- Se introduce en una estufa y se deseca a $42^\circ \pm 3^\circ \text{ C}$ durante 2 horas.
- Se enfría en desecador con gel de sílice, pentóxido de fósforo, etc.
- Se pesa de nuevo (M_2) gr.

El resultado referido a la muestra inicial se expresa como tanto por ciento en masa y se calcula mediante la expresión:

$$\% \text{ Agua Libre} = 100 \frac{M_1 - M_2}{M_1}$$

3.1.4.2 Determinación del agua combinada

EL objetivo del ensayo será controlar la regularidad del mineral de partida mediante el cálculo del agua que está ligada a la estructura del yeso.

Se pueden diferenciar dos aguas: la primera será la que se determine tan pronto llega la muestra al laboratorio, mientras que la segunda agua combinada, se calcula siempre después de un tratamiento de la muestra.

Se usará el siguiente material:

- Estufa / horno
- Balanza de precisión.
- Desecador.
- Analizador de humedad.
- El propio de un laboratorio de química analítica.

Para la determinación del agua combinada primera, la muestra no necesita ningún tratamiento.

Para la determinación del agua combinada segunda, se diferenciarán:

- a) Mineral de cantera o crudo
 - Mezclar y molturar la muestra.
 - Introducir la muestra en la estufa a $42\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 3 horas como mínimo.
 - Dejar enfriar la muestra en desecador con gel de sílice, pentóxido de fósforo, etc.
- b) Resto de muestras
 - Acondicionar la muestra a la temperatura del laboratorio durante 2 – 4 horas.
 - Introducir la muestra en la estufa a $42\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 12 horas mínimo.
 - Dejar enfriar la muestra en desecador con gel de sílice, pentóxido de fósforo, etc.
 - En caso necesario, se molturará la muestra hasta tener un tamaño de partícula pulverulento.

El método operativo seguido será el siguiente:

- a) Utilización del horno.
 - En un crisol de porcelana, previamente tarado, se coloca aproximadamente 1 gr de la muestra acondicionada según el apartado anterior (M_1).
 - Se introduce en un horno mufla, de regulación automática a $250^{\circ} \pm 10^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante. También se puede efectuar el ensayo introduciendo la muestra en un horno mufla a $400^{\circ} \pm 30^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora.
 - Se saca el crisol y se deja enfriar en desecador con gel de sílice, pentóxido de fósforo, etc. durante 30 minutos.
 - Una vez frío, se pesa (M_2).

El resultado, referido a la muestra desecada, se expresa como tanto por ciento en masa y se calcula mediante la expresión:

$$\% \text{ Agua combinada} = 100 \frac{M_1 - M_2}{M_1}$$

- b) Utilización de analizadores halógenos.

Se programará el analizador halógeno a una temperatura de $42^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, hasta peso constante (aproximadamente 2 horas).

Con la muestra molida, se realiza el ensayo de determinación del agua combinada, para lo cual:

- Activar el analizador de humedad con la tecla "on/off".
- Pulsar la tecla "Sacar/meter módulo de la muestra", (\cdot), el módulo de la muestra automático sale accionado por el motor.
- Colocar el plato porta-muestras vacío, directamente en el soporte.

- Pulsar la tecla "Tarar/Poner a cero" ($\rightarrow 0/T \leftarrow$). La balanza integrada se pone así a cero.
- Espolvorear la muestra sobre el porta-muestras (5 gramos aproximadamente). El aparato posee una balanza integrada que indicará en cada momento el peso de la muestra.
- Pulsar la tecla "Start".
- El módulo de la muestra se introduce automáticamente y el aparato inicia la desecación y medición.
- Durante la desecación aparece continuamente el valor medio actual del contenido en humedad, en tanto por ciento.
- Tan pronto ha transcurrido el tiempo de desecación elegido, suena una señal acústica, señal de que el proceso de medida ha terminado y el módulo de la muestra sale automáticamente. (por defecto el analizador de humedad considera un tiempo de desecación de 15 minutos a 200 °C, pudiendo variarse, si se especifica previamente otro tiempo de desecación u otra temperatura). La báscula de infrarrojos expresa directamente el resultado en % de pérdida de peso en el display y el resultado sale impreso.

La báscula de infrarrojos expresa directamente el resultado en % de pérdida de peso (agua combinada) en el display, y el resultado sale impreso.

3.1.4.3 Determinación de la densidad

El objetivo del ensayo será el de obtener la relación entre el peso y el volumen de muestra, ya sea sólida, líquida o pasta.

Material usado:

- Embudo de sólidos de latón o acero inoxidable o vidrio según Figura 93
- Recipiente de 1 litro de capacidad, con su alza según Figura 93.
- Balanza de precisión con una exactitud de pesada de ± 1 gr.
- Tamiz de 2 mm de luz de malla.
- Espátula pequeña de laboratorio, (150 mm x 20 mm aproximadamente).

El ensayo se realizará a la temperatura del laboratorio.

- Se tara el recipiente de 1 litro de capacidad, sin su alza (M_0).
- Encima del recipiente de un litro se coloca el alza y el conjunto se coloca a su vez debajo del embudo.
- Se vierte el producto lentamente sobre un tamiz de 2 mm de luz que se colocará sobre el embudo y se deja caer a través del mismo sobre el recipiente, con su alza.
- Cuando el producto rebose del recipiente, se retira el alza.
- Se elimina el exceso de producto mediante una espátula pequeña de laboratorio, enrasando la superficie del recipiente.
- Se pesa el recipiente con el producto (M_1).

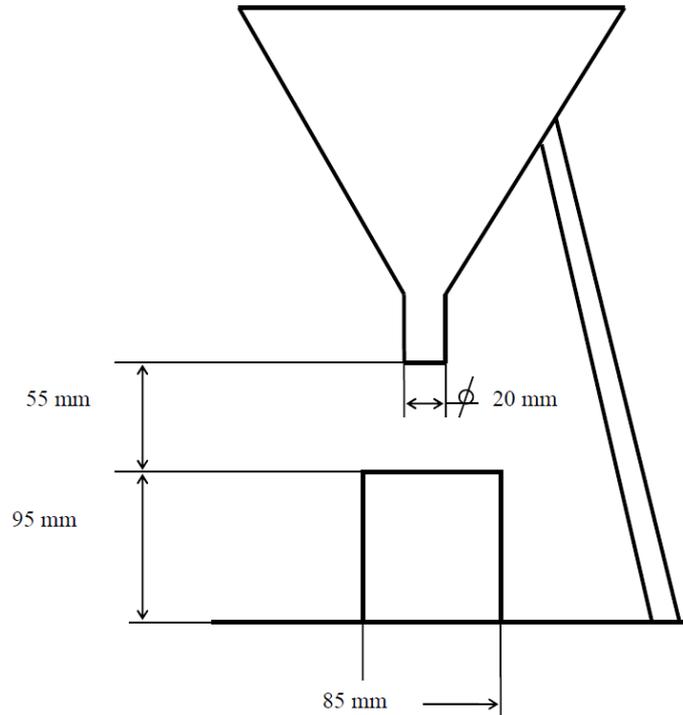


Figura 93. Esquema de equipo para determinación de la densidad de la anhidrita

La densidad aparente del polvo, expresada en gramos / litro (o kg/m³), será:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{M_1 - M_0 (g)}{1 (l)}$$

donde:

M_0 es la masa del recipiente, en gramos.

M_1 es la masa del recipiente con el yeso, en gramos.

Se realizarán dos determinaciones. Si los resultados difieren en más de un 5 % se repetirá el ensayo.

3.1.4.4 Determinación del pH

Objetivo del ensayo

El objetivo del ensayo será el realizar el análisis de la concentración de iones (H₃O)⁺ de la mezcla de agua / muestra.

Material usado:

- Vasos de precipitados de 250 ml
- Probetas

- pHmetro
- Cronómetro
- Varilla tipo hélice
- Termómetro digital
- Balanza de 1 gr. de precisión
- Agitador magnético
- Placa calefactora
- Agitador de varilla con regulación mecánica y en continuo de velocidad.

Se seguirá el siguiente método operativo:

- Pesar 100 gr de muestra y 100 ml de agua.
- Poner en marcha el cronómetro e inmediatamente verter la muestra, con la ayuda de una cucharilla, al agua que se tiene en el vaso de precipitados.
- Dejar humectar la muestra durante un minuto. Seguidamente mezclar manualmente durante un minuto o hasta que no se note ni vea grumo alguno en la pasta.
- Cuando el cronómetro indique 5 minutos se sumergirá el electrodo del pHmetro en la muestra y se espera hasta que se estabilice el resultado del display del pHmetro, momento que se da por terminado el ensayo.

El display del pHmetro marca el valor obtenido.

3.1.4.5 Determinación de la granulometría

El objetivo del ensayo es el de realizar la clasificación de una materia sólida según el tamaño de sus partículas.

Se usará el siguiente material:

- Juego de tamices y plato de recogida.
- Balanza de precisión 0,01 g mínimo.
- Opcional – Tamizadora electromagnética (Figura 94).
- Opcional – Tamizadora por barrido de aire (Figura 95)
- Estufa

El ensayo se realizará a la temperatura del Laboratorio.

a) Tamizado En Seco.

1. Tamizado manual

- Se colocan los tamices que se indiquen en la instrucción de control, Normativa, especificaciones o petición de ensayo, y el plato de recogida en orden decreciente de acuerdo con el tamaño o luz de malla para la materia prima cuya distribución granulométrica se desea obtener.
- Se pesan aproximadamente 100 gr. de muestra en polvo seca, (M_0) en la balanza de precisión.
- Se vierte la muestra sobre el tamiz de mayor luz de malla.
- Se toma el conjunto (tamices + plato) con las dos manos, de manera que su posición sea algo inclinada y se le imprime un movimiento de vaivén al mismo tiempo que se va girando la torre, golpeando ligeramente los costados después de cada 50 sacudidas. Ver nota adjunta.

- El tamizado se considera terminado si durante 1 minuto no pasan más de 0,1 gr de producto al plato de recogida.
- Se pesa el producto retenido (rechazo) en cada uno de los tamices. (M_1, M_2, \dots, M_n).
- Se pesa el producto retenido en el plato de recogida (M_{plato})

2. Tamizado mediante tamizadora electromagnética.

Se sigue el orden descrito en los tres primeros puntos del apartado 1, y posteriormente se procede de la siguiente forma:

- La torre de tamices, se coloca sobre la tamizadora electromagnética. Figura 94
- Se sujeta a las barras inoxidable de sujeción con ayuda de las tuercas de sujeción rápida y la “tapa” que posee para dicho fin. Figura 94
- Se selecciona un tiempo de 20 minutos con el cronómetro, pudiéndose variar el mismo indicando el tiempo de vibración utilizado en el correspondiente ensayo.
- La capacidad de vibración de la tamizadora se puede controlar con el regulador de ampliación de vibración.
- Una vez concluido el tiempo seleccionado la tamizadora se desconecta automáticamente.

Se continúa el ensayo con los tres últimos puntos del apartado 1.



Figura 94. Tamizadora electromagnética modelo TYLER ROTAP SS-36

3. Tamizado mediante tamizadora por barrido de aire.

Se procederá de la siguiente manera:

- Tarar el tamiz seleccionado, en la balanza de precisión (T_1).

- Se pesan entre 20 y 50 gr. de la materia prima cuya granulometría se desea conocer. (P_0)
- Se sitúa el tamiz con la materia prima en la tamizadora donde se acopla y se aísla mediante la tapa de metacrilato de la Figura 95.
- Se programa el tiempo adecuado (2-3 minutos para tamices con luz de malla superior a 30 μm , y 8-10 minutos para tamices con luz de malla inferior) y se pone en marcha el equipo que provoca la depresión y a su vez la entrada de aire por el orificio según la Figura 95 que al pasar a través de la tobera que gira por debajo a unos 3 mm del tapiz, provoca un barrido del producto y por lo tanto el arrastre de la fracción de polvo que pasa a través de la luz de malla del tamiz elegido.
- Una vez finalizado el tiempo programado, la tamizadora se para.
- Se pesa de nuevo el tamiz con el residuo del producto grueso. (P_1).
- Se calcula el rechazo en el tamiz (R_1).
- En el caso de que sea necesario controlar a diferentes tamaños de luz de malla se debe iniciar el proceso con el tamiz más fino (T_1) e ir trasvasando el rechazo (R_1) al tamiz mayor iniciando de nuevo la operación para cada tamiz usado:
 - Se tara el tamiz superior (T_2, T_3, \dots, T_n).
 - Se trasvasa el rechazo del tamiz anterior (R_1, R_2, \dots, R_n).
 - Se programa el tiempo adecuado en la tamizadora.
 - Se pesa el tamiz con el residuo de producto (P_2, P_3, \dots, P_n).
 - Se calcula el nuevo rechazo (R_2, R_3, \dots, R_{n+1})

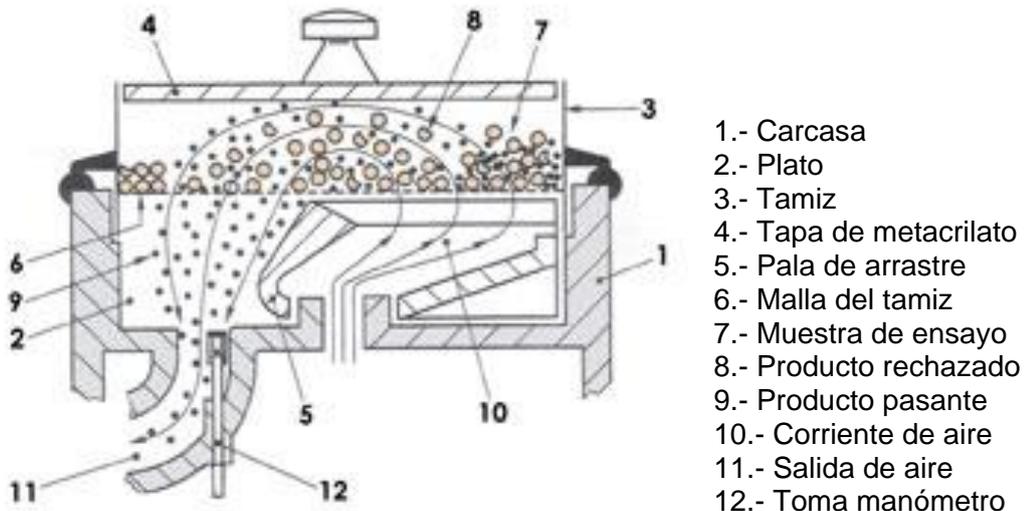


Figura 95. Croquis de funcionamiento de una tamizadora por barrido de aire

b) Tamizado En Húmedo.

- Se pesa una cantidad de muestra en polvo seco (X) en la balanza de precisión.
- Se vierte la muestra sobre el tamiz.
- Con el chorro de agua de un grifo se va mojando el material, obligando a pasar por el tamiz las partículas más finas que éste.
- El tamizado se considera terminado cuando se observa que el agua de lavado es limpia.

- Se introduce el tamiz con el residuo en la estufa a 100°C durante un tiempo mínimo de 30 minutos.
- Se pesa el producto retenido (rechazo) en el tamiz (Y).

Para el tratamiento de los datos se calculará la distribución granulométrica de la siguiente forma.

a) Tamizado en Seco.

1. Si se realiza un tamizado manual o se utiliza la tamizadora electromagnética:

$$\text{Rechazo en 1er tamiz: } 100 \frac{M_1}{M_0}$$

$$\text{Pasante en 1er tamiz: } 100 \frac{M_0 - M_1}{M_0}$$

$$\text{Rechazo en 2º tamiz: } 100 \frac{M_1 + M_2}{M_0}$$

$$\text{Pasante en 2º tamiz: } 100 \frac{M_0 - (M_1 + M_2)}{M_0}$$

$$\text{Rechazo en tamiz n: } 100 \frac{M_1 + M_2 + \dots + M_n}{M_0}$$

$$\text{Pasante en tamiz n: } 100 \frac{M_0 - (M_1 + M_2 + \dots + M_n)}{M_0}$$

$$\text{Resto: } 100 \frac{M_{plato}}{M_0}$$

Los resultados se expresan en tanto por ciento, indicando para cada tamiz utilizado, el tamaño o luz de malla del mismo, y si el resultado se refiere al rechazo o pasante en ese tamiz.

2. Si se utiliza la tamizadora por barrido de aire, se procederá de la siguiente forma:

$$\text{Rechazo en el tamiz más fino: } 100 \frac{R_1 - R_2}{P_0}$$

$$\text{Pasante en el tamiz más fino: } 100 \left(1 - \frac{R_1}{P_0}\right)$$

$$\text{Rechazo en el 2º tamiz más fino: } 100 \frac{R_2 - R_3}{P_0}$$

$$\text{Pasante en el 2º tamiz más fino: } 100 \left(1 - \frac{R_2}{P_0}\right)$$

$$\text{Rechazo en el tamiz n: } 100 \frac{R_n - R_{n+1}}{P_0}$$

Donde:

P_0 : Peso inicial de la muestra.

P_1, P_2, \dots : Peso de los distintos tamices + el producto retenido en cada uno de ellos

T_1, T_2, \dots : Tara de los distintos tamices

$R_1 = P_1 - T_1$: Cantidad de muestra retenida en el tamiz más fino (g)

$R_2 = P_2 - T_2$: Rechazo en el 2º tamiz más fino (g)

$R_3 = P_3 - T_3$: Rechazo en el 3er tamiz más fino (g)

b) Tamizado en Húmedo.

Los resultados se expresan en tanto por ciento, indicando para cada tamiz utilizado, el tamaño o luz de malla del mismo:

$$\% \text{ Rechazo} = 100 \frac{Y}{X}$$

Donde,

X: Peso inicial de la muestra en gr.

Y: Cantidad de muestra retenida en el tamiz en gr.

3.1.4.6 Determinación de la reactividad de la anhídrita

El objetivo será el de obtener el grado de reactividad de la anhídrita

La operativa será la siguiente:

- Pesar 400g. (o 400ml) de agua en un vaso de precipitados con capacidad máxima de 1000ml, graduado con unidades de 20 en 20ml y con diámetro interior de 10cm.
- Ajustar el agitador magnético a velocidad alta 700-800rpm, hasta conseguir vórtice que alcance al agitador.
- Pesar 400g. de anhídrita.
- Añadir con cuchara sopera estos 400g. de anhídrita durante 1 minuto en agitación continua.
- Mantener la agitación a la misma velocidad durante 30 segundos más (total 1,5 minutos) y parar el agitador.
- Dejar en reposo durante 10,5 minutos (total 12 minutos).
- Anotar la altura final de agua sobrenadante y convertir este dato a reactividad según la Tabla 39.

Altura vaso precipitados	Reactividad
0-0.4	0.5
0.4-2.5	0.4
2.5-6	0.3
6-9	0.2
9-13	0.1
>13	0.0

Tabla 39. Medidas de la reactividad de la anhidrita

3.2 ANÁLISIS ENERGÉTICO Y BALANCES

En este capítulo se presenta el caso práctico de un horno de yeso para la fabricación de anhidrita. Se incluyen sus características técnicas y su modo de operación, así como el análisis de los datos físicos-químicos y energéticos relacionados con esta unidad.

En el caso que se ocupa, se analizarán los datos disponibles referentes al horno para elaborar un balance másico y energético del mismo. A su vez, se analizarán las variables que influyen en el proceso de combustión del horno para poder determinar el tipo de relación existente entre ellas y así poder disponer de una aplicación futura que permita conocer y controlar la operación de secado. En consecuencia, se persigue aumentar la eficiencia del horno desde el punto de vista energético y/o de rendimientos en producción.

Como se dispone de dos hornos de fabricación de anhidrita en la fábrica de referencia, se realizará el estudio para los dos hornos, en un contexto global de calcinación para seis hornos (tres para escayola, uno para semihidrato y dos para anhidrita), con el fin de realizar cálculos energéticos globales y particulares de los mismos

3.2.1.1 Operatividad y consumo energético de los hornos de calcinación

El consumo térmico de la planta corresponde a los hornos para la fabricación de yeso (Figura 96), fabricación de escayola y mezcla. Se han recopilado las características de cada horno en la Tabla 41.

La Tabla 40 muestra la repartición del consumo térmico para los equipos estudiados.

Descripción	Consumo gas (kWh/año)	% consumo térmico
Horno 1 (escayola)	4.734.978	15,6%
Horno 2 (escayola)	3.821.583	12,6%
Horno 3 (escayola)	2.611.563	8,6%
Horno 4 (semihidrato)	10.917.007	35,9%
Horno 5 (anhidrita)	3.837.173	12,6%
Horno 6 (anhidrita)	4.475.672	14,7%
TOTAL	30.397.059	100%

Tabla 40. Resumen del consumo térmico de los hornos para 2011.

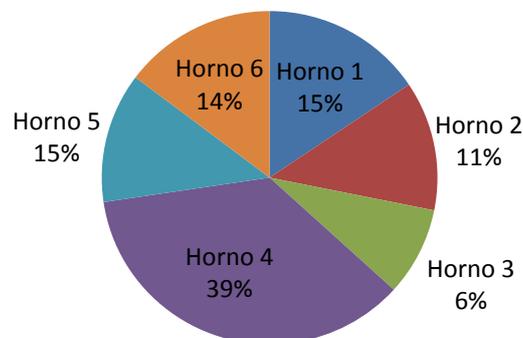


Figura 96. Porcentaje de consumo térmico hornos para 2011.

	H1 Horno escayola Monterde 1	H2 Horno escayola Monterde 2	H3 Horno escayola Monterde 3	H4 Horno Semihidrato Monterde	H5 Horno anhidrita Monterde 1	H6 Horno anhidrita Monterde 2
Contador de material de entrada (cinta pesadora)	NO	NO	NO	SI	SI	SI
Contador de gas propio	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Nombre propio del equipo	Horno 1	Horno 2	Horno 3	Horno 4	Horno 5	Horno 6
Capacidad media de producción [Tm/día]	100	100	100	400	200	200
Capacidad actual del horno	máxima	máxima	máxima	media	media	media
Temperatura de cocción [°C]	180	180	180	180	550	550
Potencia térmica [kW]	1.165	1.165	1.165	4.070	2.900	2.900
Tipo	doble tubo + aislamiento	triple tubo	triple tubo			
Control funcionamiento y parada logística	Continuo paradas: viernes 10 tarde hasta 11 h lunes	Continuo, 1 semana alterna con F3 paradas: viernes 10 tarde hasta 11 h lunes	Continuo, 1 semana alterna con F2 paradas: viernes 10 tarde hasta 11 h lunes	Continuo - paradas: viernes 10 tarde hasta 11 h lunes + parada 1 día /semana	Continuo, 1 semana alterna con F6 paradas: viernes 10 tarde hasta 11 h lunes	Continuo, 1 semana alterna con F5 paradas: viernes 10 tarde hasta 11 h lunes
Regulación y control de temperatura producción / gases combustión /temperatura salida humos/regulación de oxígeno	Manual f(T salida material) --> regulación entrada gas, aire, material No control de oxígeno regulación de aire con trampilla	Manual f(T salida material) --> regulación entrada gas, aire, material No control de oxígeno regulación de aire con trampilla	Manual f(T salida material) --> regulación entrada gas, aire, material No control de oxígeno regulación de aire con trampilla	Manual f(T salida material) --> regulación entrada gas, aire, material No control de oxígeno regulación de aire con trampilla	Manual f(T salida material) --> regulación entrada gas, aire, material No control de oxígeno regulación de aire con trampilla	Manual f(T salida material) --> regulación entrada gas, aire, material No control de oxígeno regulación de aire con trampilla
Sistema emergencia para filtros [T máx. humos]=175°C	alarma, no hay entrada de aire	alarma, no hay entrada de aire	alarma, no hay entrada de aire	alarma + entrada automática de aire frío	alarma + entrada automática de aire frío	alarma + entrada automática de aire frío
¿Nº de motores y regulación?	De giro, de aspiración de aire hacia el filtro, quemador (ventilador), cinta de alimentación con vf, vibrador de entrada horno y sinfín de salida, alveolar	De giro, de aspiración de aire hacia el filtro, quemador (ventilador), cinta de alimentación con vf, vibrador de entrada horno y sinfín de salida, alveolar	De giro, de aspiración de aire hacia el filtro, quemador (ventilador), cinta de alimentación con vf, vibrador de entrada horno y sinfín de salida, alveolar	De giro, de aspiración de aire hacia el filtro, quemador (ventilador), cinta de alimentación con vf, vibrador de entrada horno y sinfín de salida, alveolar	De giro, de aspiración de aire hacia el filtro, quemador (ventilador), cinta de alimentación con vf, vibrador de entrada horno y sinfín de salida, alveolar	De giro, de aspiración de aire hacia el filtro, quemador (ventilador), cinta de alimentación con vf, vibrador de entrada horno y sinfín de salida, alveolar

Tabla 41. Características de los hornos estudiados

Respecto a la distribución del consumo térmico, se observa que el horno 4 es el que consume más gas natural (y tiene mayor capacidad productiva), y en segundo lugar los hornos 1, 5 y 6.

La Figura 97 muestra la evolución mensual del consumo térmico específico (kWh/Tm) para cada uno de los hornos.

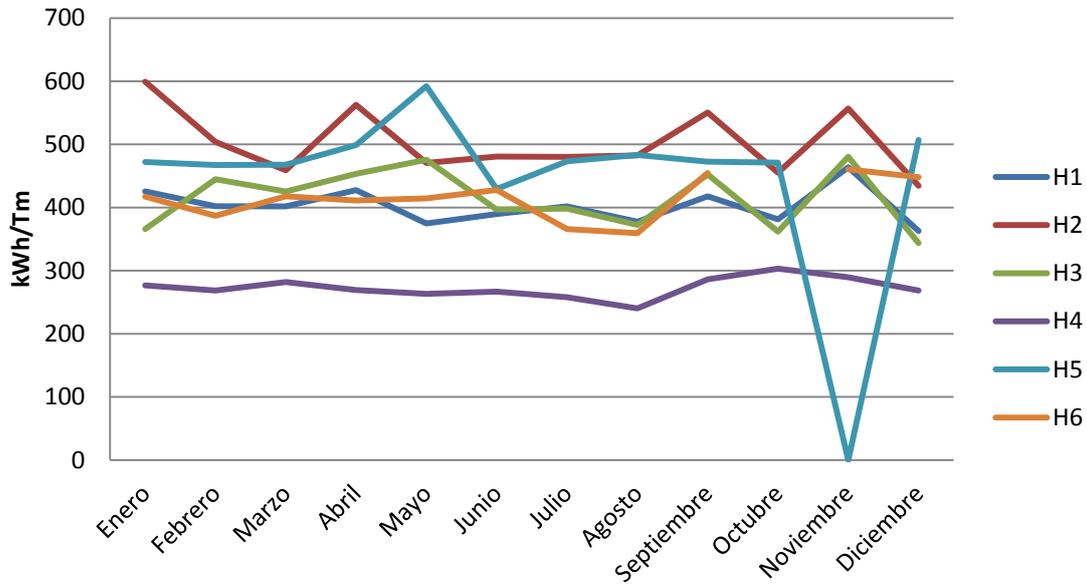


Figura 97. Distribución mensual consumo específico hornos

Tal y como se puede comprobar en la Figura 97, el Horno 4, de semihidrato, es el horno más eficiente. Respecto a los hornos de escayola, el Horno 1 presenta una mayor eficiencia, seguido del Horno 3 y 2 respectivamente. En cuanto a los hornos de anhídrita, el horno 6 presenta mayor eficiencia energética que el horno 5, por tanto se elegirá el horno 5 por su mayor capacidad de optimización energética.

3.2.2 Perfil energético del horno de calcinación

Para abordar un estudio sobre el rendimiento térmico de un proceso el primer diagnóstico a realizar es el balance de energía. Para obtenerlo, también se requiere conocer el balance de materia y el diagrama de flujo de la instalación que recogerá todas las corrientes que lo integran.

Para realizar los balances de materia y energía del horno se han tenido en cuenta todos los flujos de materiales que entran, salen, acumulan o se agotan en el curso de un intervalo de tiempo de operación concreto (Camdali, Erisen, & Celen, 2004).

En cuanto a cálculos se ha establecido un número de ecuaciones independientes igual al número de incógnitas de composición, masa y energía, de tal manera que sea posible obtener todos los pesos y composiciones y flujos energéticos de las sustancias que ingresan y salen del horno. Los balances preservan la expresión de la ley de conservación de la masa/energía.

La Figura 98 presenta los flujos másicos y energéticos que van a delimitar el balance energético del horno de estudio. En dicha figura, m representa la cantidad másica (para el caso del sólido o bien volumétrica-normalizada, para el caso de los gases) y H , representa la cantidad de calor que lleva cada corriente asociada.

Los datos de partida se presentan en la Tabla 42 y se nombran de acuerdo con nomenclatura mencionada.

		Variable	Nomenclatura	Valor	Unidad
ENTRADA	SOLIDO	Temperatura	T1	15	°C
		Caudal	m1	7,6	Tn/h
		Humedad	x1	0,9	%
		Pureza	(1-x2-x1)	82,9	%
	GAS NATURAL	Temperatura	T2	10	°C
		Caudal	m2	180	
	AIRE	Temperatura	T3	17	°C
		Caudal	m3	10.979	Nm3/h
		Humedad	xHR	49,0	%
SALIDA	SOLIDO	Temperatura	T5	163	°C
		Caudal	m5	6,2	Tn/h
	GASES	Temperatura	T4	97	°C
		Caudal	m4	12.874	Nm3/h

Tabla 42. Datos de partida para el horno H5

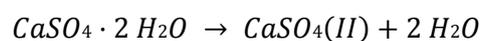
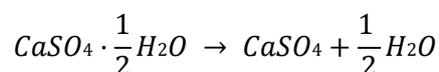
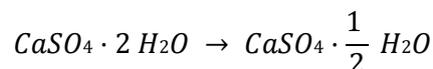
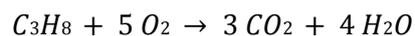
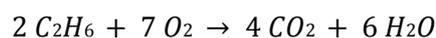
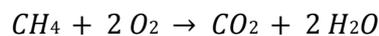
Los datos se obtendrán a partir de promedios facilitados por los propios instrumentos de control del horno (sistema Scada, e instrumentación varia) y medidas puntuales consideradas suficientemente representativas en estado estacionario de operatividad del mismo.

3.2.2.1 Balance másico

Tal y como muestra la Figura 98 se ha delimitado el balance al sistema interior del horno, situándolo en lo que se denomina la zona de trabajo. Hecha tal delimitación, las paredes que rodean a la cámara en la que se colocan los materiales para el tratamiento, son límites del sistema. Y de la misma delimitación se sobrentiende que las chimeneas u orificios del horno se encuentran fuera del sistema.

Se considera el horno de estudio es un sistema abierto (Figura 99). Por ello, se define un intercambio de materia y energía entre el sistema y los alrededores. La materia que entra y sale del sistema es esencialmente la carga del horno. Algo a considerar dentro de este balance son los gases de combustión y la deshidratación de la anhidrita.

En el horno se produce la combustión del gas natural y la reacción de formación de anhidrita II según las siguientes reacciones estequiométricas siguientes.



El oxígeno -comburente de las reacciones de combustión-, se introduce a partir del aire de entrada al sistema (Tabla 43). El caudal de aire se ha determinado a partir de medidas puntuales de realizadas por una entidad certificadora durante el control atmosférico periódico del horno, sujeto a legislación.

Propiedades	Valor	Unidad
% N ₂ (seco)	79,1	%
% O ₂ (seco)	20,9	%
Presión atmosférica	742,5	mmHg
Temperatura aire	22,0	°C
Presión de vapor	19,6	mmHg
Humedad relativa	11,7	%
Humedad absoluta	79,1	%

Tabla 43. Propiedades del aire de entrada

Según información facilitada por la compañía gasista (Gas Natural), se toma para los cálculos posteriores la siguiente composición del gas natural (Tabla 44).

COMPOSICION	%
CH ₄	88%
C ₂ H ₆	6%
C ₃ H ₈	2%
CO ₂	0,2%
N ₂	4%

Tabla 44. Composición del Gas Natural en España (Fuente: Publicación CNE. Facilitado por Gas Natural)

Para determinar los gases de chimenea a partir de las reacciones estequiométricas presentadas, se han aplicado las leyes de Charles-Gay Lussac, Boyle Mariott y Avogadro (Tabla 45). Pueden considerarse gases ideales, tanto por su simplicidad en estructura molecular como por la presión de trabajo (presiones cercanas a la atmosférica).

DESCRIPCIÓN	FÓRMULA	VALOR	UNIDAD
Caudal material	m1	7,8	Tm/h
Caudal pes.hum.	m1 · x1%	0,1	Tm/h
Caudal CaSO ₄ .2H ₂ O	m1 · (100-x1%-x2%)	6,3	Tm/h
Caudal Inerte (CaCO ₃) s	m1 · x2%	1,4	Tm/h
Caudal Total	m1	7,8	Tm/h
Caudal gas natural	m2	225,6	Nm ³ /hora
% CH ₄	m2 · XCH ₄	198,5	Nm ³ /hora
%C ₂ H ₆	m2 · XC ₂ H ₆	14,0	Nm ³ /hora
%C ₃ H ₈	m2 · XC ₃ H ₈	4,7	Nm ³ /hora
% CO ₂	m2 · xCO ₂	0,5	Nm ³ /hora
%N ₂	m2 · XN ₂	7,9	Nm ³ /hora
Caudal aire total	m3	17.299	Nm ³ /hora

Tabla 45. Flujos de material de entrada en el horno nº 5

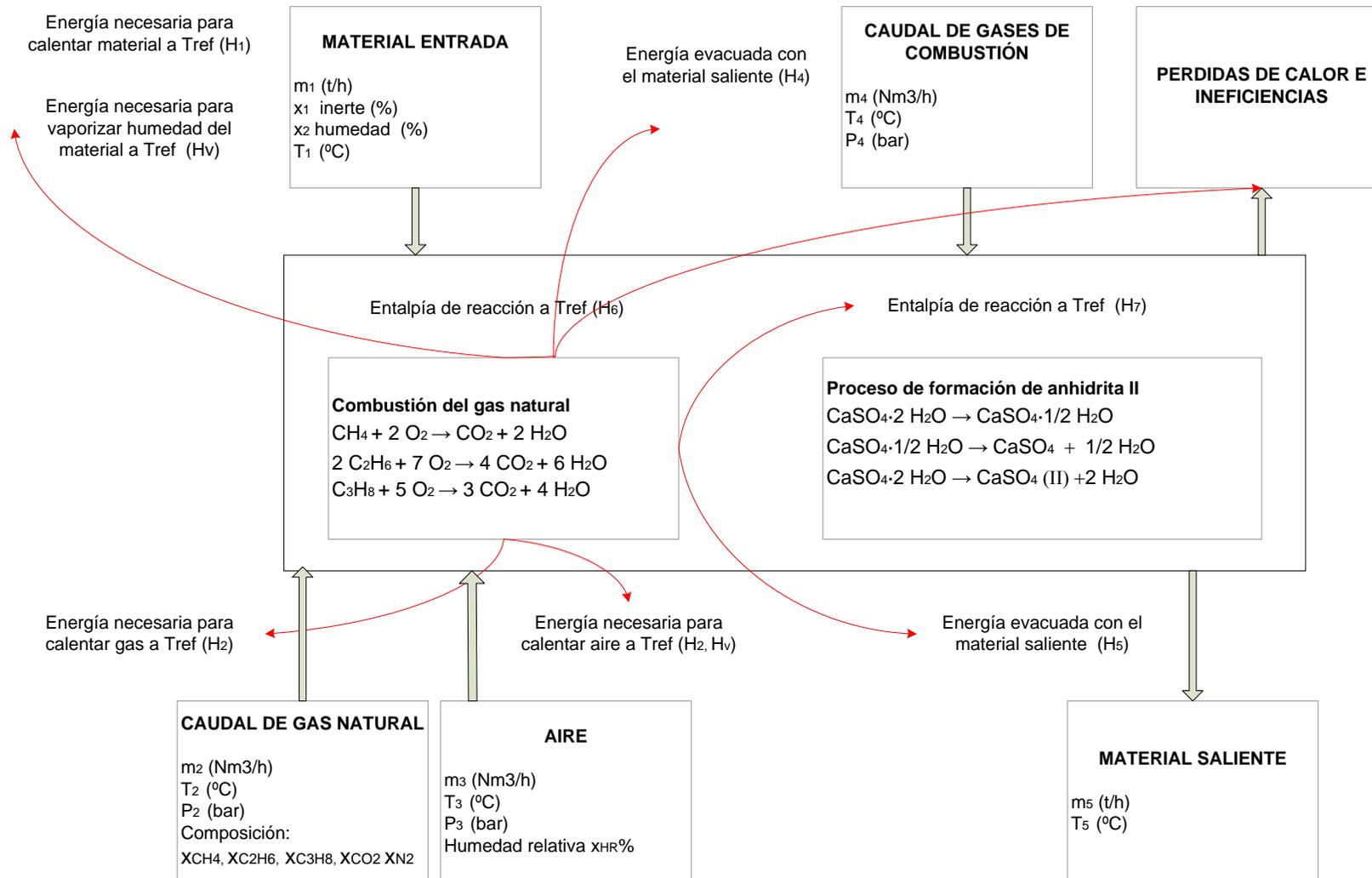


Figura 98. Flujo másico y energético de un horno de anhidrita

DESCRIPCIÓN	FÓRMULA	VALOR	UNIDAD
Caudal material	m_1	7,6	Tm/h
Caudal pes.hum.	$m_1 \cdot X_1$	0,1	Tm/h
Caudal $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$m_1 \cdot (1 - X_1 - X_2)$	6,2	Tm/h
Caudal Inerte (CaCO_3) s	$m_1 \cdot X_2$	1,3	Tm/h
Caudal Total	m_1	7,6	Tm/h
Caudal gas natural	m_2	180,0	Nm^3/hora
% CH_4	$m_2 \cdot X_{\text{CH}_4}$	165,6	Nm^3/hora
% C_2H_6	$m_2 \cdot X_{\text{C}_2\text{H}_6}$	9,0	Nm^3/hora
% C_3H_8	$m_2 \cdot X_{\text{C}_3\text{H}_8}$	1,8	Nm^3/hora
% CO_2	$m_2 \cdot X_{\text{CO}_2}$	1,8	Nm^3/hora
% N_2	$m_2 \cdot X_{\text{N}_2}$	1,8	Nm^3/hora
Caudal aire total	m_3	10.979	Nm^3/hora

Tabla 46. Flujos de material de entrada en horno n° 6

A partir de los datos de partida, y composición de gas natural, se obtiene los caudales de material y gases de entrada (aire y combustible). Los flujos entrantes de materia se resumen en la Tabla 45 y Tabla 46.

A partir de la estequiometría de las reacciones de combustión, y la aplicación de las leyes de gases ideales, se obtiene el balance de flujos de salida de los distintos componentes del sistema. Las fórmulas se presentan en la Tabla 49 y los resultados en la Tabla 47 y Tabla 48.

Para el cálculo, se consideran despreciables las partículas de emisión que pasan a través de los filtros de mangas, cuyas unidades se encuentran en el orden de ppm.

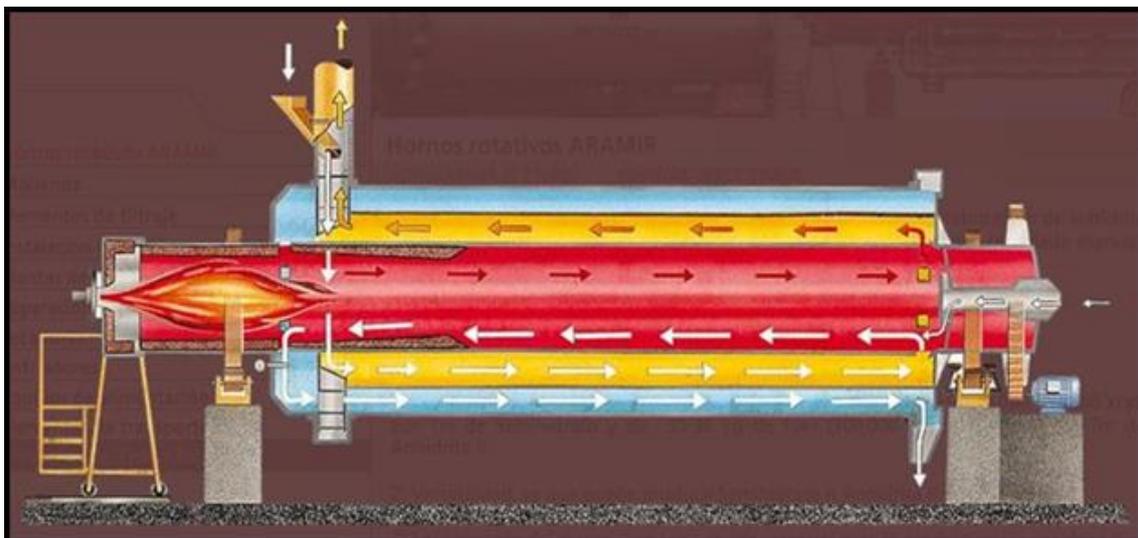


Figura 99. Flujos de gases y de material en un horno de anhidrita

CAUDALES SALIENTES		
Caudal anhídrita	5,0	Tm/h
Caudal inerte	1,4	Tm/h
Caudal O₂	3.134,7	Nm ³ /h
Caudal N₂	13.649,0	Nm ³ /h
Caudal CO₂	241,1	Nm ³ /h
Caudal humedad sólido	84,1	Nm ³ /h
Caudal humedad aire	53,5	Nm ³ /h
Caudal vapor deshidratación	1.640,3	Nm ³ /h
Caudal vapor combustión	457,9	Nm ³ /h
Caudal H₂O total	2.235,9	Nm ³ /h
Caudal total	19.260,7	Nm ³ /h

Tabla 47. Flujos de material de salida del horno nº 5

CAUDALES SALIENTES		
Caudal anhídrita	4,9	t/h
Caudal inerte	1,3	t/h
Caudal O₂	1.569,5	Nm ³ /h
Caudal N₂	7.742,6	Nm ³ /h
Caudal CO₂	243,5	Nm ³ /h
Caudal humedad sólido	82,0	Nm ³ /h
Caudal humedad aire	21,6	Nm ³ /h
Caudal vapor deshidratación	1.626,2	Nm ³ /h
Caudal vapor combustión	462,3	Nm ³ /h
Caudal H₂O total	2.192,1	Nm ³ /h
Caudal total	11.747,7	Nm ³ /h

Tabla 48. Flujos de material de salida del horno 6

Los resultados del balance másico se utilizan a continuación para determinar el balance energético.

DESCRIPCIÓN	FÓRMULA
Caudal anhidrita	$m_{All} = m_1 \cdot (1-x_1) \cdot x_2 \cdot \frac{1 \text{ mol CaSO}_4}{PM_{All}} \cdot \frac{1 \text{ mol CaSO}_4 \cdot 1/2H_2O}{1 \text{ mol CaSO}_4 \cdot 2H_2O} \cdot \frac{PM \text{ CaSO}_4 \cdot 2H_2O}{1 \text{ mol CaSO}_4 \cdot 1/2H_2O}$
Caudal inerte	$m_i = m_1 \cdot (1-x_2) \cdot (1-x_1)$
Caudal O2	$m_{O_2} = m_3 \cdot x_{O_2} - m_2 \cdot x_{CH_4} \cdot \frac{2 \text{ moles } O_2}{1 \text{ mol } CH_4} - m_2 \cdot x_{C_2H_6} \cdot \frac{3.5 \text{ moles } O_2}{1 \text{ mol } C_2H_6} - m_2 \cdot x_{C_3H_8} \cdot \frac{5 \text{ moles } O_2}{1 \text{ mol } C_3H_8}$
Caudal N2	$m_{N_2} = m_3 \cdot x_{N_2} \cdot (1-x_{Habs}) + m_2 \cdot x_{N_2}$
Caudal CO2	$m_{CO_2} = m_2 \cdot x_{CH_4} \cdot \frac{1 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } CH_4} + m_2 \cdot x_{C_2H_6} \cdot \frac{2 \text{ mols } CO_2}{1 \text{ mol } C_2H_6} + m_2 \cdot x_{C_3H_8} \cdot \frac{3 \text{ mols } CO_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} + m_2 \cdot x_{CO_2}$
Caudal humedad sólido	$m_{H_2O_s} = m_1 \cdot x_1 \cdot \frac{1 \text{ mol } H_2O}{PM \text{ H}_2O} \cdot \frac{1 \text{ N} \cdot m^3/h}{22.4 \text{ mols}} \cdot 10^3$
Caudal humedad aire	$m_{H_2O_a} = m_3 \cdot x_{Habs}$
Caudal vapor deshidratación	$m_{H_2O_d} = m_{All} \cdot \frac{1 \text{ mol } All}{PM \text{ All}} \cdot \frac{2 \text{ moles } H_2O}{1 \text{ mol } All} \cdot \frac{1 \text{ N} \cdot m^3}{22.4 \text{ moles}} \cdot 10^3$
Caudal vapor combustión	$m_{H_2O_c} = m_2 \cdot x_{CH_4} \cdot \frac{2 \text{ moles } H_2O}{1 \text{ mol } CH_4} + m_2 \cdot x_{C_2H_6} \cdot \frac{3 \text{ moles } H_2O}{1 \text{ mol } C_2H_6} + m_2 \cdot x_{C_3H_8} \cdot \frac{4 \text{ moles } H_2O}{1 \text{ mol } C_3H_8}$
Caudal H2O total	$m_{H_2O_T} = m_{H_2O_s} + m_{H_2O_a} + m_{H_2O_d} + m_{H_2O_c}$
Caudal total gas	$m_{CO_2} + m_{H_2O_v} + m_{O_2} + m_{N_2}$
Caudal total sólido	$m_i + m_{All}$

Tabla 49. Formulación de caudales saliente

3.2.2.2 Balance energético

La Figura 98 ilustra el sistema concreto para el cual se realiza el balance de materia y energía en los hornos de estudio. Teniendo en cuenta que las flechas rojas indican el flujo de la energía, cuando el horno entra en régimen de producción continuo, la energía producida en la combustión del gas natural (H_6), se utiliza para:

- precalentar el aire (H_3), el propio gas (H_2) y el material de entrada (H_1) -que se inserta en el horno con una humedad determinada (H_v).
- proporcionar el calor necesario para la reacción endotérmica correspondiente al proceso de formación de la anhidrita II (H_7)

Por otro lado, no toda la energía se utiliza de forma eficiente, puesto que:

- el material sólido procesado (H_5) y los gases de combustión salen del horno con cierta temperatura, es decir con su propio calor latente (H_4).
- el horno tienen ciertas pérdidas de calor e ineficiencias (tal como puede verse en la Figura 98).

Las pérdidas por ineficiencias son más complejas de calcular. Por ello se determinaran por balance energético, teniendo en cuenta el principio de conservación de la energía.

El balance térmico de un horno puede variar de un horno continuo a uno discontinuo. En los continuos los cálculos se realizan en base a la producción (en kg/h o en Tm/h), mientras que en los intermitentes se tiene en cuenta la carga introducida en cada operación (en kg o en Tm) (Barnard & Bradley, 1985). Para el caso práctico que ocupa, se considera que estos hornos trabajan de forma continua aunque la operatividad de los cuales tenga una periodicidad de trabajo discontinua de 4 días/semana.

Durante el proceso de secado del yeso para la formación de anhidrita II, se produce la combustión del gas natural así como la transformación de la materia prima en anhidrita II. Por ello en el horno tienen lugar de forma completa las ya mencionadas reacciones químicas exotérmicas (para el caso del gas combustible) y endotérmicas (para el caso de la materia prima). En el balance del horno representado por la Figura 98 se cumple la siguiente ecuación de conservación de la energía:

$$H_6 = H_1 + H_v + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_7 + \text{pérdidas}$$

Para el caso de los calores asociados a H_6 y H_7 estos pueden determinarse a partir de las entalpías de formación de las mencionadas reacciones.

La entalpía de formación de estas reacciones ΔH_f se ha calculado de acuerdo con la propia definición de entalpía de reacción:

$$\Delta H_{or} = \sum n \cdot \Delta H_{ofp} - \sum n \cdot \Delta H_{ofr}$$

Donde ΔH_{ofp} y ΔH_{ofr} corresponden a las entalpías de formación de productos y reactivos respectivamente, teniendo en cuenta la estequiometría de la reacción (n , número de moles). Para el caso de elementos, la entalpía de formación es cero. Ver la Tabla 50 y Tabla 51.

Reacciones del horno de Anhidrita	ΔH_f (kJ/mol)
$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	-800,6
$2 \text{C}_2\text{H}_6 + 7 \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	-1.425,2
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$	-86,7
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$	2.040,5
$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 + 1/2 \text{H}_2\text{O}$	21,9
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \text{ (II)} + 2 \text{H}_2\text{O}$	108,6

Tabla 50. Entalpías de reacción de los hornos objeto de estudio.

Entalpías de Formación	ΔH_{of} (kJ/mol) *
CH_4	-74,8
C_2H_6	-84,7
C_3H_8	-103,8
CO_2	-393,5
$\text{H}_2\text{O}(\text{vapor})$	-241,0
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-2.005,5
$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}(\text{beta})$	-1.557,4
$\text{CaSO}_4(\text{II})$	-1.415,0

* Temperatura de referencia 298,15 K

Tabla 51. Entalpías de formación utilizadas para calcular las reacciones que se producen en el horno. Fuente: (Perry & Green, 1997) y (Gerhartz & Schulz, 1985-1996) para el caso de anhidrita.

Para calcular la energía necesaria H_1, H_2, H_3, H_4, H_7 de la Figura 98 se considera a presión constante, el cumplimiento de la siguiente ecuación para la transferencia de calor.

$$Q = m \cdot C_p \Delta T$$

Donde m es el caudal del material, C_p la capacidad calorífica a presión constante y ΔT el salto térmico al que el material está sujeto.

Para calcular las capacidades caloríficas de las distintas sustancias que se forman y/o intervienen en los procesos de secado, se ha recopilado en la bibliografía la capacidad calorífica de los distintos compuestos presentes en el horno, de acuerdo con las temperaturas de trabajo del mismo (Scenna & col., 1999).

Para el caso de los gases que intervienen en la combustión, ya se ha comentado previamente, que se presupone comportamiento de gas ideal.

Una forma de estimar las capacidades caloríficas C_p de gases ideales es por medio de un polinomio cúbico en función de la temperatura T , que presenta la siguiente estructura.

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Los coeficientes a , b , c y d pueden encontrarse en las referencias (Perry & Green, 1997) y (Sherwood, Reid, & Prausnitz, 1979)

La capacidad calorífica de una mezcla de i componentes puede calcularse por medio de la expresión:

$$C_{p_{mezcla\ i}} = \sum x_i a + x_i bT + x_i cT^2 + x_i d$$

donde:

a_i , b_i , c_i , d_i son constantes de la ecuación para el componente i
 x_i Fracción molar del componente i
 T Temperatura

Para el caso de los compuestos sólidos (materiales de entrada y salientes) que intervienen en el proceso, se utilizarán los C_p empíricos en base a un polinomio cuadrático, que guarda la siguiente correlación (Tabla 52 y Tabla 53):

$$C_p = a + bT + cT^2$$

	a	b	c	d	C_p (J/mol°C) T=25°C
CH₄	4,598E+00	1,245E-02	2,860E-06	-2,703E-09	77,39
C₂H₆	1,292E+00	4,254E-02	-1,637E-05	2,081E-09	52,65
C₃H₈	-1,009E+00	7,315E-02	-3,789E-05	7,678E-09	73,83
CO₂	4,728E+00	1,754E-02	-1,338E-05	4,097E-09	37,17
O₂	6,713E+00	-8,790E-07	4,170E-06	-2,544E-09	29,38
N₂	7,440E+00	-3,240E-03	6,400E-06	-2,700E-09	29,17
H₂O (v)	7,701E+00	4,595E-04	2,521E-06	-8,590E-10	33,48

Tabla 52. Coeficientes para obtención de capacidades caloríficas de gases (Sherwood, Reid, & Prausnitz, 1979)

	a	b	c	Cp (J/mol°C) T=25°C	Rango de aplicación térmico (K)
CaSO₄·2H₂O	4,680E+01	0,000E+00	0,000E+00	195,881	282-373
CaSO₄	1,852E+01	2,197E-02	-1,568E+05	97,564	273-1373
Inerte (CaCO₃)	1,968E+01	1,189E-02	-3,076E+05	82,705	273-1033

Tabla 53. Coeficientes para obtención de capacidades caloríficas de sólidos (Perry & Green, 1997)

No se dispone de información para el caso de CaSO₄·1/2H₂O.

A partir de los datos anteriormente descritos y según ecuaciones formuladas, el balance del sistema obtenido se presenta en la Tabla 54 y Tabla 55.

BALANCE ENERGÍA	kJ/h
Energía desarrollada por la combustión del gas natural	8.415.823
Energía necesaria para calentar el sólido entrada hasta 25 °C	25.894
Energía necesaria para vaporizar la humedad del sólido a 25 °C	165.207
Energía necesaria para calentar el gas natural hasta 25 °C	6.273
Energía necesaria para calentar el aire has 25 °C	67.696
Energía necesaria para deshidratar a anhidrita	4.385.877
Energía que se pierde con el sólido caliente de salida	873.445
Energía que se pierde con los humos de salida	1.697.324
Pérdidas de calor	405.147

Tabla 54. Resultados balance de energía para horno 5

BALANCE ENERGÍA	kJ/h
Energía desarrollada por la combustión del gas natural	7.377.883
Energía necesaria para calentar el sólido entrada hasta 25 °C	84.368
Energía necesaria para vaporizar la humedad del sólido a 25 °C	160.971
Energía necesaria para calentar el gas natural hasta 25 °C	5.499
Energía necesaria para calentar el aire has 25 °C	102.245
Energía necesaria para deshidratar a anhidrita	4.348.108
Energía que se pierde con el sólido caliente de salida	840.286
Energía que se pierde con los humos de salida	1.140.017
Pérdidas de calor	696.389

Tabla 55. Resultados balance de energía para horno 6

A partir de los resultados presentados en la Tabla 54 y Tabla 55 se representa el diagrama de Sankey del horno 5 y 6 respectivamente para flujos energéticos (Figura 100 y Figura 101)

GAS NATURAL

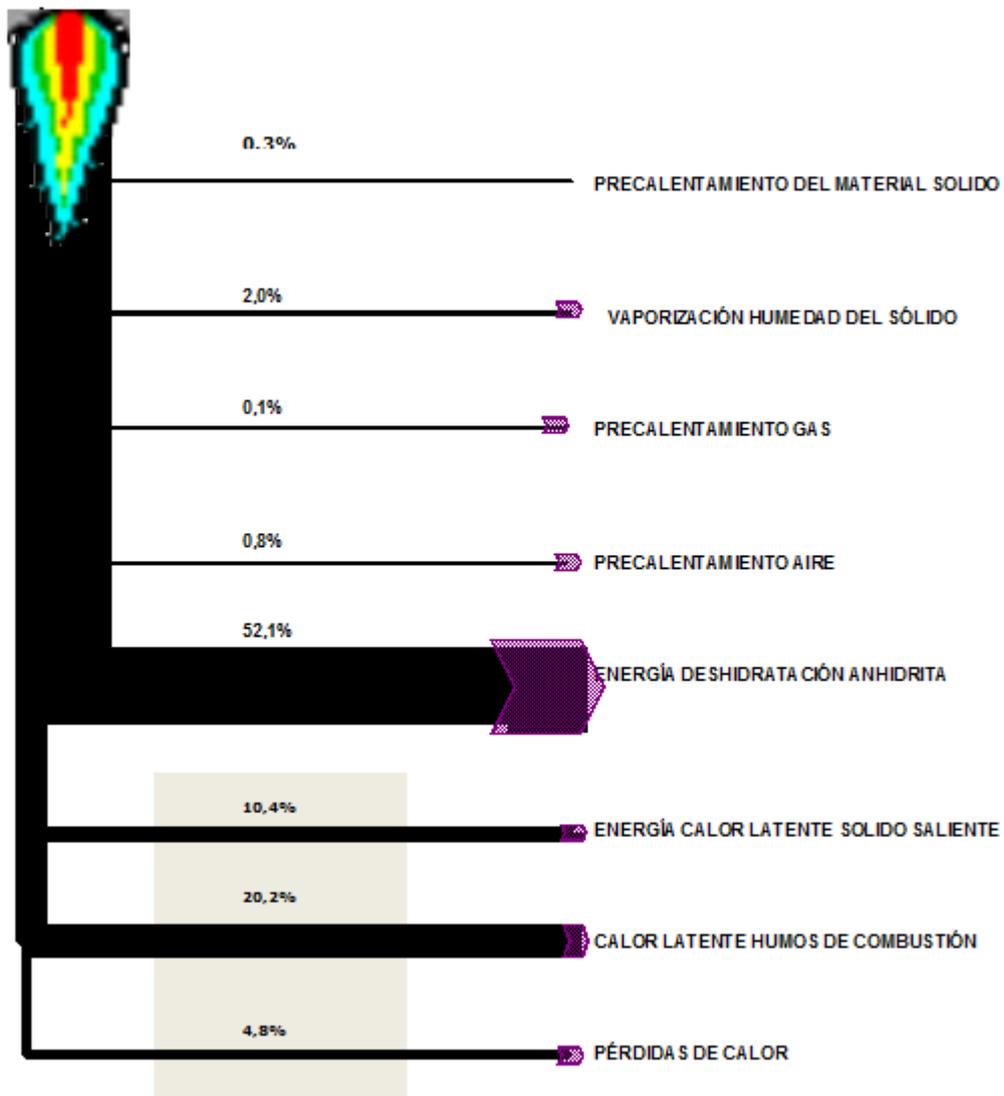


Figura 100. Diagrama de Sankey Balance energético de horno 5.

GAS NATURAL

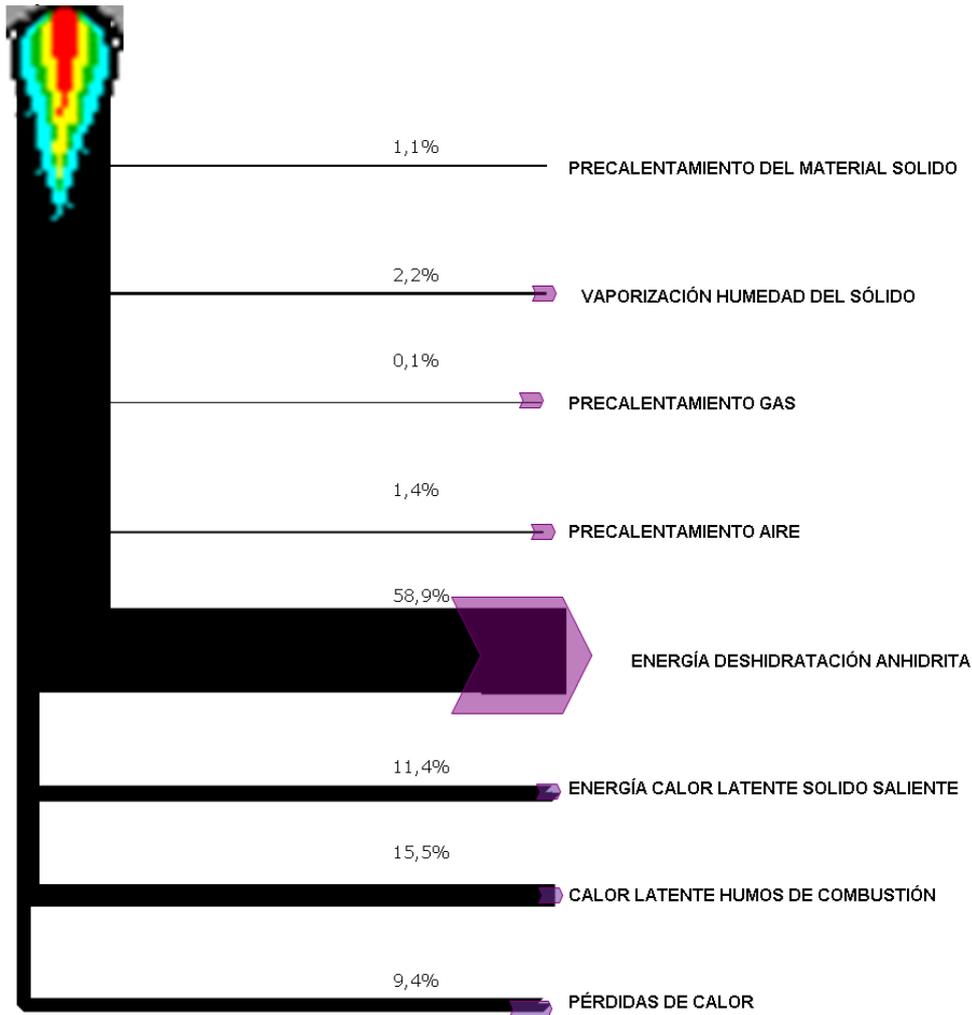


Figura 101. Diagrama de Sankey Balance energético de horno 6.

Los diagramas de Sankey anteriores muestran cómo en ambos casos, la energía de deshidratación de la anhidrita absorbe más del 50% de la energía proporcionada por la combustión de gas natural. También en ambos casos, como se comentará y analizará en los apartados siguientes, una gran parte de la reacción exotérmica de combustión no se utiliza o recupera eficazmente y se pierde en la periferia del sistema en forma de calor latente de los materiales salientes e deficiencias de aislamiento térmico del propio sistema.

3.2.2.3 Conclusiones y rendimientos

Una vez obtenidos los perfiles energéticos, se procede a calcular los rendimientos de los hornos obtenidos. Para ello se ha tenido en cuenta la entrada de energía (consumo de gas natural) respecto a las pérdidas e ineficiencias del horno, que se consideran de forma global como la suma de los siguientes flujos salientes:

- Energía de calor latente del sólido saliente
- Calor latente de los humos de combustión
- Pérdidas de calor e ineficiencias del sistema

RENDIMIENTO TÉRMICO GLOBAL	
HORNO 5	55%
HORNO 6	64%

Tabla 56. Rendimiento térmico global de los hornos

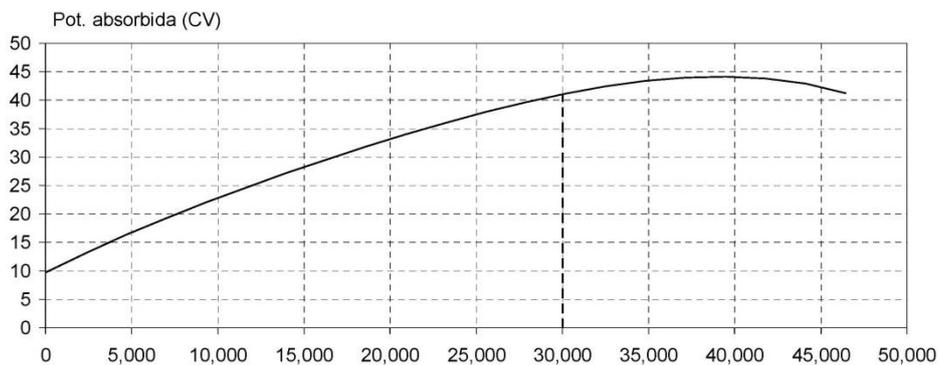
Tal como puede observarse en la Tabla 56, para un caudal de entrada de material similar, el horno 6 tiene un rendimiento superior al horno 5. Por ello se pretende optimizar el más ineficiente y así experimentar mayores mejoras de eficiencia energética y ahorro económico posterior.

De las ineficiencias del sistema analizado (ver diagramas de Sankey) es importante reducir la entrada de aire que actualmente funciona de modo manual (estrangulación mecánica de válvula de entrada de aire) y revisar las pérdidas de calor del sistema (refractarios). Por ello se propone las siguientes propuestas: la instalación de variadores de frecuencia en los ventiladores para la regulación de aire y la mejora del aislamiento térmico.

Los ventiladores están diseñados para ser capaces de asimilar la máxima demanda del sistema en el que están instalados. Pero bastante a menudo la demanda varía muy por debajo de la capacidad de diseño. El ventilador centrífugo imparte energía al aire por fuerza centrífuga. Esto origina un incremento en la presión y produce un caudal de aire a la salida del ventilador.

Muchos sistemas requieren que el ventilador opere en un amplio rango de puntos. Hay varios métodos usados para modular o variar el caudal (o CFM) de un sistema para alcanzar los puntos óptimos. El más interesante es el variador de frecuencia variable. Cambiando la velocidad el ventilador cambia su rendimiento para adaptarse a los cambios producidos a diferentes caudales. Cambiando el caudal, o la velocidad del ventilador, las curvas del sistema son afectados.

Para conocer el ahorro energético que se puede conseguir en un ventilador se debe conocer el rango de caudales o perfil de carga y la curva del ventilador. La Figura 102 y Figura 103 muestran las curvas características de los ventiladores instalados en los hornos H5 y H6.



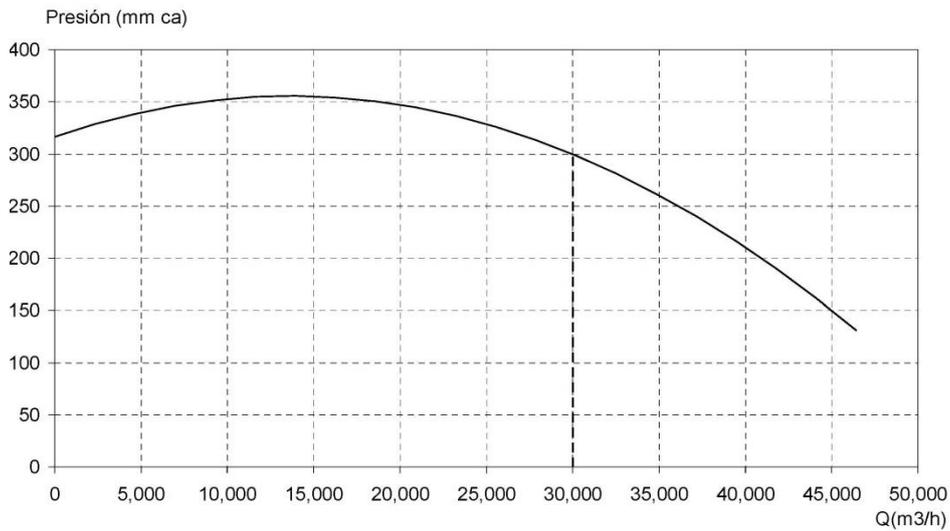


Figura 102. Curvas características y punto de trabajo óptimo del ventilador para el horno n°5

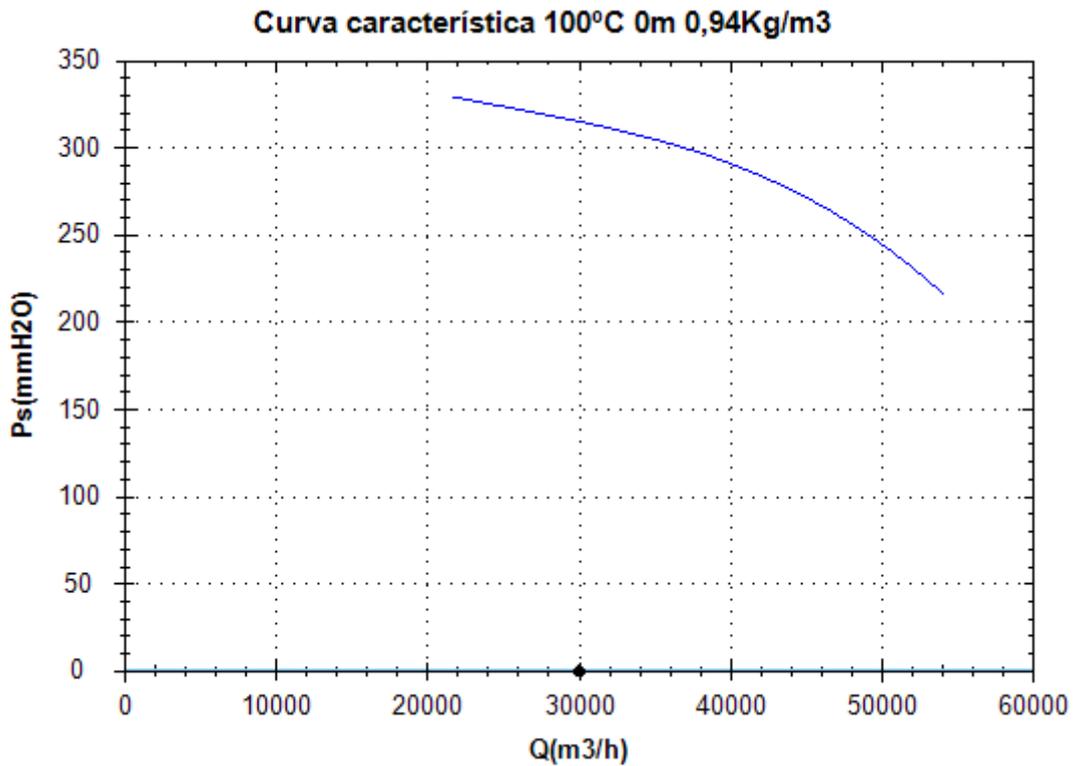


Figura 103. Curva característica en condiciones de trabajo para ventilador para el horno n°6

Los datos del punto de trabajo de los ventiladores, se representan en la Tabla 57. Actualmente la regulación de ambos hornos se realiza de forma manual, ajustando un caudal fijo del 70%. La Tabla 58 muestra la potencia absorbida por el ventilador trabajando con estrangulación mecánica.

	Horno 5	Horno 6
Fabricante	TURBOVENT, SA	CASALS, SL
Tipo	VR63S10U800R	MBRU1121T4
Nº Fabricación	23.485	1.324
Fecha	11/1998	1999
Régimen giro (rpm)	2,075	1,480
Temperatura (°C)	100	100
Altura sobre NM. (m)	0	0
Peso específico (kg/m3)	0.946	0.940
Caudal (m3/h)	30,000	30,000
Caudal máximo (m3/h)	46,000	54,000
Presión (mm.c.a.)	300	315
Potencia absorbida (kW)	30.7	30.6
Potencia máxima (kW)	45	55

Tabla 57. Punto de trabajo óptimo y características ventiladores para hornos de anhídrita nº5 y nº6

	Caudal (%)	% de tiempo	Potencia absorbida (kW)
Horno 5	70%	100%	32
Horno 6	70%	100%	38

Tabla 58. Régimen de trabajo por estrangulación de los ventiladores de los hornos nº5 y nº6

Según una de las leyes de los ventiladores:

- La Potencia (*HP*) variará como el cubo de la relación de velocidades (*S*)

$$\frac{HP_2}{HP_1} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^3$$

Donde:

- HP*₁: Potencia nominal
- HP*₂: Potencia con variador
- S*₁: velocidad nominal
- S*₂: velocidad con variador

Utilizando variadores de frecuencia en lugar de estrangulación mecánica se consigue reducir la potencia absorbida por el ventilador tal como se muestra en la Tabla 59

Se pretende instalar un control con PID que permita regular el caudal de operación del ventilador según otros parámetros de proceso que se estudiarán en el apartado siguiente.

Conociendo el tiempo que el ventilador está trabajando ante cada necesidad de caudal se podrá calcular la potencia necesaria para trabajar con ese caudal y estimar el consumo energético en cada periodo. De esta forma se podrá calcular la potencia ponderada que requiere el ventilador y calcular los consumos totales.

	Caudal (%)	% de tiempo	Potencia absorbida (kW)	Ahorro energético (%)
Horno 5	Variable	100%	15,5	51%
Horno 6	Variable	100%	19	50%

Tabla 59. Cálculo de ahorros energéticos en condición real para los hornos n°5 y n°6 con variadores de frecuencia

La diferencia entre el consumo a capacidad fija y a capacidad variable será el ahorro que se puede conseguir utilizando sistemas como los variadores de frecuencia.

Otra mejora substancial en la gestión energética de los hornos de calcinación de anhidrita es la mejora de su aislamiento. Se ha realizado un análisis termográfico (Figura 104) de los diferentes hornos de anhidrita para evaluar posibles malos aislamientos y deficiencias. Se adjuntan diferentes fotos termográficas.

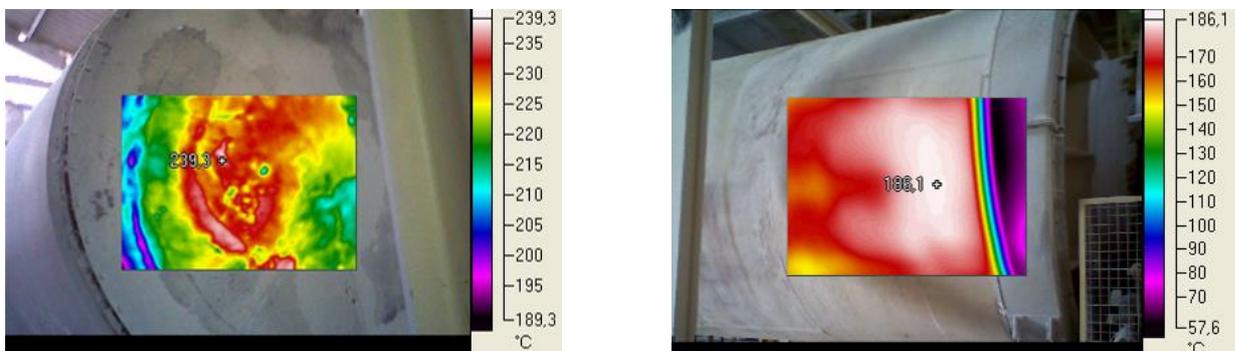


Figura 104. Termografía hornos de calcinación de anhidrita

Según diagrama energético, las pérdidas de calor son suficientemente importantes como para revisar y reponer el material aislante o refractario que se haya podido dañar durante el funcionamiento habitual del horno. Por ello son importantes las revisiones periódicas termográficas.

3.3 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

3.3.1 Variables implicadas en la calcinación de la Anhidrita

En el actual apartado se realizará un análisis de las variables que intervienen en la calcinación de la anhidrita mediante un horno rotativo. El análisis será del tipo tradicional, evaluando la dispersión de cada variable y su histograma, así como la relación entre las principales variables entre sí.

Se relacionarán las variables directas e indirectas de las que se tengan datos o cuantitativas. En el apartado 3.8 se trabajará con un espectro más amplio de variables, ya que se valoraran también las variables cualitativas y las que de una forma mucho más indirecta puedan afectar al proceso.

La gran cantidad de datos de trabajo (más de 80 variables con más de 700.000 entradas de datos en un periodo de dos años) da la ventaja de poder extraer información muy fidedigna del proceso, pero ello requerirá una gran potencia de cálculo, por lo que se deben tratar los datos con programas aptos. En éste trabajo se usará el software Matlab y Minitab de forma indistinta.

En la Figura 105 se presentan las variables que la fábrica ha tenido en cuenta para la producción de anhidrita II en los últimos años y que se dispone de registro anual de ellas. Algunas de estas variables están registradas a partir del sistema de control Scada que posee la fábrica y por otro lado, hay otras variables que se toman de forma manual y puntual diaria a partir de lecturas del operario, así como varias otras formas de registro de los datos.

Para el caso de los datos procedentes del sistema de control Scada, la información se dispone en paquetes de datos continuos con escala de tiempo mínima de un minuto. Por otro lado, existen datos procedentes de sondas digitales del horno tomados por el operario de 6 a 8 veces día. Para el caso de los parámetros físico-químicos analizados en el laboratorio para caracterizar el material a calcinar, la fábrica disponía de datos desde 2006 de algunas variables de proceso (horno y laboratorio) y por ello se han tratado y filtrado para poder correlacionarlos entre si a partir de la misma base temporal. Los datos de Scada se han incorporado a partir de 2010. Una vez colocados los datos correspondientes a la misma escala horaria (cada dos horas), se ha procedido a analizar los resultados y sacar conclusiones estadísticas.

En la Tabla 60 se muestra el listado completo de las variables que se considera que pueden afectar directa o indirectamente al proceso. Dicha tabla es exhaustiva y en el capítulo 3.8 se trabajará mediante RB con todas estas variables.

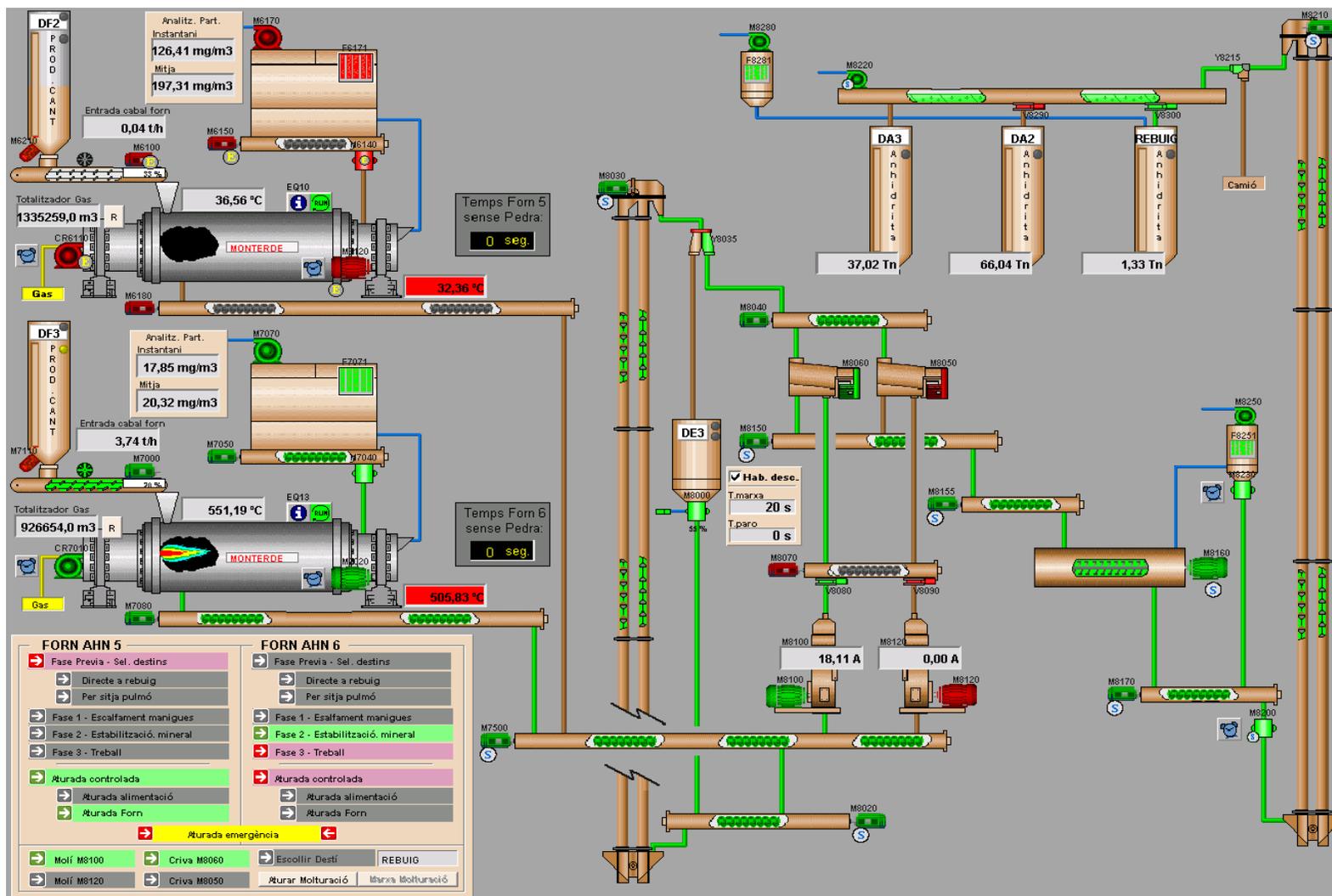


Figura 105. Sistema Scada para hornos 5 y 6 de proceso de calcinación de anhidrita

Código	Nombre	Unidades	Lectura
V01	Intensidad Molino M8100	A	Continua
V02	Intensidad Molino M8120	A	Continua
V03	Caudal Material H5	Tm/h	Continua
V04	Caudal Material H6	Tm/h	Continua
V05	Instant Partículas H5	mg/Nm3	Continua
V06	Instant Partículas H6	mg/Nm3	Continua
V07	Media Partículas H5	mg/Nm3	Continua
V08	Media Partículas H6	mg/Nm3	Continua
V09	Temp Refractario H5	°C	Continua
V10	Temp Refractario H6	°C	Continua
V11	Temp Refractario H5	°C	Manual
V12	Temp Refractario H6	°C	Manual
V13	Temp Material H5	°C	Continua
V14	Temp Material H6	°C	Continua
V15	Temp Material H5	°C	Manual
V16	Temp Material H6	°C	Manual
V17	Caudal de gas H5	m3/h	Continua
V18	Caudal de gas H6	m3/h	Continua
V19	Volumen de gas H5	m3	Manual
V20	Volumen de gas H6	m3	Manual
V21	Temp Salida Mat H5	°C	Manual
V22	Temp Salida Mat H6	°C	Manual
V23	Temp emisión H5	°C	Manual
V24	Temp emisión H6	°C	Manual
V25	Velocidad Rotación H5	rpm	Manual
V26	Velocidad Rotación H6	rpm	Manual
V27	Pres Dif Tiro Manual H5	grados	Manual
V28	Pres Dif Tiro Manual H6	grados	Manual
V29	Pres Dif Tiro H5	hPa	Manual
V30	Pres Dif Tiro H6	hPa	Manual
V31	Caudal emisiones H5	Nm3/h	Manual
V32	Caudal emisiones H6	Nm3/h	Manual
V33	Caudal AnII H5	Tm/h	Continua
V34	Caudal AnII H6	Tm/h	Continua
V35	Extracción de H2O H5	% en peso	Manual
V36	Extracción de H2O H6	% en peso	Manual
V37	Velocidad Enfriador	rpm	Manual
V38	Pres Dif Enfriador	hPa	Manual
V39	Caudal Enfriador	Nm3/h	Manual
V40	Temp Ent Silo	°C	Manual
V41	Luz Criba Molino 2º	mm	Manual
V42	Granul Entrada	%>1mm	Manual
V43	Pureza Mineral	% H2O comb	Manual
V44	Humedad Libre	% H2O	Manual
V45	Grado Cal An	mm H2O prov	Manual
V46	Reactiv An	-	Manual
V47	Agua Comb 2ª	% H2O comb 2ª	Manual

Código	Nombre	Unidades	Lectura
V48	Granul M >0,2 Labo	%>0,2mm	Manual
V49	Granul M>0,8	%>0,8mm	Manual
V50	Granul M >0,2 Horn	%>0,2mm	Manual
V51	pH de An	pH	Manual
V55	Intensidad Molino Min	A	Manual
V56	Luz Criba Molino Min	mm	Manual
V57	Intensidad Molino 1º	A	Continua
V58	Luz Criba Molino 1º	mm	Manual
V59	Caudal Mat Filtro	Tm/h	Manual
V60	Frente Explotación	-	Manual
V61	Densidad An	kg/m3	Manual
V62	Exper Operario	-	Manual
V63	Tipo Turnos	-	Manual
V64	Ritmo Producción	Tm/h	Manual
V65	TRS equipos	%	Manual
V66	RO equipos	%	Manual
V67	Nivel Engrase	%	Manual
V68	Ratio Preventivo	%	Manual
V69	Rendimiento	%	Manual
V70	Forma Llama	-	Manual
V71	Día Sem	-	Manual
V72	Día Mes	-	Manual
V73	Mes	-	Manual
V74	Estación	-	Manual
V75	Temp Media	°C	Manual
V76	Temp Max	°C	Manual
V77	Temp Min	°C	Manual
V78	Precipitación	mm	Manual
V79	Hum Rel	%	Manual
V80	Presión Atm	hPa	Manual
V81	Irradiación Sol	MJ/m2	Manual
V82	VMed Viento	m/s	Manual
V83	Dirección Viento	grados	Manual
V84	Ráfaga Viento	m/s	Manual

Tabla 60. Variables implicadas en el proceso de calcinación de anhidrita

3.3.2 Variables directas principales del proceso de producción de Anhidrita

En el estudio de las variables implicadas en el proceso se centrará en un análisis estadístico de las mismas considerando sólo las variables directas del horno 5 y únicamente las que debido a la experiencia están íntimamente ligadas al proceso esencial de la calcinación. Estas variables se reportan de forma continua o periódicamente. En la Figura 106 se puede ver un esquema gráfico de las variables implicadas en el proceso en el punto de medición.

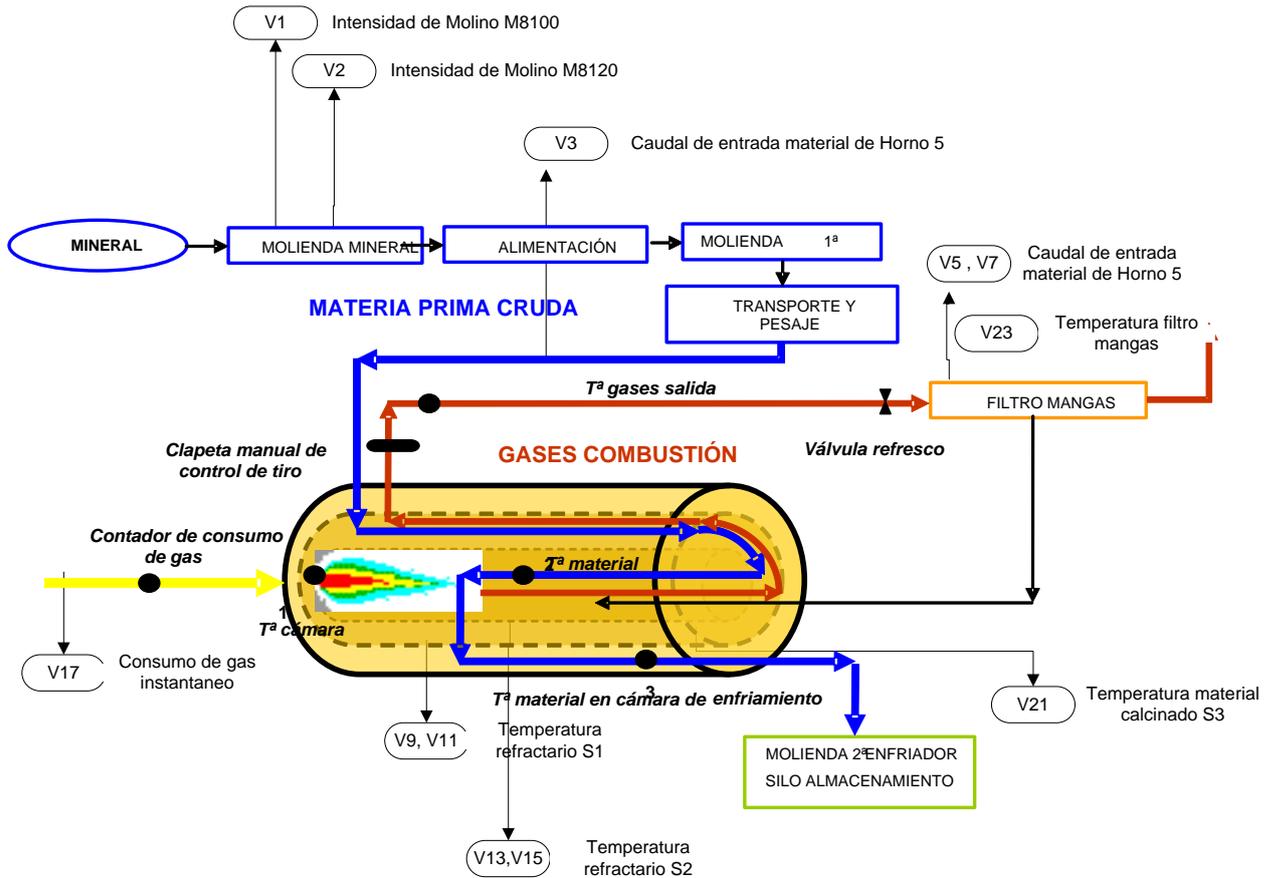


Figura 106. Flujograma del proceso de calcinación y variables implicadas

En la Tabla 61 se relacionan las variables que se analizarán, con el objetivo de usarlas en la automatización mediante lazos de control PID y así autorregular el proceso de calcinación. En el Anexo I se encuentran los resultados obtenidos para cada una de las variables analizadas.

Código	Nombre	Unidades	Proceso
V03	Caudal Material	Tm/h	Q_m
V05	Instant Partículas	mg/Nm ³	P_i
V07	Media Partículas	mg/Nm ³	P_m
V09	Temp Refractorio	°C	T_r
V11	Temp Refractorio	°C	T_{rman}
V13	Temp Material	°C	T_m
V17	Caudal de gas	m ³ /h	Q_g
V19	Volumen de gas	m ³	V_g
V21	Temp Salida Mat	°C	T_s
V23	Temp emisión	°C	T_e
V31	Caudal emisiones	Nm ³ /h	Q_e

Tabla 61. Variables principales de proceso en la calcinación de anhídrita

3.3.3 Relación entre las principales variables de la calcinación

En el siguiente apartado se realizará la correlación entre las principales variables del sistema de las que se tengan bastantes datos como para que sea significativas, así mismo, se estudiarán las variables que sean necesarias que permitan el diseño de un posterior sistema de automatización y un modelado de la fabricación de anhidrita mediante redes bayesianas.

En las siguientes tablas (Tabla 62) y figuras se muestran las correlaciones estadísticas y la bondad de su ajuste de las variables implicadas. Se muestran gráficamente algunas de estas relaciones.

Variable	Comparación	Fórmula	R-cuad.
V03	V05	$V03 = 0,618 + 0,160 V05$	84,3%
	V07	$V03 = 0,505 + 0,165 V07$	86,6%
	V09	$V03 = - 0,208 + 0,00799 V09$	95,7%
	V13	$V03 = - 0,378 + 0,0116 V13$	96,4%
	V17	$V03 = 0,0244 + 0,0586 V17$	96,9%
V05	V07	$V05 = 0,375 + 0,987 V07$	94,6%
	V09	$V05 = - 1,02 + 0,0432 V09$	84,8%
	V13	$V05 = - 1,86 + 0,0628 V13$	85,0%
	V17	$V05 = 0,638 + 0,312 V17$	84,1%
V07	V09	$V07 = - 1,02 + 0,0432 V09$	87,3%
	V13	$V07 = - 1,87 + 0,0627 V13$	87,6%
	V17	$V07 = 0,638 + 0,312 V17$	86,4%
V09	V13	$V09 = - 10,5 + 1,43 V13$	97,6%
	V17	$V09 = 58,6 + 6,99 V17$	91,6%
V13	V17	$V13 = 44,3 + 4,93 V17$	95,8%
	V23	$V13 = 436 + 1,34 V23$	26,9%

Tabla 62. Correlaciones significativas entre variables implicadas en el proceso de calcinación de la anhidrita

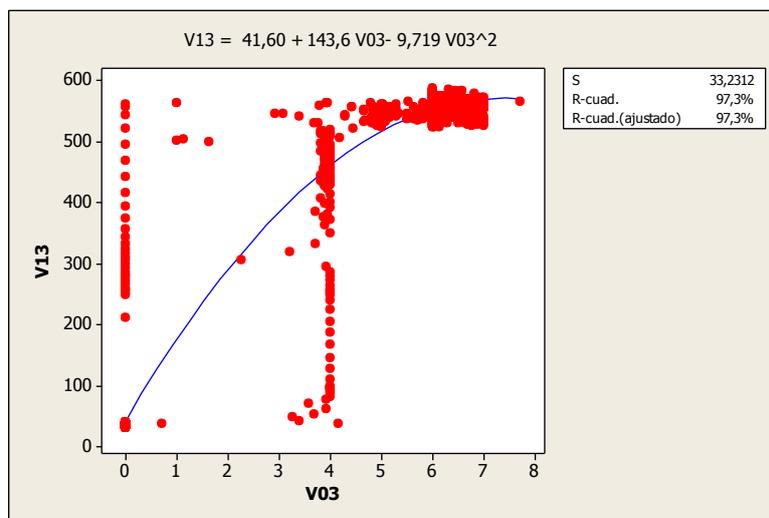


Figura 107. Regresión entre las variables V03 y V13

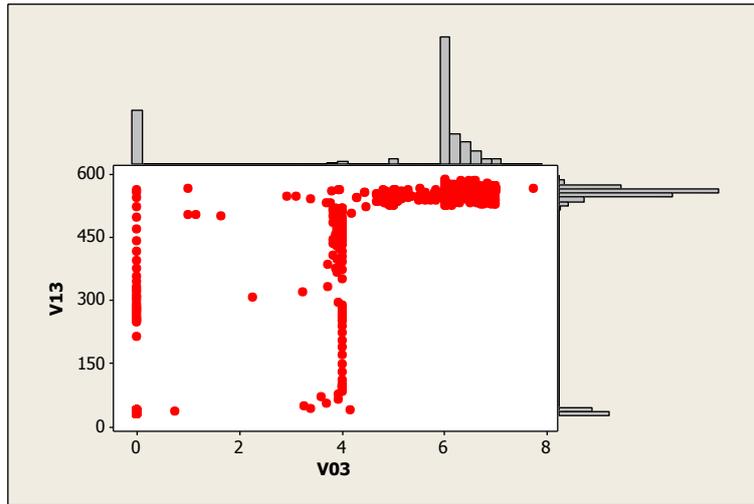


Figura 108. Distribución marginal entre las variables V03 y V13

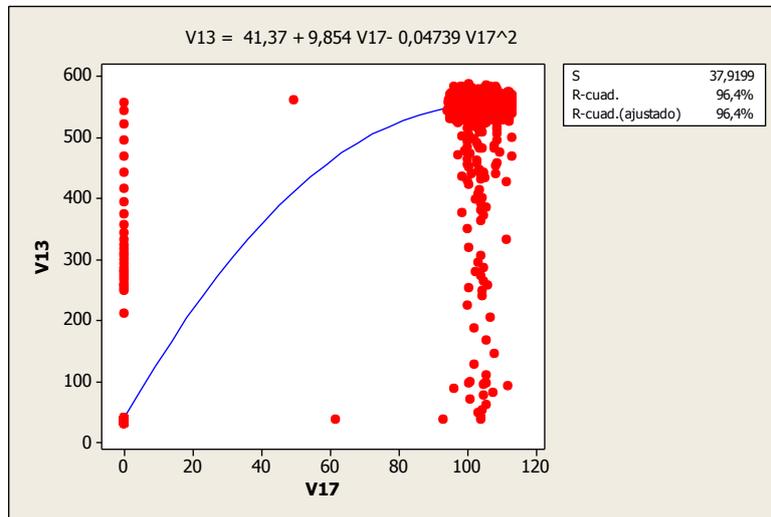


Figura 109. Regresión entre las variables V17 y V13

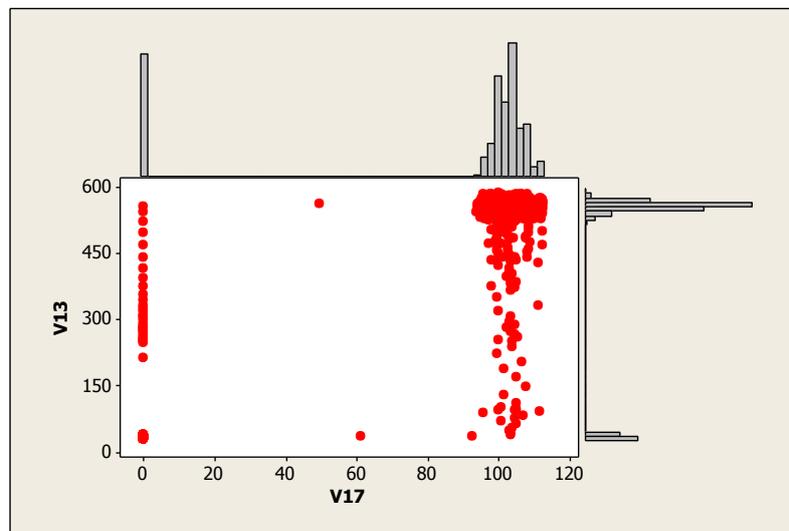


Figura 110. Distribución marginal entre las variables V17 y V13

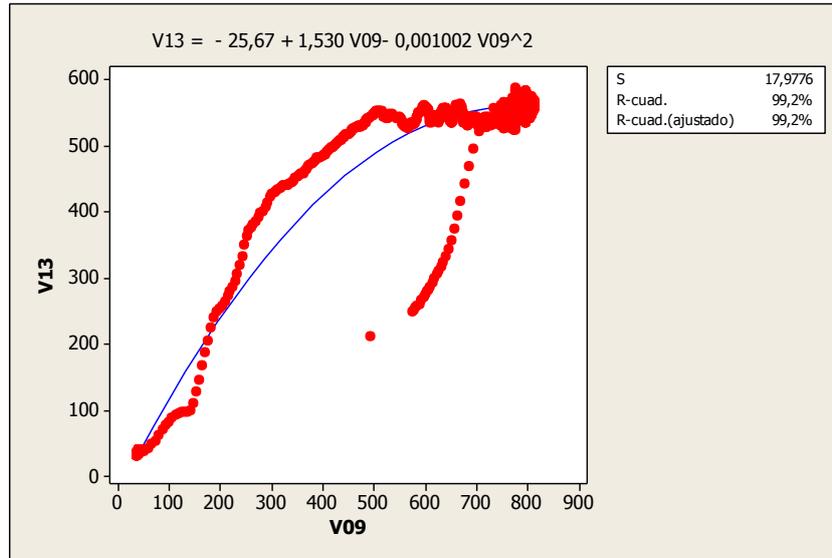


Figura 111. Regresión entre las variables V09 y V13

En las figuras anteriores (Figura 107 a Figura 111) se han comparado las variables de proceso con la variable consigna V13, es decir, la temperatura de material. Esta variable determina si la anhidrita calcinada será correcta o no, de ahí la importancia de la misma.

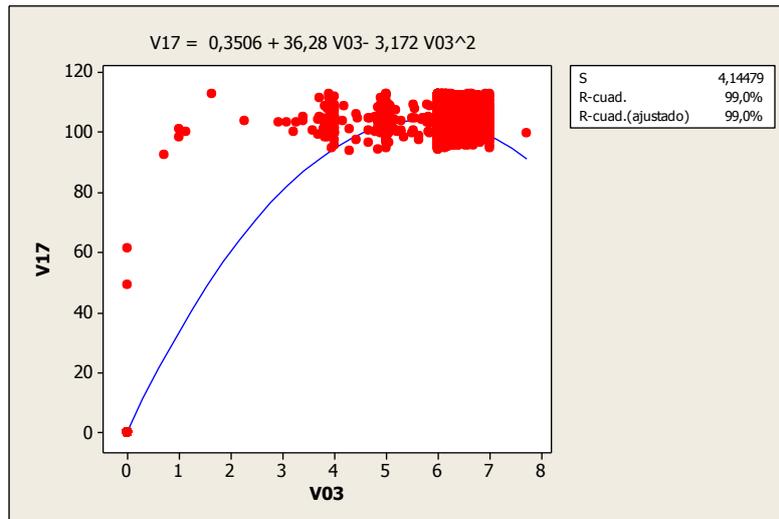


Figura 112. Regresión entre las variables V03 y V17

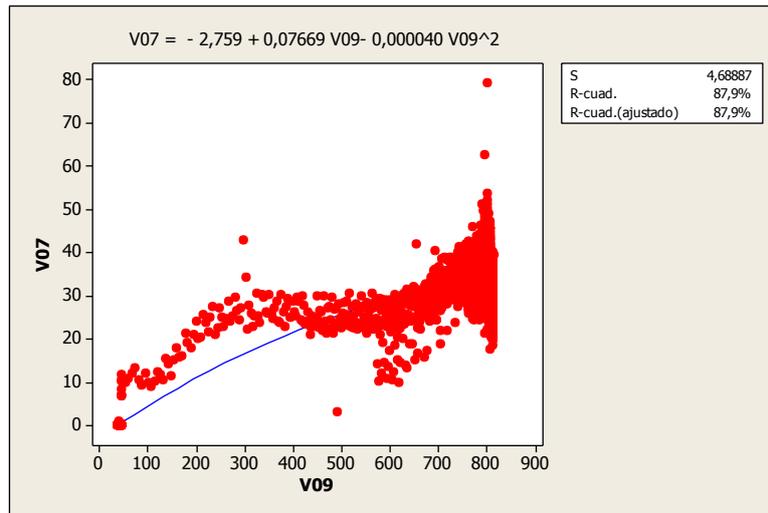


Figura 113. Regresión entre las variables V09 y V07

La Figura 112 muestra la relación entre el caudal de material y el caudal de gas y la Figura 113 muestra la correlación cuadrática entre la temperatura del refractario y la emisión de partículas a la atmósfera, observando que existe un grado razonable de correlación.

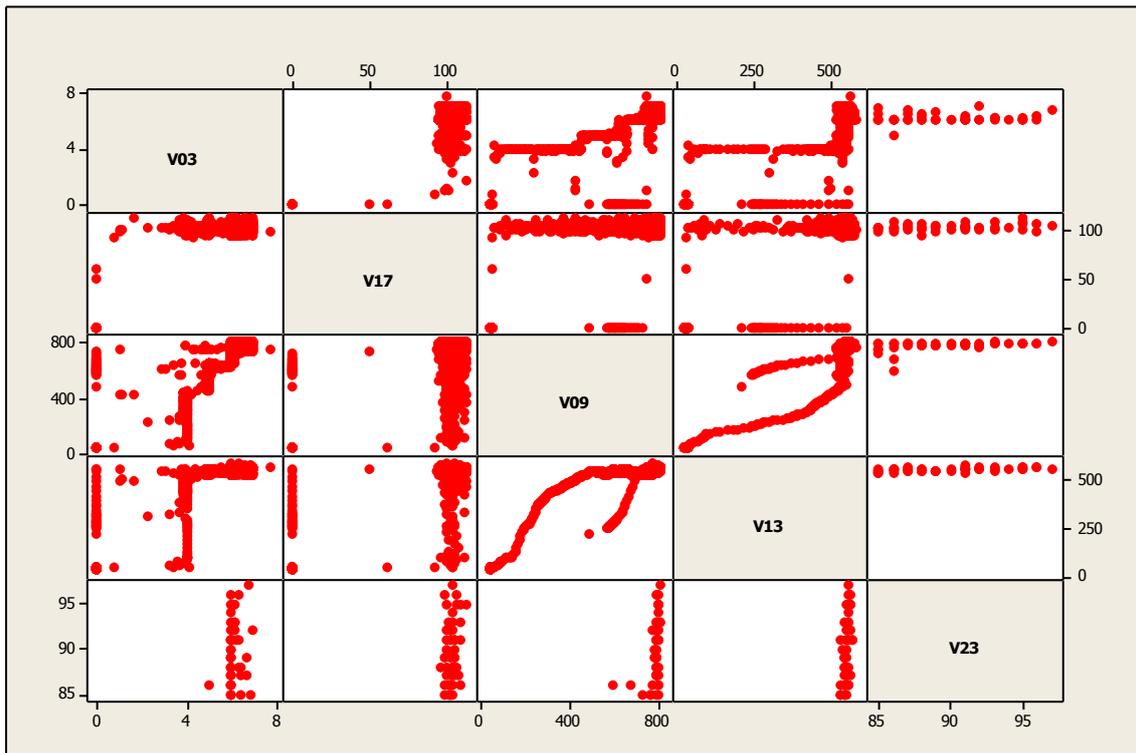


Figura 114. Matriz de correlación entre las principales variables implicadas

La Figura 114 muestra gráficamente la relación entre las principales variables de control del sistema. Estas variables correlacionadas, cuya implicación se muestra en la Tabla 63, se pueden expresarlas de una forma conjunta en la expresión:

$$V13 = 17,4 - 12,3 V03 + 0,464 V09 + 2,41 V17$$

Ésta expresión tiene un coeficiente R-cuad. de 98,9%, cosa que determina su bondad de ajuste.

	V03	V17	V13	V09	V05
V17	0,984				
V13	0,982	0,979			
V09	0,978	0,957	0,988		
V05	0,918	0,917	0,922	0,921	
V07	0,930	0,929	0,936	0,935	0,973

Tabla 63. Coeficiente de correlación entre las principales variables

Como conclusión de este estudio de variables, se puede determinar que el sistema de automatización y control industrial para autorregular el horno de anhidrita deberá gestionar las variables mostradas en la Tabla 64. Esto permitirá controlar el horno mediante dispositivos PID integrados en la programación PLC tal como se verá en el apartado 3.7. Para ello se deberá automatizar la recogida de datos de las variables V23 y V31, que hasta el momento actual no estaban automatizadas y poder realizar el control automático mediante la pantalla Scada de los parámetros Q_g y Q_e , los cuales hasta el momento se controlaban de forma manual.

Proceso	Parámetros de control
Caudales	Material Q_m
	Gas Natural Q_g
	Emisiones Q_e
Temperaturas	Material T_m
	Refractario T_r
	Emisiones T_e

Tabla 64. Variables de control para el proceso de calcinación

3.5 SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

3.5.1 Gestión mediante sistema MES

El sistema de fabricación MES (Manufacturing Execution System) (AEmes v.1.8) permite realizar la gestión, control y seguimiento de equipos y datos que se adquieren o son procesados durante las fases de fabricación de los procesos de recepción (molienda primaria), hornos de semihidrato y anhídrita y torres 1 y 2 de mezclado. El sistema realiza un control con almacenamiento de datos en cualquier punto desde que se efectúa la recepción de la materia prima, pasando por todos los procesos internos controlados por éste, hasta la expedición del producto fabricado.

El sistema trabaja en conexión a una base de datos instalada en el servidor central SRVMES01 donde se encuentran almacenadas materias, productos, fórmulas e instrucciones de todas las operaciones y parámetros con los que trabajan las líneas y equipos de la planta. La gestión de todas estas operaciones se realiza a través del programa AEmes versión 1.8 el cual trabaja directamente con la base de datos y que se encuentra disponible en las estaciones de trabajo Pc-Scada1 (Scada torres 1 y 2), Pc-Scada2 (Scada hornos semihidrato y anhídrita) y Pc-Scada3 (Scada recepciones) con la posibilidad de ser instalado en todas aquellas estaciones que tengan acceso a la red de producción.

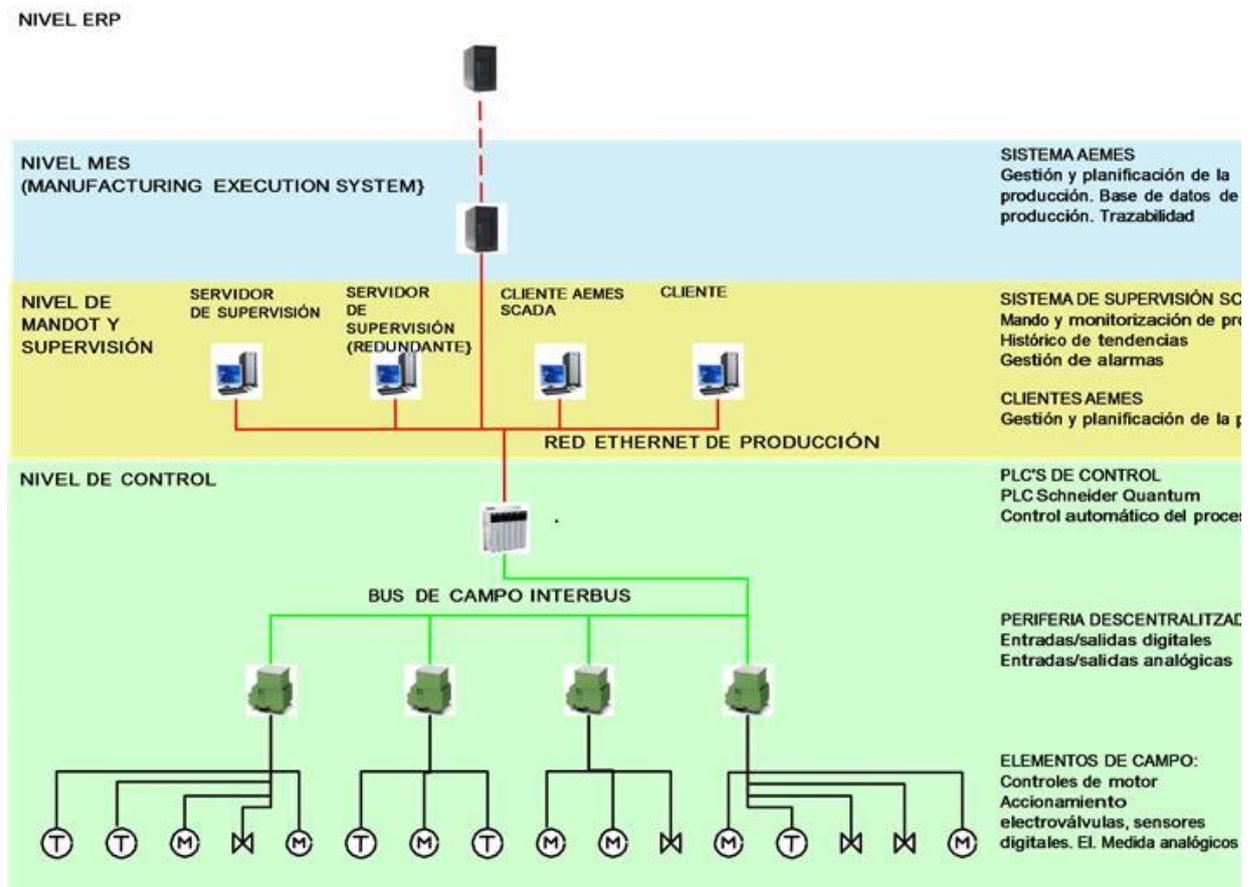


Figura 115. Esquema jerárquico del control industrial

El control y monitorización de la producción se enfoca, específicamente, a los equipos y elementos que son supervisados en tiempo real desde los PCs y a través del sistema Scada Citect Versión 5.50 Service Pack C que se encuentra disponible en

las estaciones de trabajo Pc-Scada1 (Scada torres 1 y 2), Pc-Scada2 (Scada hornos semihidrato y anhídrita) y Pc-Scada3 (Scada recepciones) (Figura 115).

Las fórmulas son gestionadas y procesadas a través de la planificación u órdenes de trabajo aplicando criterios y directrices de seguridad para ser enviadas a los procesos según demanda y necesidades de éstos.

En todo momento se realiza un registro de alarmas y acciones para generar un seguimiento de fallos y posibles cambios de condiciones de trabajo durante la fabricación de un lote específico. A través del módulo de trazabilidad se accede al propio histórico de datos para poder realizar consultas personalizadas y obtener listados e informes configurables por el propio usuario sobre la fabricación, movimientos y eventos generados por las unidades asociadas a un identificador de producción junto a la posibilidad de realizar búsquedas de producciones específicas.

Las presentes especificaciones están basadas según los siguientes diagramas: de control (Figura 116) y de proceso (Figura 117)

3.5.1 Procesos por lotes Torre 1, 2 y ensaque

Estos procesos están destinados a obtener productos a través de la mezcla de un conjunto de materias simples, compuestas o semielaboradas mediante equipos para tal efecto como básculas, inyectores, adiciones manuales, mezcladoras, etc.

Las líneas trabajan con una fórmula la cual contempla productos y cantidades a dosificar de la composición junto a parámetros de equipos y de la propia línea de trabajo para establecer consignas y valores máximos / mínimos para el conjunto de mezclas que forman el lote de fabricación.

Las órdenes de trabajo asociadas a este tipo de procesos permiten la selección libre de una fórmula junto a una cantidad para ser procesada (n mezclas según parametrización de la fórmula) y el producto resultante de la composición transportado al destino final seleccionado.

En la planta se contemplan dos líneas de mezclado las cuales son denominadas como torre 1 y torre 2 y que controlan un número definido de equipos formado por básculas, mezcladoras y transportes listados en el apartado Equipos Planta.

La interacción y operaciones de estas dos líneas se hará de forma independiente respecto ambas y a través de la generación de órdenes de trabajo generadas por los propios operadores. A contemplar que las fórmulas y productos podrán ser compartidas por las dos líneas de producción con opción de restringir el procesamiento de alguna de ellas según criterios de producción.

Se establece un número máximo de 2 mezclas simultáneas dentro del ciclo de fabricación por razones o limitaciones específicas del proceso.

Existirá la posibilidad de realizar dosificaciones de productos de cualquier fórmula por cualquiera de las básculas (según repartición de productos en silos) teniendo la obligatoriedad de utilizar como mínimo la báscula de mayoritarios (torre1 - BA1, torre2 - BA2) para el inicio de ciclo.

Aquellos depósitos o silos que sean compartidos por más de un equipo dosificador se realizarán la dosificación de forma simultánea.

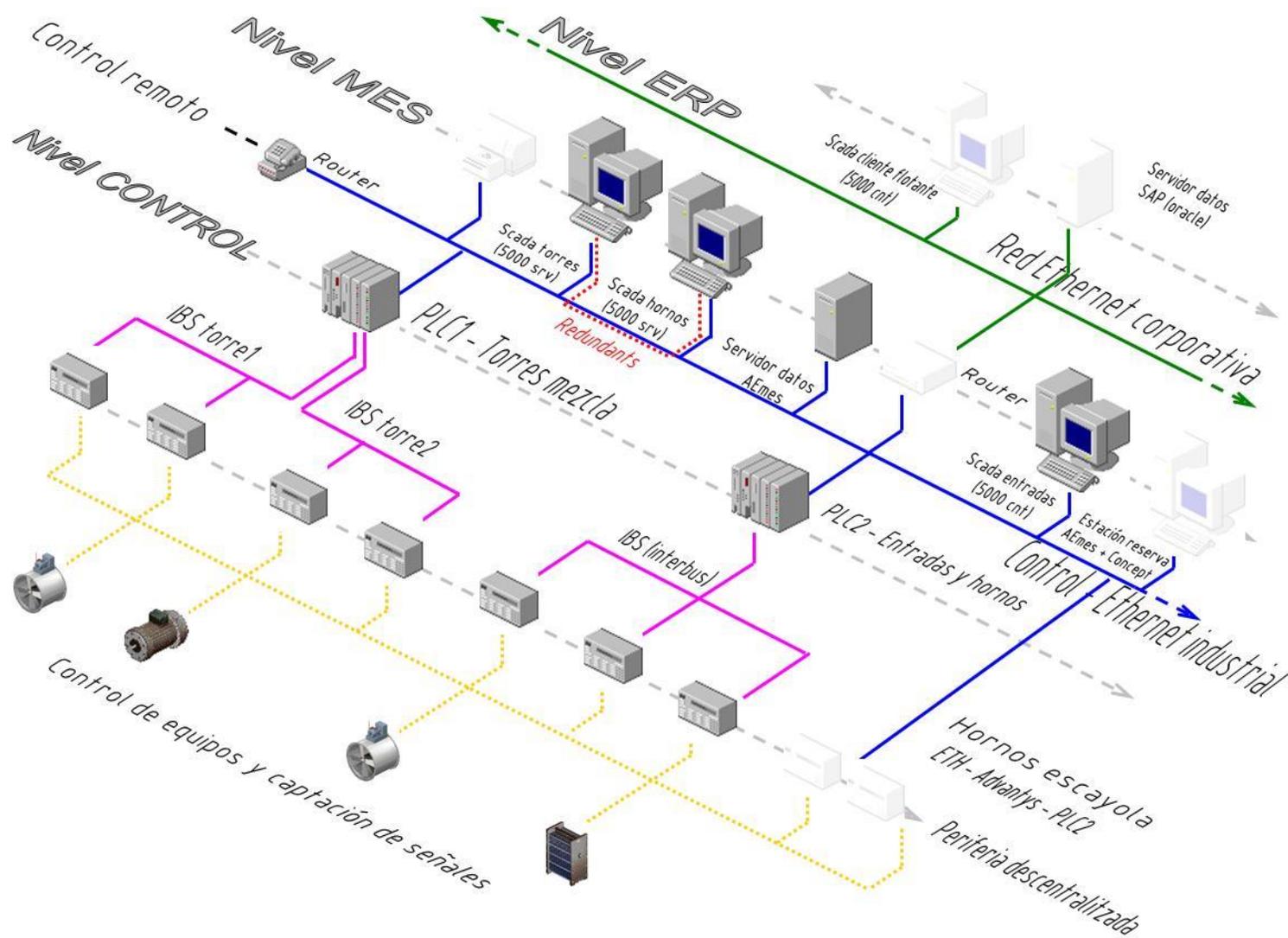


Figura 116. Arquitectura de control

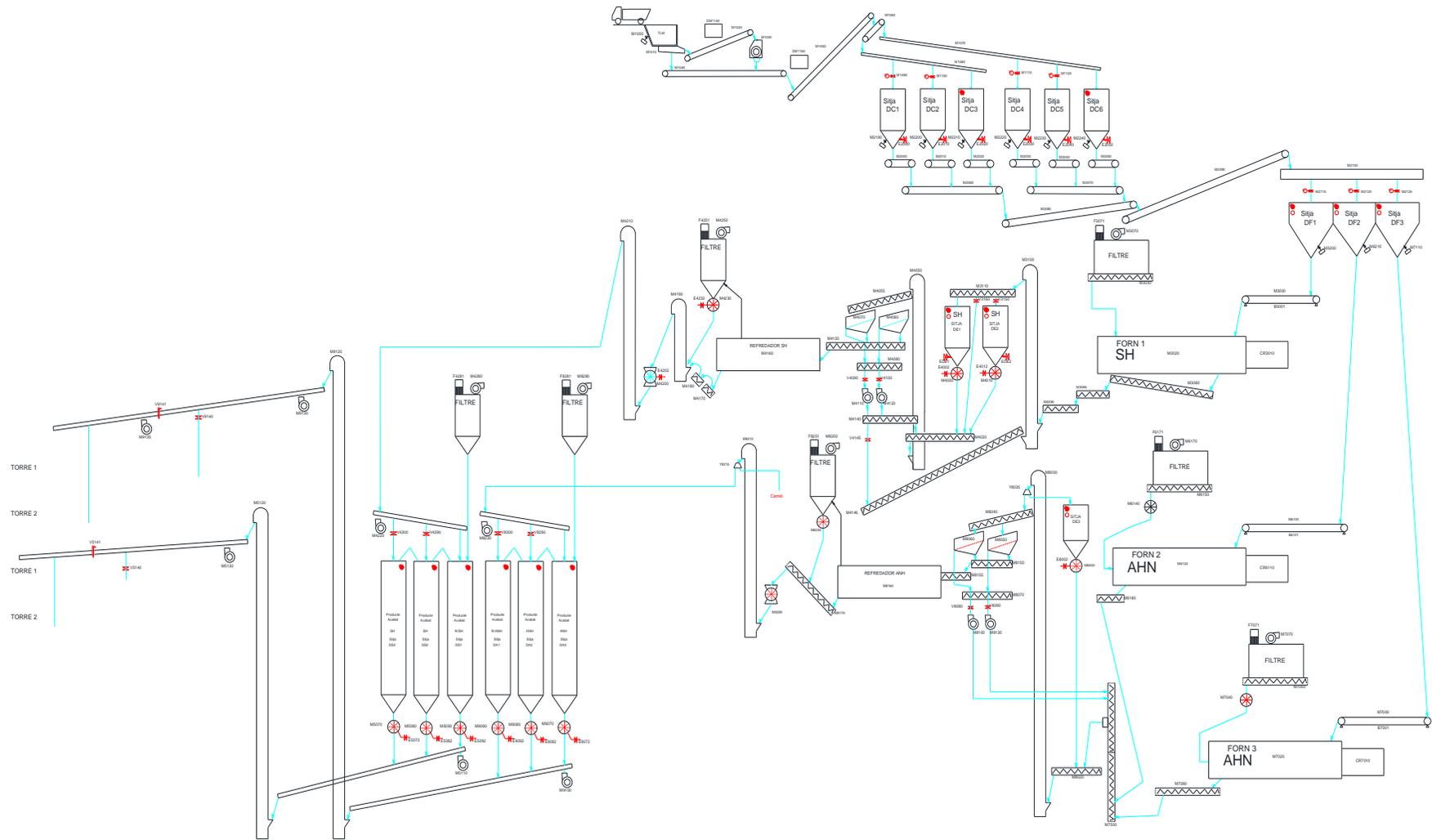


Figura 117. Diagrama de proceso

En el caso de la torre 2 también se iniciarán las pruebas con la misma operativa pero condicionando un posible enclavamiento u orden de dosificación a posibles limitaciones mecánicas. Se hace referencia a los siguientes equipos:

Torre 1: Silo DJ8: M204.3 + V205.3 -> BA1 - Báscula mayoritarios 4000 kg
Silo DJ8: M306 + M305.1 + V307.1 -> BA2 - Báscula medianos 200 kg

Torre 2: Silo TDJ1: TM1070 + TV1080 -> BA4 - Báscula mayoritarios 4000 kg
Silo TDJ1: TV1460 -> BA5 - Báscula medianos 200 kg

En ambas torres se contemplan equipos de adición manual (AM_MZ2 y AM_MZ4) de productos para operaciones temporales y ser incorporados en las mezcladoras de proceso:

Torre 1: Equipo de aditivos manuales AM_MZ2 incorpora en MZ1 (mayoritarios)
Torre 2: Equipo de aditivos manuales AM_MZ4 incorpora en MZ4 (minoritarios)

Los productos a añadir manualmente serán incorporados de igual forma en la composición de la fórmula haciéndose la petición de éstos (desde sistema Scada) en el momento especificado del proceso.

Línea dosificación Torre 1:

El proceso está compuesto por las básculas de dosificación BA1 (mayoritarios), BA2 (medianos) y BA3 (minoritarios), AM_MZ2 (aditivos manuales) las cuales extraen productos de los almacenes DJ5, 6, 8 y 9 para BA1, DJ8, DT10 y 11 para BA2, DN14 a DN 25 para BA3. En el caso de los aditivos manuales AM_MZ2 dispondrá de los productos existentes en el almacén multiproducto habilitado para tal. La dosificación de estos productos será enviado a la/s mezcladoras MZ1 (BA1, AM_MZ2) y MZ2 (BA2, BA3) a través de los equipos de descarga de cada uno de ellos. Una vez el producto en el equipo mezclador MZ1 se procede a la incorporación de los productos desde MZ2 y de INJ_PER01 (perlita). Una vez mezclados todos los productos y finalizado los tiempos establecidos, el producto es enviado a los depósitos destinos de DG7 a DG11, línea de ensaque o bien a biga-bag.

Línea dosificación Torre 2:

El proceso está compuesto por las básculas de dosificación BA4 (mayoritarios), BA5 (medianos), BA6 (minoritarios), BA7 (minoritarios), AM_MZ4 (aditivos manuales) las cuales extraen productos de los almacenes TDJ1 a 4 para BA4, TDJ1, TDT1 y 2 para BA5, TDN1 a TDN5 para BA6 y TDN6 a TDN10 para BA7. En el caso de los aditivos manuales AM_MZ4 dispondrá de los productos existentes en el almacén multiproducto habilitado para tal. La dosificación de estos productos será enviado a la/s mezcladoras MZ3 (BA4) y MZ4 (BA5, BA6, BA7 y AM_MZ4) a través de los equipos de descarga de cada uno de ellos. Una vez el producto en el equipo mezclador MZ3 se procede a la incorporación de los productos desde MZ4 y de INJ_PER02 (perlita). Una vez mezclados todos los productos y finalizado los tiempos establecidos, el producto es enviado a las tolvas de ensaque TT8100 y TT8300 para alimentar las dos ensacadoras existentes.

Línea de ensaque:

No se realiza ningún control sobre estas líneas desde el sistema AEmes contemplando sólo el envío de producto desde Torre 1 y 2 a sus respectivas tolvas de alimentación.

Tener presente que las tolvas de almacenamiento y alimentación sobre estas líneas T605, TT8100 y TT8300 serán tratadas como depósitos de forma que cada vez que el operador decida seleccionar una de ellas para enviar producto desde cualquiera de las torres deberá realizar una acción de validación y vaciado. Se recomienda esta seguridad para evitar el mezclado de productos en la fase de ensaque.

3.5.2 Procesos en continuo Hornos semihidrato y anhídrita

Estos procesos están destinados a realizar un tratamiento térmico a la materia simple, producto compuesto o semielaborado que sea incorporado o procesado mediante equipos para tal efecto como alimentadores, hornos, enfriadores... Este tipo de líneas una vez han procesado el trabajo provocan un cambio de presentación (polvo...) de forma que el producto tratado es identificado como nuevo dentro del sistema según proceso.

Las líneas trabajan con una fórmula la cual contempla productos y cantidades a incorporar de la composición junto a parámetros de equipos y de la propia línea de trabajo para establecer consignas y valores máximos / mínimos para el lote de fabricación (estos procesos trabajan con un único lote y nunca se contempla la posibilidad de crear mezclas dentro de éste).

Las órdenes de trabajo asociadas a este tipo de procesos son enviadas de forma manual a través de la selección libre de una fórmula (cantidad indefinida) siendo transportado el producto resultante a la destinación seleccionada en la propia orden. El inicio y finalización de estas órdenes será a elección del propio operador y en la frecuencia deseada según necesidades del proceso o de planta por razones de mantenimiento preventivo u otras causas.



Figura 118. Vista silos de estocaje de mineral

Para ambas líneas es necesario de mantener producto en las tolvas de alimentación DF1, 2 y 3 de forma permanente ya que los hornos no pueden funcionar en vacío. Esta operación de carga automática es especificada en el apartado de recepciones, expediciones y movimientos entre almacenes en Línea de carga tolvas alimentación hornos 1, 2 y 3.

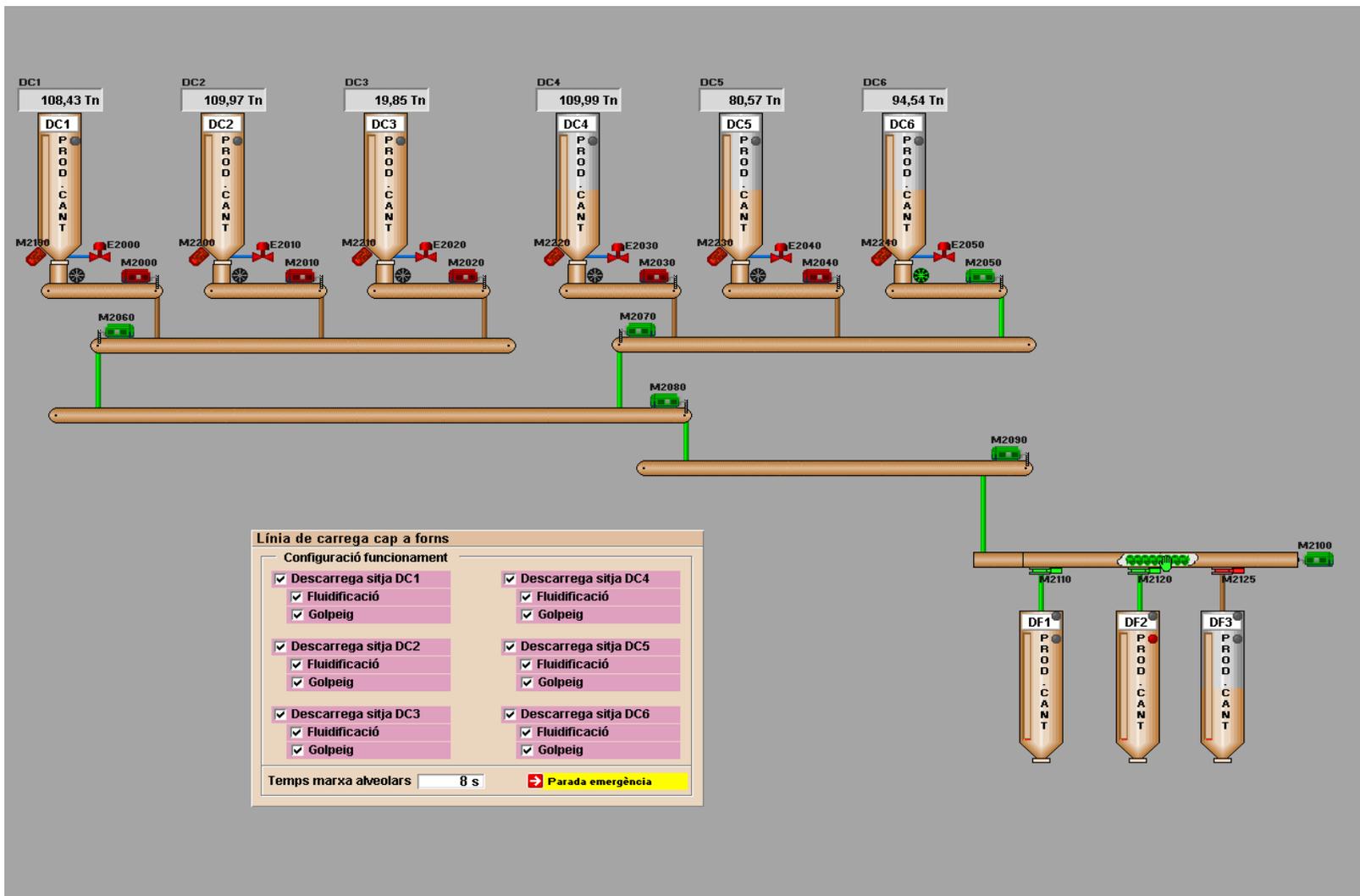


Figura 119. Proceso de carga de material a horno

El conjunto de silos de destino DS1, 2 y 3 para la línea de semihidrato y los silos DA1, 2 y 3 para la línea de anhídrita serán gestionados como dos únicos destinos (DS1+2+3 y DA1+2+3) para cada una de las líneas a nivel de gestión de datos desde el sistema (Figura 118). Aunque sea tratado como un único almacén a nivel de gestión existirá la posibilidad de selección silo a silo significando que desde el sistema Scada existirán los tres silos disponibles de forma independiente (DS1, DS2, DS3 para SH y DA1, DA2 y DA3 para AHN).

En el caso de activación de uno de los niveles de máximo hay capacidad para que todo el producto que existe en el transporte hasta los pulmones sea almacenado en el mismo depósito (Figura 119). En el supuesto que hubiera todos los niveles de máxima activados del grupo de silos se pararía el transporte de producto hasta el pulmón y nunca el horno hasta que no se hubiera llenado éste (Figura 120).

Línea Horno de Semihidrato:

El proceso se compone del horno FORN1 el cual es alimentado desde la tolva DF1 a través del alimentador M3000 para ser enviado el producto a las tolvas DE1 y 2, pasar por los equipos de molturación y enviado al enfriador M4160. Finalmente se envía el producto resultante a un único destino DS1+2+3 a través del transporte a la salida del enfriador.

Maniobra pulmones, molinos y cribas de entrada al enfriador:

A salida del horno existen tres posibilidades de destino siendo a través del pulmón 1, pulmón 2 o haciendo un bypass de ambos. Los propios pulmones contemplan dos modos de funcionamiento:

- Coincidente: Se realiza la descarga del mismo pulmón que se está llenando
- Sincronizado: Se realiza la descarga de aquel pulmón que no está en fase de llenado existiendo la posibilidad de parametrizar una frecuencia de trabajo para realizar una alternancia tanto en el proceso de carga como en el de descarga.

La selección de la criba por la que debe de pasar el producto también será de forma manual pero con la particularidad que el sistema permitirá trabajar con una única o con las dos al mismo tiempo. Por defecto el sistema pondrá en marcha las dos y será el propio operador quien decida parar alguna de ellas en el momento preciso.

La selección del molino de trabajo será a cargo del operador y el sistema sólo permitirá trabajar de forma simultánea con uno de los dos equipos.

El acceso a los parámetros de los variadores de frecuencia referidos al control del alimentador de las cribas se realizará desde el sistema Scada y de forma manual.

Línea Hornos de Anhídrita (Figura 105):

El proceso se compone del horno FORN2, y FORN3 los cuales son alimentados desde las tolvas DF2 y3 a través de sus respectivos alimentadores (M6100 y M7000) para ser pasado el producto por los equipos de molturación y enviado al enfriador M8160. Finalmente se envía el producto resultante a un único destino DA1+2+3 a través del transporte a la salida del enfriador.

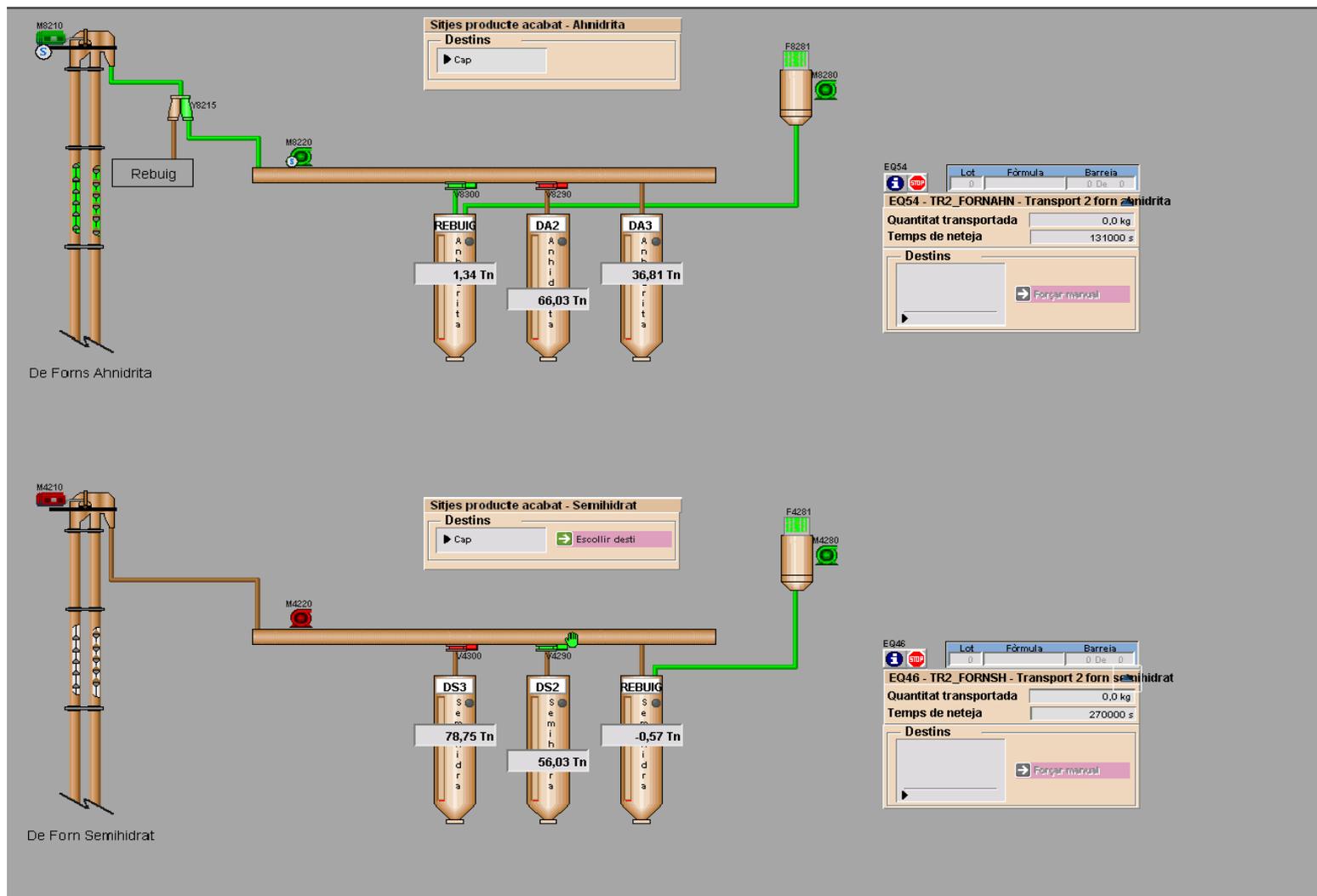


Figura 120. Proceso de transporte de un horno de anhidrita a silos de destino

A contemplar que para la línea de anhídrita existirá una única orden de trabajo común a los dos hornos con una misma fórmula y producto. Para realizar un paro o finalización de orden de trabajo se deben de finalizar todos los procesos iniciados en cualquier de los equipos que forman la línea de hornos 2 y 3 siendo condición indispensable.

Maniobra pulmón, molinos y cribas de entrada al enfriador:

A salida del horno existen dos posibilidades de destino siendo hacia el pulmón o cribas. Se contemplarán las siguientes maniobras según circunstancias del proceso:

- Si se encontrasen los dos molinos o las dos cribas paradas el producto será enviado de forma inmediata al pulmón
- En el caso que se encuentre alguno de los transportadores en estado parado por diversas razones el producto será enviado de forma inmediata al pulmón
- Si se detecta nivel de máximo en el pulmón se realizará un paro del horno tras un tiempo parametrizable de aviso al operador.

La selección de la criba por la que debe de pasar el producto también será de forma manual pero con la particularidad que el sistema permitirá trabajar con una única o con las dos al mismo tiempo. Por defecto el sistema pondrá en marcha las dos y será el operador quien decida parar alguna de ellas en el momento preciso.

La selección del molino de trabajo será a cargo del operador y el sistema sólo permitirá trabajar de forma simultánea con uno de los dos equipos.

El acceso a los parámetros de los variadores de frecuencia referidos al control del alimentador de las cribas se realizará desde el sistema Scada y de forma manual.

3.5.1 Recepciones, expediciones y carga a líneas de hornos 1, 2, 3 y torres

Estos procesos son los responsables de todas las recepciones de materias simples (granel o envasado), expediciones de productos procesados en planta y de los movimientos entre almacenes para restablecer productos a éstos. Este tipo de líneas no provocan nunca un cambio de presentación y sólo se dedican a transportar los productos mediante equipos para tal efecto como transportes de arrastre, transportes neumáticos, básculas o tolvas pesadoras...

Las líneas trabajan con una fórmula asociada al producto a recepcionar, expedir o transvasar la cual contempla posibles productos a incorporar para posible protección de éste y cantidades junto a parámetros de equipos y de la propia línea de trabajo para establecer consignas y valores máximos / mínimos.

Las órdenes de trabajo asociadas a este tipo de procesos son enviadas de forma manual a través de la selección libre de un producto y fórmula o también pueden ser recibidas desde un sistema de gestión externo en el caso de las líneas de recepción (futura fase). No se contempla la opción de generar órdenes de trabajo de forma automática para realizar transvases sobre almacenes según requerimientos de fabricación (éstas siempre deben de ser generadas a petición de los operadores de planta)

Las cargas manuales a los silos de dosificación o aquellos en los cuales no se dispone de un control mediante equipos automatizados inicialmente no serán contemplados. Se configurarán dichos silos afectados con un tipo de dosificación infinito significando que el sistema realizará los correspondientes movimientos de salida de dichos depósitos pero sin llevar un control de las entradas.

Existe una única tolva de entrada de un único producto proveniente de la cantera. Se trata de un proceso completamente en continuo realizándose un transporte simultáneo a través de la molienda primaria y sus cintas transportadoras con opción de seleccionar dos posibles destinos:

Destino 1: Grupo DL1 + 2 + 3

Destino 2: Grupo DL4 + 5 + 6

El control de la molienda primaria será completamente en manual desde el sistema Scada y a criterio del propio operador sin que exista ningún tipo de regulación automática (lazo de control) realizada por el sistema.

Se dispondrá de información de la lectura del peso de cada uno de los seis silos pero a nivel de sistema sólo se contempla la gestión como si de dos únicos depósitos se tratarán. Existirá la posibilidad de establecer unos valores de alarma máx. / min o de referencia para estos niveles y asociados a cada silo.

Se realizará una carga automática de producto para mantener un nivel máximo en las tolvas (tolvas DF1, 2, y 3) de alimentación a los hornos según demanda de los niveles de máximo de estas (prioridad de carga sobre DF1). El acceso a este control será a través del sistema Scada con la opción de habilitar la operación de carga automática y de establecer prioridades y criterios de descarga para los seis silos disponibles. En las funciones y criterios de descarga se contemplan las siguientes funcionalidades:

- Habilitar / deshabilitar descarga silos DL1, 2, 3, 4, 5 y 6 para ser seleccionado como origen del trasvase de producto a las tolvas DF1, 2 o 3
- Acceso a parametrizar un tiempo de descarga para cada uno de los silos
- Selección de activación del elemento golpeador y válvulas de soplado de forma independiente para cada uno de los silos

El sistema realizará una vigilancia de carga y enviará órdenes de descarga a los silos (mayor a menor siendo prioritario DS6) en función de su habilitación y se irán alternando dependiendo de su tiempo establecido de descarga y selecciones de funciones específicas de cada silo.

Se realizará una carga automática de producto para mantener una nivel máximo (falta confirmar que nivel hay que tener en cuenta) en los depósitos DJ5, DJ6, TDJ1 y TDJ2 de dosificación de semihidrato y anhídrita a las torres 1 y 2 según demanda sobre nivel de máxima. El acceso a este control será a través del sistema Scada con la opción de habilitar la operación de carga automática y de establecer prioridades y criterios de descarga para los silos DS1, DS2 y DS3 de la línea de semihidrato y DA1, DA2 y DA3 para la línea de anhídrita. En las funciones y criterios de descarga se contemplan las siguientes funcionalidades:

- Habilitar / deshabilitar descarga silos DS1, DS2 y DS3 para ser seleccionado como origen del trasvase de producto a los depósitos

- TDJ1 y DJ5 y misma función sobre DA1, DA2 y DA3 para ser seleccionado como origen del trasvase de producto a los depósitos TDJ2 y DJ6
- Acceso a parametrizar un tiempo de descarga (On/Off) para cada uno de los silos para generar una alternancia entre estos y de esta forma poder establecer una descarga homogénea y no causar un llenado excesivo de la cinta transportadora (repartimiento de producto).

El sistema realizará una vigilancia de carga sobre los silos TDJ1, TDJ2, DJ5 y DJ6 y se enviarán órdenes de descarga a los silos en función de su habilitación, cantidad, etc., alternándose dependiendo de su tiempo establecido de descarga y selecciones de funciones específicas de cada silo. El sistema de carga será común para las dos torres existiendo un control específico para cada una de las líneas de carga.

No se realiza ningún control sobre el proceso de expedición desde el sistema AEmes. Se tienen presente y se desarrolla la herramienta para una futura integración al sistema de gestión de empresa.

3.5.2 Equipos de Planta

3.5.2.1 Equipo Tolvas

El equipo está destinado a servir como punto de conexión temporal de producto entre equipos dentro de un proceso. Se pueden encontrar tanto en procesos de recepciones de materias, transportes, puntos de espera, almacenaje... y sólo existe la posibilidad de disponer de una mezcla completa dentro de ésta.

Los equipos disponibles serán:

TO_MZ1 - Tolva mezcladora MZ1
TO_MZ3 - Tolva mezcladora MZ3
TO1_TRSH - Tolva pulmón 1 transporte semihidrato
TO_TRAHN - Tolva pulmón transporte anhidrita
TO_INJ1_PER - Tolva de perlita a mezcladora MZ1
TO_INJ2_PER - Tolva de perlita a mezcladora MZ3
TO2_TRSH - Tolva pulmón 2 transporte semihidrato

El proceso de carga consiste en la aportación de producto que se efectuará desde los equipos superiores supervisándose en todo momento el nivel máximo (en el caso de existir) y ser notificado hacia los equipos superiores en caso de actuación para parar la aportación de producto hacia éste.

Durante el proceso de descarga se enviará el producto al equipo inferior a través del transportador o apertura de la válvula pudiendo disponer de un elemento vibrador / golpeador ajustable en su frecuencia de trabajo. A través del nivel mínimo del producto se finalizará dicha descarga con posibilidad de retardar ésta a través de tiempos parametrizables del propio equipo.

El equipo podrá combinar el sistema de funcionamiento en paso a paso o continuo, dependiendo de las necesidades del proceso en el cual esté trabajando y en función de los productos.

Se contemplan alarmas sobre los elementos controlados (roscas, raseras, vibradores....) y alarmas de proceso (no presencia de producto durante la carga, no decremento....)

3.5.2.2 Equipo Báscula

El equipo está compuesto por una tolva metálica instalada sobre células de carga con la correspondiente electrónica que transforma la fuerza ejercida por el conjunto en la lectura de peso. Es muy importante que el sistema de pesaje no oscile y esté montado, ajustado y calibrado correctamente ya que de ello depende la precisión de: colas de caída, tolerancias, refines y consecuentemente control de estocs. El sistema permite el ajuste por software de estos parámetros siempre y cuando no excedan de unos márgenes de seguridad.

Equipos disponibles:

- BA1 - Báscula mayoritarios torre 1
- BA2 - Báscula medios torre 1
- BA3 - Báscula minoritarios torre 1
- BA4 - Báscula mayoritarios torre 2
- BA5 - Báscula medios torre 2
- BA6 - Báscula minoritarios 01 torre 2
- BA7 - Báscula minoritarios 02 torre 2

El sistema puede trabajar en monosilo cuando únicamente dosifica desde un único silo o multisilo hasta un máximo de tres depósitos simultáneos (del mismo producto) siempre y cuando sea posible mecánica y eléctricamente.

Mecánicamente la estabilidad del conjunto debe cumplir un mínimo exigido por el sistema de control a partir del cual no puede filtrar las interferencias que se acoplan a la lectura. A más estabilidad más velocidad de dosificación.

Se contempla un control con autoaprendizaje de los cálculos de colas de caída ajustando el valor en función de las últimas dosificaciones. Los nuevos valores calculados se deben de encontrar entre unos márgenes de seguridad parametrizables y cabe indicar que el sistema no permite dosificar una cantidad inferior a la cola actual. En consecuencia, dependiendo del sistema y limitaciones mecánicas se podrá dosificar con más o menos precisión.

La descarga se inicia con la apertura de la rasera siempre que el equipo inferior dé permiso para tal acción y se considerará descarga finalizada una vez el peso del equipo cumpla, que está por debajo del peso máximo admisible para considerar el vaciado completado.

Durante el proceso de dosificación pueden aparecer diversas anomalías como falta de producto, fallo de colas de caída, equipo no estable... todas ellas parametrizables desde el propio equipo. En el equipo se contemplan alarmas sobre los elementos controlados por este (aspiración, raseras, vibradores....), alarmas relacionadas con el peso (incremento, decremento, estabilidad....) y alarmas de proceso (tolerancias, colas de trabajo, selección de silos...)

La capacidad, estabilidad y precisión de la báscula vendrá dado por el tipo, características mecánicas y células utilizadas en ésta.

En este apartado no se hace referencia a los elementos dosificadores (variadores de frecuencia, roscas, extractores, raseras....) ya que éstos pertenecen al equipo depósito y ya se encuentran descritos en dichos equipos.

Para detalle de la secuencia de descarga de las básculas ver apartado referente a las mezcladoras

3.5.2.3 Equipo Mezcladora

El equipo mezcladora tiene como finalidad recibir producto ya pesado o tratado por los equipos superiores y mezclarlo durante un tiempo para garantizar la homogeneidad de todos los productos.

Equipos disponibles:

- MZ1 - Mezcladora mayoritarios torre 1
- MZ2 - Mezcladora minoritarios torre 1
- MZ3 - Mezcladora mayoritarios torre 2
- MZ4 - Mezcladora minoritarios torre 2

El motor principal se pondrá en marcha antes de realizar cualquier tipo de aportación de producto y tan sólo se parará en caso de inactividad o por la actuación de seguridades.

La aportación de producto se efectuará desde los equipos superiores y la secuencia de aportación de éstos será definida según especificaciones de cada proceso (mayoritarios, minoritarios, líquidos...). Una vez finalizado el proceso de carga se iniciará (opción de avanzar según especificaciones) el tiempo total de mezcla y en el caso de finalización de éste y se tenga equipos pendientes de finalizar se contará un tiempo añadido. También se contempla un tiempo mínimo de mezcla para las situaciones anteriormente mencionadas para garantizar dicho tiempo con toda la aportación.

El proceso de descarga consistirá en abrir la rasera de la mezcladora y se dará por finalizado el proceso cuando se cumpla el tiempo total de descarga y la potencia de la mezcladora sea inferior a la selección potencia establecida (en el caso de existir) más la confirmación de presencia producto (nivel digital) en tolva receptora.

El motor principal puede disponer de elementos de protección y de una lectura continua de potencia la cual comunicara sobre cualquier desviación respecto a los límites establecidos.

En el equipo se contemplan alarmas sobre los elementos controlados (potencias, raseras, motores....) y las alarmas de proceso (tiempos de fin descarga, no nivel equipo posterior...)

MZ1 y MZ2 – Secuencia de carga y mezclado torre 1

La báscula de mayoritarios BA1 es la primera en descargar hacia la mezcladora MZ1 siempre y cuando hayan finalizado la totalidad de las dosificaciones en el resto de básculas BA2 y BA3 (condición necesaria para evitar posibles succiones entre equipos en las descargas). Cuando alcance la cantidad de vaciado de un 80% del total de la báscula se procederá a dar la orden de descarga sobre la mezcladora MZ1. Una vez finalizada la descarga, iniciado el tiempo de mezcla y pasado un tiempo

parametrizable (aviso en el caso de exceder este tiempo) se dará la orden de incorporar la perlita a través del equipo INJ_PER01.

A tener presente que el tiempo total de mezclado empezará a contarse cuando se hayan incorporado la totalidad de los productos a excepción de la perlita.

MZ3 y MZ4 – Secuencia de carga y mezclado torre 2

La báscula de mayoritarios BA4 es la primera en descargar hacia la mezcladora MZ3 siempre y cuando hayan finalizado la totalidad de las dosificaciones en el resto de básculas BA5, BA6 y BA7 (condición necesaria para evitar posibles succiones entre equipos en las descargas). Cuando alcance la cantidad de vaciado de un 80% del total de la báscula se procederá a dar la orden de descarga sobre la mezcladora MZ4. Una vez finalizada la descarga, iniciado el tiempo de mezcla y pasado un tiempo parametrizable (aviso en el caso de exceder este tiempo) se dará la orden de incorporar la perlita a través del equipo INJ_PER02.

A tener presente que el tiempo total de mezclado empezará a contarse cuando se hayan incorporado la totalidad de los productos a excepción de la perlita.

3.5.2.4 Equipo Transporte

El equipo tiene como finalidad el transportar una materia / producto desde un equipo emisor hasta uno de receptor. Este transporte será efectuado por un conjunto de elementos, los cuales trabajarán enclavados entre ellos. Durante el proceso de transporte se pudieran dar situaciones de alarmas de proceso (niveles de máxima, mínima, fallas en elementos...) y en consecuencia el paro de éste y posterior cambio a origen / destino alternativos si los hubiese.

Equipos disponibles:

TR1_FORNSH – Transporte horno semihidrato 01
TR_TOMZ3 - Transporte bajo tolva mezcladora MZ3
TR_TOMZ1 – Transporte bajo tolva mezcladora MZ1
TR_PNE01 - Transporte neumático 1 torre 1
TR_PNE02 - Transporte neumático 2 torre 1
TR1_FORNANH - Transporte horno anhidrita
TR2_FORNSH - Transporte 2 horno semihidrato
TR_FORNAHN03 – Transporte horno anhidrita 03

Para empezar a trabajar el equipo transporte tiene que tener disponibles, no ocupados por otro equipo, todos los elementos que conforman la ruta escogida entre su equipo emisor y receptor según órdenes de trabajo asignadas. Este equipo siempre trabaja en continuo y la aportación de producto se efectuará cuando todos los elementos estén posicionados y los equipos inferiores den el correspondiente permiso para recibir la carga de dicho producto.

Los elementos controlados por el transporte recibirán las órdenes y se irán posicionando desde el destino hacia su origen. En caso que un elemento entre en anomalía todos los elementos aguas arriba (hacia el origen) pasarán a parado y en el supuesto que el equipo receptor fuera quien tuviera la anomalía se indicará al emisor y éste detendría la aportación de producto.

En el equipo se contemplan alarmas sobre los elementos asociados (raseras, motores...) y alarmas de proceso (elementos ocupados, pérdida de secuencia, detección de niveles máximos, cambios de destinos...)

3.5.2.5 Equipo Inyector

El equipo hace referencia a un sistema de carga en continuo de producto.

Equipos disponibles:

INJ1_PER - Inyector de perlita torre 1

INJ2_PER - Inyector de perlita torre 2

Este equipo trabaja en línea (inyección directa) con dependencia o condicionado a otros equipos y no tiene la capacidad de almacenar ninguna cantidad de producto sobre él mismo. Normalmente estos equipos disponen de un único depósito con el cual trabaja pero cabe la posibilidad de poder conectar hasta un máximo de tres, pero nunca existirá la opción de trabajo multisilo sólo se permite la extracción de uno de ellos durante la inyección.

Se contempla un control con autoaprendizaje de los cálculos de colas de caída ajustando el valor en función de las últimas inyecciones realizadas. Los nuevos valores calculados se deben encontrar entre unos márgenes de seguridad parametrizables y cabe indicar que el sistema no permite inyectar una cantidad inferior a la cola actual.

Durante el proceso de inyección pueden aparecer diversas anomalías, como falta de producto, fallo en la cola de trabajo, lectura del caudalímetro no estable... todas parametrizables. A parte en el equipo se contemplan alarmas sobre los elementos controlados (caudal, raseras, motores....), alarmas relacionadas con la inyección (incremento, decremento, estabilidad....) y alarmas de proceso (tiempos de fin descarga, no nivel equipo posterior...)

Proceso de dosificación y carga depósitos de perlita:

En cada ciclo de dosificación se mantendrá la aportación de este producto hacia la mezcladora hasta la no detección de producto por nivel de mínimo del depósito de almacenaje. Una vez realizada la descarga a mezcladora se procederá a la carga del depósito para la siguiente mezcla desde el almacén general de perlita de la planta. El proceso consistirá en mantener el dispositivo de impulsión en funcionamiento hasta la detección del nivel máximo del depósito destino (torre 1 o 2).

Al realizarse una carga y descarga por niveles, regulados mecánicamente por los operadores, el sistema no podrá registrar la cantidad real de dosificación. Para realizar un registro y mantener el sistema coherente se hará un movimiento de consumo en base a la cantidad teórica prevista desde la fórmula que se esté trabajando en el momento del registro.

La secuencia de trabajo descrita se aplicará en ambas torres al mantenerse una arquitectura idéntica de trabajo.)

3.5.2.6 Equipo de Horno

Equipos disponibles:

FORN_SH – Horno Semihidrato

FORN_AHN02 - Horno Anhidrita 02

FORN_AHN03 - Horno Anhidrita 03

3.5.2.7 Equipo de Depósito

El equipo tiene como finalidad almacenar producto para poder ser utilizado en los procesos que estén conectados a éstos (dosificación, transvases...).

Equipos disponibles:

DJ1 a DJ12 – Silos de almacenaje y dosificación mayoritarios torre 1
DG7 a DG11 – Silos expediciones granel torre 1
TDJ1 a TDJ4 – Silos de dosificación báscula de mayoritarios torre 1
DT10 y 11 – Silos de dosificación báscula medios torre 1
DN4 a DN25 – Silos de dosificación báscula de minoritarios torre 1
TDN1 a TDN5 – Silos de dosificación báscula minoritarios torre 2
TDN6 a TDN10 – Silos de dosificación báscula minoritarios torre 2
DC1 a DC3 – Grupo silos crudo DC1, DC2 y DC3 recepción y hornos
DC4 a DC6 – Grupo silos crudo DC4, DC5 y DC6 recepción y hornos
DF1 a DF3 – Silos alimentación líneas hornos semihidrato y anhídrita
DE1 a DE3 – Pulmones de almacenamiento líneas hornos
DS1 a DS3 – Silos almacenaje de semihidrato
DA1 a DA3 – Silos almacenaje de anhídrita
Ensac1 a Ensac2 – Silos de almacenaje de producto a línea de ensacado

El depósito siempre trabajará subordinado a otro equipo que le aportará o extraerá producto de éste en función del proceso a ejecutar.

El proceso de carga será ordenado por el equipo emisor de producto con la seguridad de coincidencia entre el producto a entrar y el actual almacenado. Al igual que el resto de equipos los depósitos comunican de posibles alarmas de niveles máximos de capacidad u otros para realizar acciones en los equipos de llenado y parar aportaciones o cambiar de destino...

Los elementos de descarga son controlados por el propio depósito pudiendo configurar frecuencias de trabajo para las fases de grueso y refine en el caso de raseras oscilantes, velocidades específicas para motores (caso de disponer de un variador de frecuencia), tolerancias de trabajo, frecuencias de vibradores o golpeadores... personalizable para cada depósito.

En el equipo se contemplan alarmas sobre los elementos controlados por este (raseras, motores, niveles digitales....) y alarmas de proceso (elementos ocupados, pérdida de secuencia...)

3.5.2.8 Equipo de Adición Manual

El equipo hace referencia a un sistema de incorporación de producto con o sin control de peso y que será efectuada de una forma completamente en manual. La preparación de este producto podrá hacerse de forma independiente del equipo destino y la incorporación de éste podrá hacerse con dependencia del equipo destino de forma que será éste quién dé el permiso de iniciar la incorporación.

Equipos disponibles:

AM_MZ2 - Aditivos manuales a mezcladora 2 torre 1
AM_MZ4 - Aditivos manuales a mezcladora 4 torre 2

La preparación de estos productos se podrá realizar con información del producto a preparar desde el propio sistema SCADA.

En el caso de no disponer de un sistema de descarga con elementos y el producto tenga que ser tirado directamente al equipo destino (mezcladora) la preparación se efectuará durante el estado de descarga. Se seguirán las directrices desde la pantalla del sistema SCADA y se finalizará con una validación (pulsador a campo) del operador sin dar por terminada la aportación hasta realizada esta acción. Se configurarán los equipos de aditivos manuales para que realicen una autovalidación de todos los productos a añadir a mezcladora pasando directamente a la espera de confirmación del operador desde la botonera a campo.

En el equipo se contemplan alarmas de proceso (tolerancias, finalizaciones, saltos de productos, tiempos de descarga, no presencia de nivel, etc.)

3.5.2.9 Almacenes Multiproducto de Recepciones, Aditivos manuales y Expediciones

Se tendrán dos tipos de almacenes, aquellos que pueden contener un único producto (monoproducto) y los que pueden almacenar varios productos simultáneamente pero sin ser mezclados entre ellos (multiproducto). Los monoproductos van relacionados con los equipos depósitos y en cambio los multiproducto no.

Para cada almacén se permiten acciones de regularizar, añadir y/o sacar existencias, vaciar y quitar producto, añadir producto, movimientos entre almacenes... Estas acciones están disponibles tanto en almacenes monoproducto como multiproducto con la particularidad que en estos últimos se accede desde el propio almacén seleccionando un producto y utilizando las funciones disponibles.

Almacenes disponibles:

Almacén multiproducto Recepciones - Origen
Almacén multiproducto Aditivos manuales - Origen
Almacén multiproducto Expediciones - Destino

Este tipo de almacenes no disponen de ningún control sobre elementos y sólo es gestionable desde el programa AEmes sin opción de visualizarse desde el sistema SCADA.

Almacén multiproducto Aditivos manuales - Origen

Actúa como origen de los aditivos manuales, este contendrá todos los productos que se deban dosificar por los equipos de dosificación manual AM_MZ2 y AM_MZ4...

Almacén multiproducto Expediciones - Destino

Se utilizará para cualquier producto que sea enviado como destino a camión (granel) de la torre 1.

3.5.3 Proceso de calcinación de anhídrita en continuo

La línea de proceso de calcinación de anhídrita en continuo consta de las siguientes fases:

- Entrada de mineral y transporte a hornos
- Calcinación de anhidrita en horno rotatorio continuo

3.5.3.1 Entrada de mineral y transporte a hornos

Existe una recepción de mineral de la cantera que es descargado en la tolva receptora. Este material pasa por una criba y un molino para finalmente ser transportado hacia los silos de mineral DC1, 2, 3, 4, 5 y 6 (Figura 121)

Una vez almacenado en los silos DC1, 2, 3, 4, 5 y 6 de mineral crudo, el material es descargado secuencialmente en tiempos de unos 10 segundos (parametrizables) y transportado a los silos pulmón DF2 y DF3. Sólo se podrá descargar de un silo de mineral a la vez, pudiendo habilitar y deshabilitar la descarga para extraer el material de los silos que más interesen.

Se puede configurar el proceso de fluidificación y el golpeo del silo durante el proceso de descarga.

3.5.3.2 Calcinación de anhidrita en horno rotatorio continuo

Consta de las siguientes fases de trabajo:

1. FASE INICIAL
2. FASE 1: Calentamiento de Mangas
3. FASE 2: Estabilización de Mineral
4. FASE 3: Trabajo
5. FASE PARADA CONTROLADA
6. FASE PARADA ALIMENTACIÓN
7. FASE PARADA HORNO

En la fase inicial se deberán configurar ciertos parámetros de trabajo (Tabla 65):

- Paso por pulmón.
- Destino final.
- Cribas y molinos que se van a usar en el proceso de molturación.

Nº Elemento	Clase	Denominación	Descripción del elemento
125	101	M6210	Vibrador silo DF2
102	101	M6100	Cinta alimentación horno AHN5
101	101	CR6110	Quemador horno AHN5
100	101	M6120	Horno AHN5
124	101	M6180	Rosca salida horno AHN5
104	101	M6170	Ventilador filtro horno AHN5
200	101	F6171	Filtro horno AHN5
103	101	M6150	Rosca filtro horno AHN5
105	101	M6140	Alveolar filtro horno AHN5
250	300	B6101_INST	Caudal instantáneo bascula entrada horno AHN5
226	300	CR6110_AIT1	Temperatura 1 quemador horno AHN5 (entrada)
227	300	CR6110_AIT2	Temperatura 2 quemador horno AHN5 (salida)
	300	CV6110_CI	Totalizador de consumo de gas horno AHN5
238	300	AP3060_INST	Analizador partículas instantáneo horno AHN5
244	300	AP3060_AVG	Analizador partículas media horno AHN5
126	101	M7110	Vibrador silo DF2
111	101	M7000	Cinta alimentación horno AHN6

Nº Elemento	Clase	Denominación	Descripción del elemento
110	101	CR7010	Quemador horno AHN6
109	101	M7020	Horno AHN6
112	101	M7080	Rosca salida horno AHN6
106	101	M7070	Ventilador filtro horno AHN6
201	101	F7071	Filtro horno AHN6
107	101	M7050	Rosca filtro horno AHN6
108	101	M7040	Alveolar filtro horno AHN6
251	300	B7001_INST	Caudal instantáneo bascula entrada horno AHN6
228	300	CR7010_AIT1	Temperatura 1 quemador horno AHN6 (entrada)
229	300	CR7010_AIT2	Temperatura 2 quemador horno AHN6 (salida)
	300	CV7010_CI	Totalizador de consumo de gas horno AHN6
239	300	AP3070_INST	Analizador partículas instantáneo horno AHN6
245	300	AP3070_AVG	Analizador partículas media horno AHN6
127	101	M7500	Transportador carga pulmón
130	101	M8020	Transportador carga pulmón/salida molienda
88	101	M8030	Elevador carga pulmón
152	202	BY8035	Bypass carga pulmón
99	101	M8000	Alveolar salida pulmón
89	101	M8040	Rosca carga zarandas
90	101	M8050	Zaranda
91	101	M8060	Zaranda
96	101	M8150	Rosca salida zarandas
92	101	M8070	Rosca entrada molinos
97	202	V8080	Válvula molino M8100
98	202	V8090	Válvula molino M8120
93	101	M8100	Molino
94	101	M8120	Molino
163	301	M8100_All	Intensidad molino
164	301	M8120_All	Intensidad molino
131	101	M8155	Rosca entrada enfriador
95	101	M8160	Enfriador
137	101	M8250	Ventilador filtro enfriador
198	101	F8251	Filtro enfriador
136	101	M8230	Esclusa enfriador
132	101	M8170	Rosca salida enfriador
135	101	M8200	Esclusa transporte molienda
82	101	M8210	Elevador transporte molienda
154	202	Y8215	Bypass a camión
83	101	M8220	Canal fluidificada transporte molienda
4	101	M8280	Ventilador filtro silo rechazo
199	101	F8281	Filtro silo rechazo
87	202	V8290	Válvula entrada silo rechazo
86	202	V8300	Válvula entrada silo DA2
174	301	DA1_AIW	Células de carga silo rechazo
175	301	DA2_AIW	Células de carga silo DA2
176	301	DA3_AIW	Células de carga silo DA3

Tabla 65. Elementos de control en la calcinación de la anhidrita

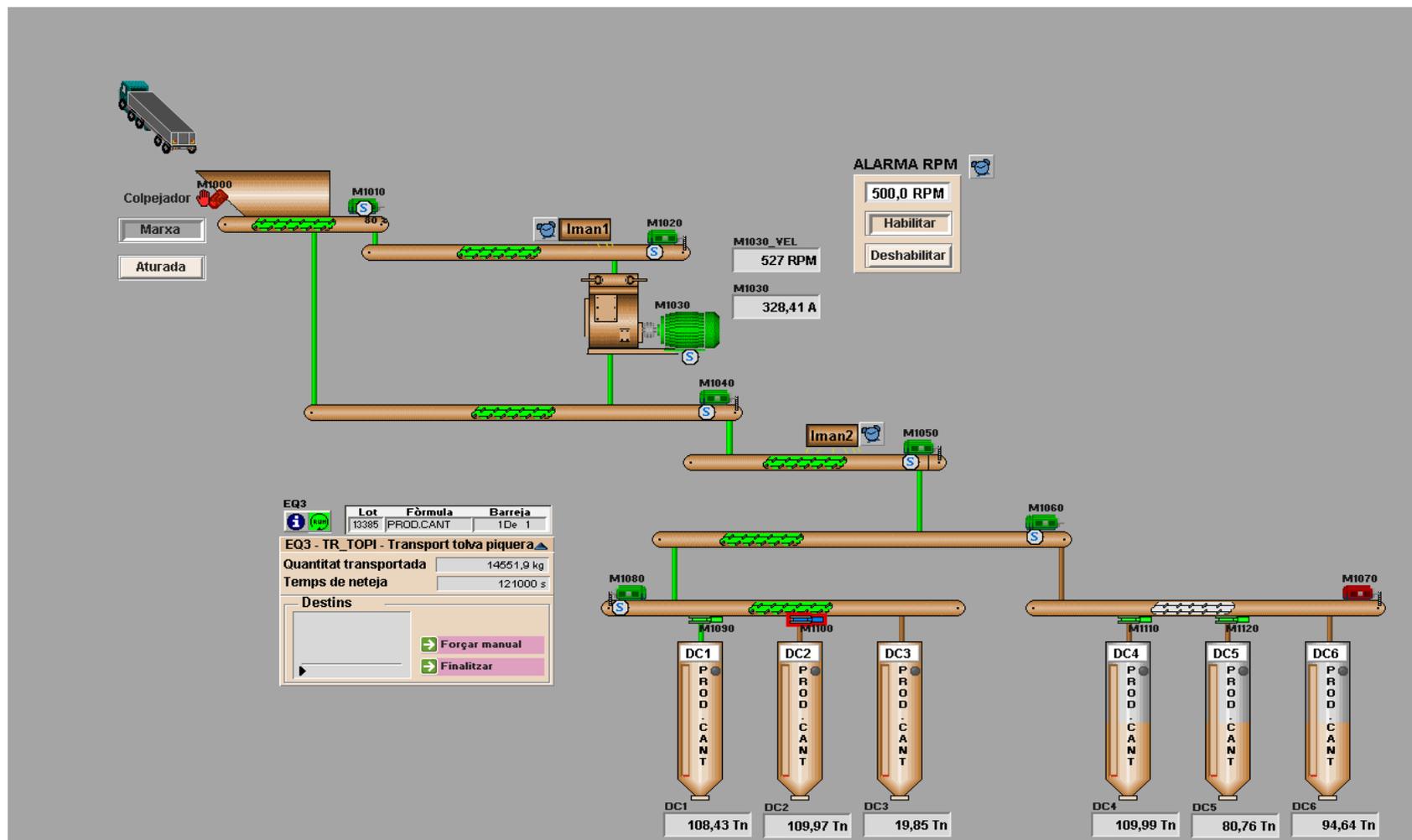


Figura 121. Proceso de molienda primaria y almacenaje en silos de yeso crudo

En la FASE 1 de calentamiento de mangas, se arranca el filtro de mangas y el quemador. Se mantiene en este estado hasta que se pasa a la FASE 2 de estabilización de mineral, donde se alimenta el horno con el material del silo DF2 y DF3 y se envía al silo de rechazo. Cuando el operario verifique que el producto cumple con los requisitos de calidad, se pasará a la FASE 3 de trabajo donde se cambiarán el destino de rechazo y se pasará el producto a los silos DA2 y DA3, pasando por el tromel refrigerador, por las cribas y por los molinos de molienda.

3.5.4 Maniobras y secuencias de control de cada fase

3.5.4.1 Entrada Mineral

Llegará un camión para descargar el material a la tolva, el operador validará los datos del viaje, escogerá entre el grupo de silos DC1, 2, 3 y DC4, 5, 6 y arrancarán todos los elementos de la secuencia de transporte desde el silo destino escogido hasta la tolva piquera.

El alimentador M1010 dispone de un variador de frecuencia, la consigna del variador se selecciona de forma manual en Scada, el operador dispone de indicadores de consumo o velocidad de la machacadora para tomar la decisión correcta respecto a la velocidad del alimentador (Tabla 66).

El molino dispone de una botonera con un selector para arrancar de forma manual. El molino también dispone de una seguridad de tensión que para el motor. La parada de este molino se puede configurar a través de un tiempo de retardo.

Los silos de minerales disponen de nivel digital y nivel analógico. Si marca el nivel de máxima de un silo que está enviando sonará el claxon para avisar al operador. Los silos se llenan secuencialmente dado que las raseras siempre están abiertas. En el caso de marcar el nivel de máxima del último silo de cada grupo (DC3 y DC6) se parará la aportación de material.

	Clase	Denominación	Descripción del elemento
56	202	M1090	Válvula entrada silo DC1
57	202	M1100	Válvula entrada silo DC2
58	202	M1110	Válvula entrada silo DC4
59	202	M1120	Válvula entrada silo DC6
55	101	M1080	Redler
54	101	M1070	Redler
53	101	M1060	Redler
52	101	M1050	Redler
		IMAN1	
		IMAN2	
51	101	M1040	Redler
50	101	M1030	Molino
49	101	M1020	Redler
48	101	M1010	Redler
218	101	M1000	Golpeador piquera
160	301	M1030_AII	Consumo intensidad machacadora
252	301	M1030_VEL	Velocidad machacadora

Tabla 66. Elementos de control en la entrada de mineral

Otros motivos que provocan una parada de alimentación son:

- Intensidad alta del molino o parada de este.
- Detección por parte del imán.
- Nivel de máxima en los silos de crudo.
- Detector de revoluciones bajo.

3.5.4.2 Alimentación hornos

Para descargar el mineral de los silos se pondrá en marcha los elementos de transporte des de los silos DC1...DC6 hasta los silos DF1, DF2, DF3.

El material es descargado secuencialmente de los silos DC1...DC6 en tiempos de unos 10 segundos (parametrizables) y transportado a los silos pulmón DF2 y DF3. Sólo se puede descargar de un silo de mineral a la vez, pudiendo habilitar y deshabilitar la descarga para extraer el material de los silos que más interesen.

Se podrá configurar el proceso de fluidificación y el golpeo del silo durante el proceso de descarga.

3.5.4.3 Calcinación Horno Anhidrita

En éste apartado se detallarán las secuencias del horno de calcinación de anhidrita (Tabla 67 y Tabla 68).

	Clase	Denominación	Descripción del elemento
60	101	M2000	Cinta descarga DC1
61	101	M2010	Cinta descarga DC2
62	101	M2020	Cinta descarga DC3
63	101	M2030	Cinta descarga DC4
64	101	M2040	Cinta descarga DC5
65	101	M2050	Cinta descarga DC6
66	101	M2060	Cinta descarga grupo DC1DC3
67	101	M2070	Cinta descarga grupo DC4DC6
68	101	M2080	Cinta transporte
69	101	M2090	Cinta transporte
70	101	M2100	Rosca carga silos hornos
71	101	M2110	Rasera entrada DF1
72	101	M2120	Rasera entrada DF2
73	101	M2125	Rasera entrada DF3
210	201	E2000	Válvula fluidificación DC1
211	201	E2010	Válvula fluidificación DC2
212	201	E2020	Válvula fluidificación DC3
213	201	E2030	Válvula fluidificación DC4
214	201	E2040	Válvula fluidificación DC5
215	201	E2050	Válvula fluidificación DC6
74	101	M2190	Golpeador DC1
75	101	M2200	Golpeador DC2
76	101	M2210	Golpeador DC3
77	101	M2220	Golpeador DC4
78	101	M2230	Golpeador DC5
79	101	M2240	Golpeador DC6

Tabla 67. Elementos del control de la alimentación de hornos

Alimentación de mineral AHN5	
Cinta alimentación silo DF2	M6100
Vibrador silo DF2	M6210

Alimentación de mineral AHN6	
Cinta alimentación silo DF2	M7000
Vibrador silo DF2	M7110

Quemador AHN5	
Filtro mangas	F6171
Ventilador captación de polvo	M6170
Quemador	CR6110

Quemador AHN6	
Filtro mangas	F7071
Ventilador captación de polvo	M7070
Quemador	CR7010

Transporte evacuación básica AHN5	
Rosca	M6180

Transporte evacuación básica AHN6	
Rosca	M7080

Transporte evacuación básica	
Bifurcación	Y8035
Elevador	M8030
Rosca	M8020
Rosca	M7500

Molienda y enfriado	
Rosca carga zarandas	M8040
Zaranda	M8050
Zaranda	M8060
Rosca salida zarandas	M8150
Rosca entrada molinos	M8070
Válvula molino M8100	V8080
Válvula molino M8120	V8090
Molino	M8100
Molino	M8120
Rosca entrada enfriador	M8155
Enfriador	M8160
Ventilador filtro enfriador	M8250
Filtro enfriador	F8251
Esclusa enfriador	M8230
Rosca salida enfriador	M8170
Esclusa transporte molienda	M8200
Elevador transporte molienda	M8210
Bypass a camión	Y8215
Canal fluidificada transporte molienda	M8220
Ventilador filtro silo rechazo	M8280
Filtro silo rechazo	F8281
Válvula entrada silo rechazo	V8290
Válvula entrada silo DA2	V8300

Recuperación de finos AHN5	
Rosca descarga filtro captación de polvo	M6150
Esclusa descarga filtro captación de polvo	M6140

Recuperación de finos AHN6	
Rosca descarga filtro captación de polvo	M7050
Esclusa descarga filtro captación de polvo	M7040

Tabla 68. Grupos de proceso en la calcinación de anhídrita

Como ya se ha enunciado, el proceso de calcinación para el horno de anhídrita consta de una serie de fases de trabajo:

1. FASE INICIAL
2. FASE 1: Calentamiento de Mangas
3. FASE 2: Estabilización de Mineral
4. FASE 3: Trabajo
5. FASE PARADA CONTROLADA
6. FASE PARADA ALIMENTACIÓN
7. FASE PARADA HORNO

En la fase inicial se tendrán todos los elementos parados y sin anomalía, es decir, es la fase de permiso de arranque (Tabla 69).

Fase inicial	
1	Estado inicial elementos parados
2	Botones Fase 1,2, trabajo habilitados
Acción paso a Fase 1	

Fase 1 – Calentamiento de mangas	
1	Arrancada Ventilador filtro
2	Arrancada filtro
3	Permiso arrancada quemador
Acción paso a Fase 2	

Fase 2 – Estabilización material	
1	Arrancada elementos molienda.
1	Arrancada de los elementos de carga a pulmón: Elevador M8030, M8020, M7500.
2	Arrancada elemento molino según configuración
3	Se espera un tiempo espera molinos a régimen
4	Se arrancan elementos salida hacia silos destino: M8220, M8210, M8200, M8170, M8160, M8155, M8150 y la rosca de alimentación de los molinos, destino final será rechazo.
5	Se arrancan las cribas según configuración.
6	Se arranca M8040 alimentación cribas.
7	Girar bypass Y8035
En caso de fallo en el circuito se giraría el bypass a pulmón	

Fase 2 – Estabilización material	
2	Se arranca elemento descarga horno M6180
3	Se arranca motor principal horno M6120 y cinta alimentadora M6100.
4	Se arranca elementos descarga finos M6150, M6140.
5	Se habilita el paso a fase de trabajo
6	Control de aviso de 1 hora de aportación de producto
	Se habilitan avisos de fallo de aportación de material en base a una estrella colocada en la cinta alimentadora, el tiempo es configurable.
7	Acción paso a Fase 3 de trabajo

Fase 3 – Fase trabajo	
1	Se habilitan los controles para el cambio de destino
	Todo el circuito ya está en marcha de la fase 2, sólo se controlará los niveles máximos de los destinos y el estado de los distintos elementos que se han arrancado.

Parada controlada	
1	Cambio de destino a rechazo
2	Se habilitan las opciones de parada alimentación y para del horno
	El operador pulsa parada alimentación
1	Se para el quemador
2	Se para la cinta alimentadora
	El operador pulsa parada horno
1	Se para los elementos del filtro
2	Se paran los elementos de descarga del horno
3	Se paran los elementos del horno
4	Se paran los elementos de la molienda, se tendrá en cuenta si el otro horno esta parado o en marcha.
5	Se habilita la fase inicial para empezar el proceso de nuevo.

Parada de emergencia	
1	Se paran todos los elementos al momento
2	Se deshabilita la carga del silo para que no se cargue de material.
3	Se inicializa la secuencia para poder entrar en fase inicial una vez finalizada la emergencia

Tabla 69. Bloques de programación y señales para proceso de calcinación

Se pueden configurar los tiempos de retardo a la arrancada y parada de todos los elementos (Tabla 70).

Subgrupo	Fase inicial	Fase 1 – Calentamiento de mangas	Fase 2 – Estabilización del material	Fase 3 - Trabajo	Fase parada controlada	Fase parada alimentación	Fase parada horno
Alimentación de mineral	Preparado	Preparado	Arrancado	Arrancado	Arrancado	Parado	Parado
Quemador	Preparado	Arrancado	Arrancado	Arrancado	Arrancado	Parado	Parado
Transporte de evacuación básica	Preparado	Preparado	Arrancado	Arrancado	Arrancado	Parado	Parado
Molienda y enfriado	Preparado	Preparado	Arrancado	Arrancado	Arrancado	Opcional	Parado
Recuperación de los finos del filtro	Preparado	Preparado	Arrancado	Arrancado	Arrancado	Parado	Parado

Tabla 70. Grupos en funcionamiento en la calcinación de anhídrita

3.5.4.4 Anomalías

Si se tiene alguna anomalía de alguno de estos elementos que forman los grupos de transporte evacuación básica, quemador se para el quemador y en consecuencia el horno y la alimentación si estos estuviesen en marcha.

En caso de parada de algún elemento del transporte a silos destino se girará el bypass Y8035 a pulmón, si este se llena se produciría una parada de todo el conjunto.

Una vez se tienen todos los elementos en marcha, se habilitará la opción de pasar a la fase 2 (estabilización de mineral), donde se podrá en marcha la alimentación del horno, el horno y el transporte hacia silos de destino.

Se pueden configurar los tiempos de retardo a la arrancada y parada de todos los elementos.

Si se tuviese anomalía del motor del horno si que se pararía el quemador.

Se controlaran también los desplazamientos laterales del horno y se dará una señal de alarma mediante un control por histéresis, pero no se parará nada.

Si se tuviera una avería en la cinta alimentadora, se avisaría a un tiempo configurable, al cabo de 3 minutos se provocaría la parada del quemador.

Se dispone de detectores de giro en los motores del horno para detectar que éste no gira (están punteados por avería mecánica)

Se dispone de sensores de partículas con indicadores instantáneos y de media para cada uno de los hornos a la salida del filtro de humos.

La secuencia del horno se mantendrá en esta fase hasta que el operario compruebe que el material cumple con los requisitos de calidad y decida cambiar a la fase 3 (Trabajo).

Cuando el operario la active, tendrá que escoger manualmente un silo de destino.

El transporte de salida de molienda arrancará en automático cuando se inicia la fase de estabilización, el operador dispondrá de opciones de paro y marcha independientes de la secuencia del molino para el transporte de molienda.

La descarga del pulmón se habilitará a criterio del operador con unos tiempos de paro marcha del elemento de descarga.

Se pueden configurar los tiempos de retardo a la arrancada y parada de todos los elementos. Esto servirá para alargar los tiempos de parada de filtros y válvulas.

Los motores de los molinos de afino M8100 y M8120, poseerá un detector de intensidad en bucle 4...20 mA para que el Scada dé la señal de alarma si se sobrepasa los límites normales de funcionamiento.

Por cualquier problema en la ruta, se girará el bypass Y8035 al pulmón. La ruta quedara parada desde el elemento en anomalía hacia atrás.

Por cualquier problema en proceso de molturación, se girará el bypass Y8035 al pulmón. La ruta quedara parada desde el elemento en anomalía hacia atrás.

Si continúa el problema en el transporte hacia silos y se llena el silo de pulmón entonces se parará el horno.

3.5.4.5 Visualizaciones

Se visualizan todas las señales analógicas de temperaturas, niveles, velocidades, consumos, etc... También las alarmas relacionadas con estas mediciones.

Para parar el proceso del horno, el operario pulsará el botón de (fase: parada controlada).

En esta fase del proceso, lo primero que se hará es parar el quemador CR6110. Todo seguirá en marcha hasta que el operario manualmente pulse el botón de (fase: parada alimentación). En esta fase se parará la cinta de alimentación del horno.

Una vez que ya no llegue más material al horno, el operario podrá pulsar el botón de (fase: parada horno).

En esta fase se pararán los elementos del horno y del transporte hacia el silo destino, finalmente se parará la aspiración.

Todos los elementos tienen un tiempo parametrizable para retrasar la parada. De esta manera se puede asegurar un tiempo de limpieza del circuito.

3.6 SISTEMA DE REGULACIÓN

En este apartado se definirá y calculará el controlador tipo PID que se usará para realizar los lazos de control del proceso de calcinación de anhídrido en un horno rotativo. Existen algunos estudios de aplicación de un PID simple en hornos mediante el control de únicamente dos entradas y dos señales de salida (Lozano et al., 2000). En el capítulo 2.3 se ha estudiado el estado del arte de los controladores de este tipo y en el apartado 3.6 anterior la descripción y funcionamiento de la automatización de los equipos de calcinación. Por otra parte, en el apartado 3.4 se han evaluado las variables implicadas en la calcinación y se han decidido las más importantes en el gobierno del proceso. El objetivo de la implantación de este tipo de controlador es el de asegurar y mejorar el funcionamiento automático del horno, siempre en las condiciones óptimas de autorregulación.

3.6.1 Variables a regular

Como se ha visto en el apartado 3.4 las variables que gobiernan el proceso y sus señales de control, son las reflejadas en la Tabla 71.

Proceso	Parámetros de control	Señal
Monitorización	Caudal Material Q_m	M6170_AOS
	Caudal Gas Natural Q_g	CV6110_CI
	Temperatura Material T_m	CR6110_AIT2
	Temperatura Refractario T_r	CR6110_AIT1
	Temperatura Emisiones T_e	F6171_AIT1
	Emisiones Q_e	-
Actuación	Frecuencia Variador Material C_m	M6100_AOS
	Apertura Válvula Gas C_g	VP6110_AIZ
	Frecuencia Variador Ventilador C_e	M6170_AOS

Tabla 71. Variables de control para el proceso de calcinación

La finalidad del sistema de regulación continua del proceso es conseguir la máxima regularidad en el proceso de combustión, manteniendo la homogeneidad del producto acabado, significando, además una mayor eficiencia energética del proceso

3.6.2 Aplicación de controlador PID

Se realizará la programación en los bloques de control correspondientes del nivel PLC (Schneider Quantum) para que actúen como PID y sus correspondientes conexiones al nivel de supervisión Scada (Citect Scada) del sistema de automatización general. Como ya se ha detallado, todo el proceso está controlado por el sistema AEmes a nivel MES (Figura 122). La programación de los bloques se realiza en un lenguaje según IEC 61131-3.

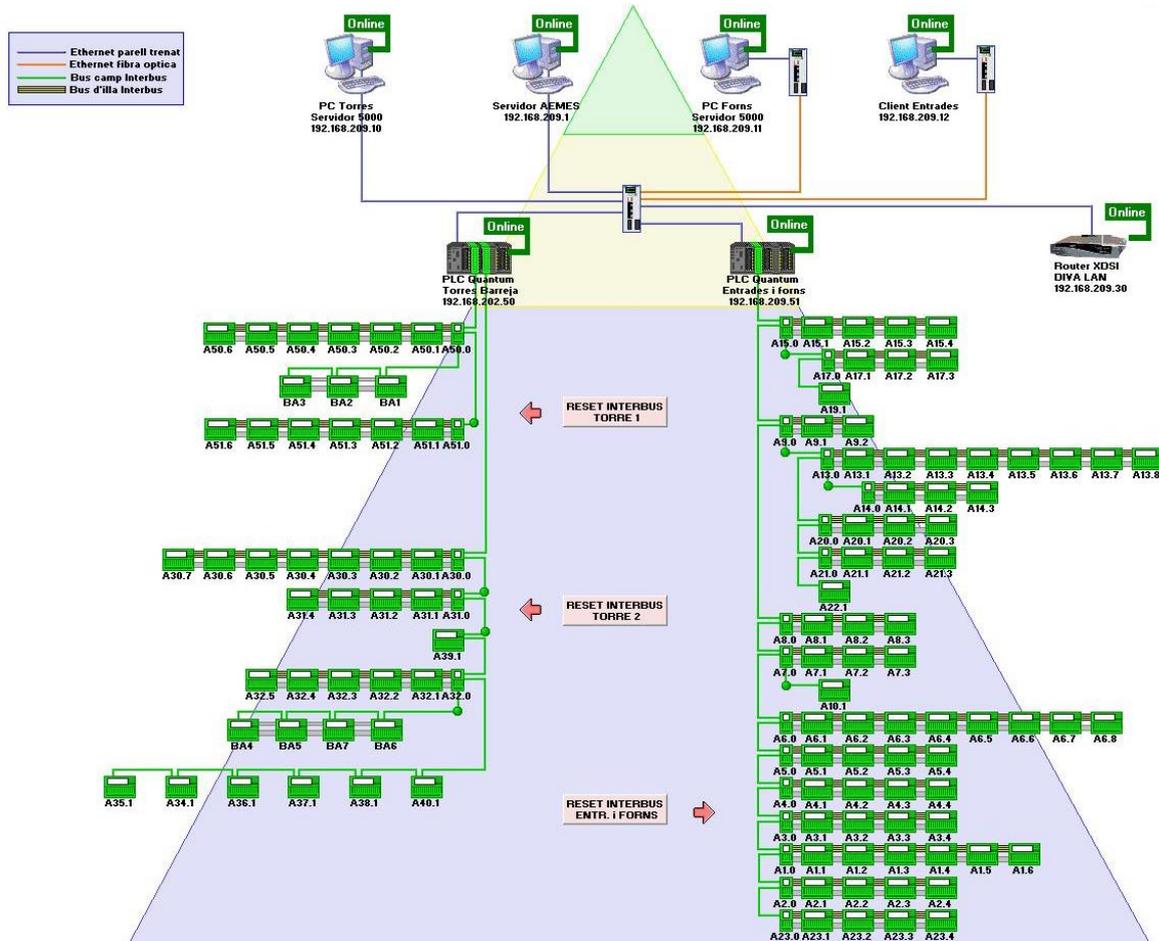


Figura 122. Esquema de conexiones entre elementos

El PLC dispone de una extensa librería de bloques de función para la regulación de procesos continuos, por lo que se propone la utilización de este equipo a tal fin. Para la monitorización de las diferentes variables del proceso y para la modificación de parámetros de regulación e historización para posterior análisis, se utilizará el sistema Citect Scada.

De la observación del proceso actual se desprende que el sistema presenta un importante retardo, además de que en la respuesta seguramente influyen multitud de factores difícilmente identificables. Por ello, se propone la utilización de los bloques funcionales PID con los que es fácilmente ajustable en ganancia y tiempo de integración de error a fin de adaptarse a las características mencionadas.

La variable que se debe controlar en todo momento es la temperatura del producto calcinado T_m . Pero este sistema simplemente, presentaría inestabilidades indeseables debido al extremo retardo que presenta el sistema. Por otra parte, se dispone de la medida de la temperatura de los gases de salida, medida mediante el valor de la temperatura del material refractario T_r , que es una importante indicación avanzada de la temperatura que se obtiene después de un tiempo en el material a la salida T_m .

Por ello, se implementará un sistema con dos reguladores PID en configuración “en cascada”. En esta configuración, el regulador PID principal al que se le indicara la consigna de temperatura del material a la salida, en función del error, su algoritmo de control actuará sobre la entrada de guiado en cascada del segundo regulador. Este segundo bloque, en función de la temperatura de gases de salida actuara sobre la válvula de gas de combustión, modificando el caudal de gas Q_g .

El bloque funcional propuesto, por su funcionalidad avanzada, para estos reguladores es el bloque COMP-PID (Figura 123).

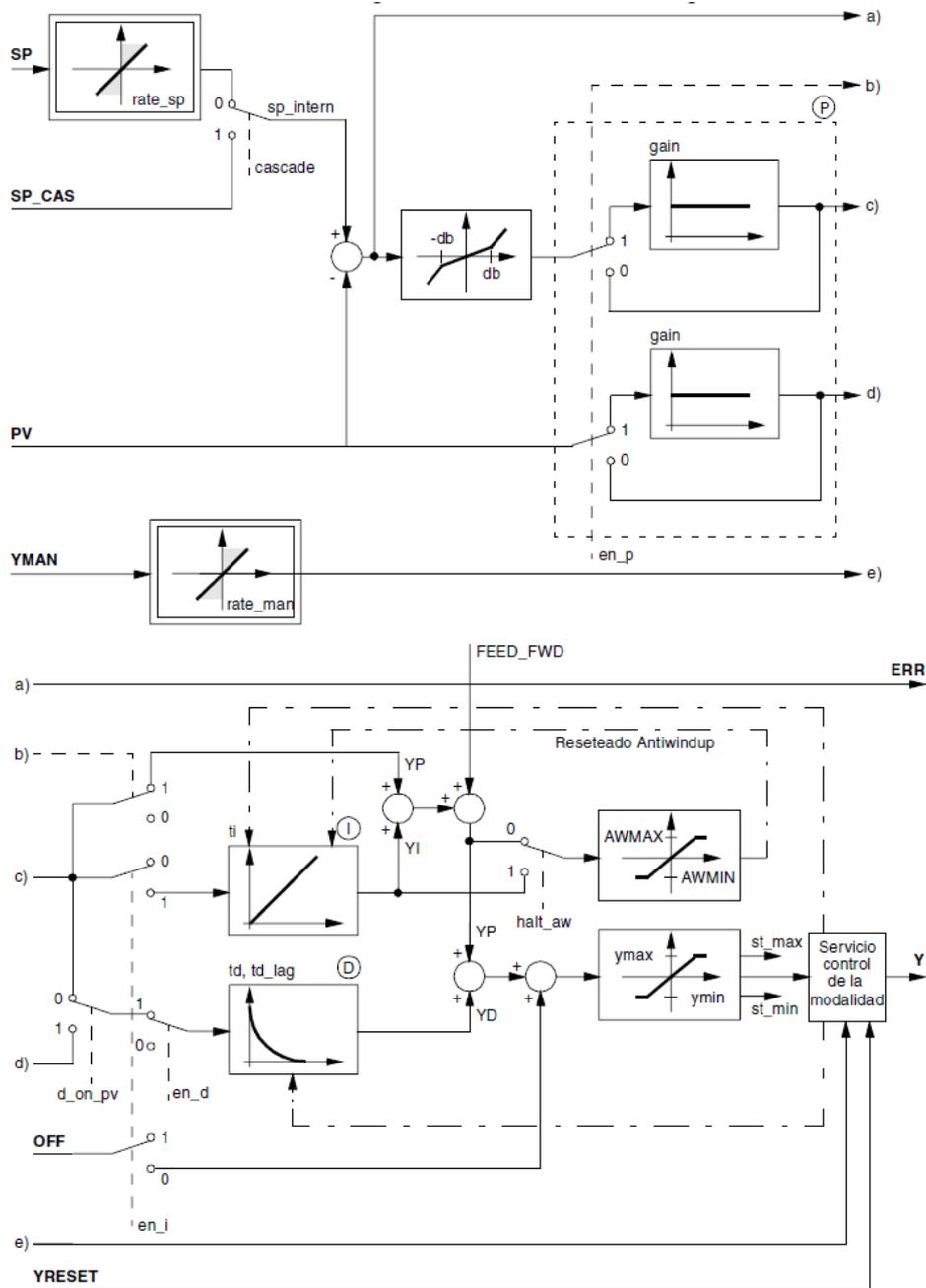


Figura 123. Diagrama de la estructura del controlador COMP_PID

3.6.2.1 Funcionamiento

El módulo de control PID actúa de la siguiente forma: En virtud de la magnitud de referencia SP y la magnitud de regulación PV, se forma una diferencia de regulación ERR. Esta diferencia de regulación ERR provoca una variación de la magnitud de posicionado Y.

Las propiedades del módulo son las siguientes:

- Regulador PID real con ajuste independiente de *gain*, *ti*, *td*
- Modalidades de servicio Manual, Detenido, Automático, Cascada, Reseteado, Ajuste de valor manual
- Limitación de crecimiento para servicio manual
- Ajuste del seguimiento del valor manual
- Limitación de crecimiento para los valores de guiado.
- Conmutación manual/automático sin brusquedad
- Limitación de magnitudes de posicionado
- Componentes *P*, *I* y *D* conectables en forma independiente y sin brusquedad
- Modificación de la amplificación sin brusquedad
- Se puede elegir entre Reseteado Antiwindup o Detención Antiwindup
- Desplazamiento de los límites Antiwindup con respecto a los límites de posicionado
- Medida Antiwindup sólo si está activa la componente *I*
- Tiempo de retardo de la componente *D* definible
- Componente *D* conmutable a magnitud de regulación PV o diferencia de regulación ERR
- Zona de insensibilidad con reducción de la amplificación
- Punto de trabajo externo (en servicio *P*, *PD* y *D*)
- Conmutación Manual/Automático seleccionable con y sin brusquedad

3.6.2.2 Función de transferencia

La función de transferencia del módulo PID será la siguiente:

$$G(s) = gain \cdot \left(1 + \frac{1}{ti \cdot s} + \frac{td \cdot s}{1 + td_lag \cdot s} \right)$$

donde

gain es el factor de amplificación

ti es la constante de tiempo de posicionado

td el tiempo de avance respecto al valor teórico

td_lag el retardo de la componente diferencial

También se puede describir cómo:

$$G(s) = gain \cdot (YP + YI + YD)$$

donde

YP es la función proporcional

YI la función Integral

YD la función diferencial

Con la particularidad de que mediante los parámetros de modalidad de servicio puede seleccionarse en todo momento la habilitación o no de cada uno de los componentes (*YP*, *YI* y *YD*).

A nivel de sistema de supervisión (Scada Citect) se accede a los parámetros de control y modalidad del bloque, punto de consigna y valor para posicionado manual, a fin de tener un sistema de interacción con el bloque. También a este nivel se historizan las variables de proceso. A fin de mejorar la respuesta del sistema a los cambios del

flujo de alimentación de material que se producirán en el proceso y que actuarían como perturbaciones que introducirían inestabilidades temporales, se conectara la señal de la báscula continua a la entrada FEED-FWD del segundo regulador. Esto representara un control en avance que actuara de inmediato sobre la acción de la válvula de gas siguiendo la evolución de la alimentación de mineral.

Se propone establecer unos factores de corrección de esta variable a introducir desde el sistema de supervisión a fin de adecuar la amplitud de esta acción al estado de humedad del producto.

3.6.2.3 Parámetros del PID

Los parámetros que gobernarán el PID de la Figura 124 se detallan en la Tabla 72:

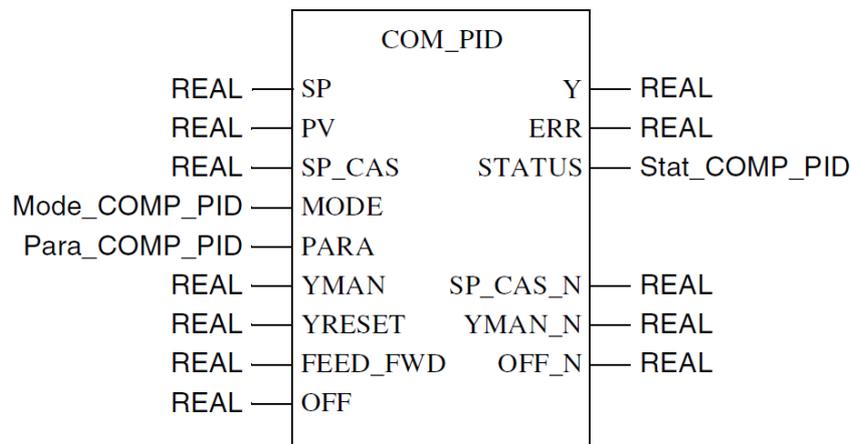


Figura 124. Representación del bloque PID

Parámetros	Tipo de datos	Significado
SP	REAL	Valor de consigna de la variable controlada
PV	REAL	Valor real de la variable controlada
SP_CAS	REAL	Consigna de guiado para cascada
MODE	Mode_COMP_PID	Parámetros de modalidad de servicio (Manual, Reset, Pausa, etc.)
PARA	Para_COMP_PID	Parámetros del algoritmo de regulación (Componentes P, I y D)
YMAN	REAL	Valor de salida para posicionamiento manual
YRESET	REAL	Valor de reseteado para la salida
FEED_FWD	REAL	Entrada para ajuste en adelanto de la salida a una señal de perturbación
OFF	REAL	Offset para la señal de salida
Y	REAL	Salida de control a elemento de actuación
ERR	REAL	Salida indicación error de medida
STATUS	Stat_COMP_PID	Salida de estado funcional del bloque
SP_CAS_N	REAL	Salida de guiado para cascada
YMAN_N	REAL	Salida de la señal de acción manual
OFF_N	REAL	Salida de la señal de offset

Tabla 72. Descripción de los parámetros del PID

3.6.2.4 Arquitectura de control

En la Figura 125 y Figura 126 se muestra el diagrama de control PID

Se describirá a continuación la red de control del PLC y el detalle de sus componentes.

BLOQUES DE CONTROL PID

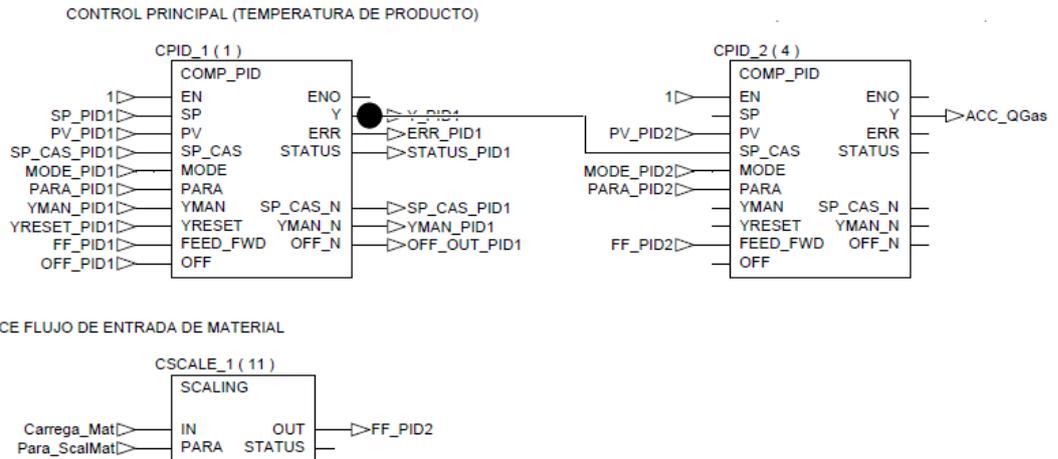


Figura 125. Diagrama de control de la aplicación de dos PID en cascada

Bloque CPID_1:

El primer bloque de control CPID_1 corresponde al regulador principal. En este, el parámetro SP proviene del sistema de supervisión y en él se establece la temperatura deseada en el material calcinado.

El parámetro PV es la temperatura real del material al final de la etapa de calcinación. La comparación entre estos valores es el error sobre el que se basará el bloque para, en función de los parámetros de regulación actuar sobre la señal de guiado del segundo regulador

Este bloque es el que debe controlar la temperatura del producto final. Se considera la acción P (Proporcional) e I (Integral). El bloque dispone de las señales de entrada según Tabla 73.

Las fórmulas de actuación de las diferentes componentes serán:

$$YP = gain \cdot ERR$$

Siendo

$$ERR = SP - PV$$

Para la función integral:

$$YI = YI(new) = YI(old) + gain \frac{dt}{ti} \frac{ERR(new) + ERR(old)}{2}$$

Donde:

$YI(old)$ es el valor YI de la última exploración

$ERR(new)$ es el valor ERR actual

$ERR(old)$ es el valor ERR de la última exploración

Dt es la deriva de tiempo desde la última exploración

ti es una constante de tiempo de integración

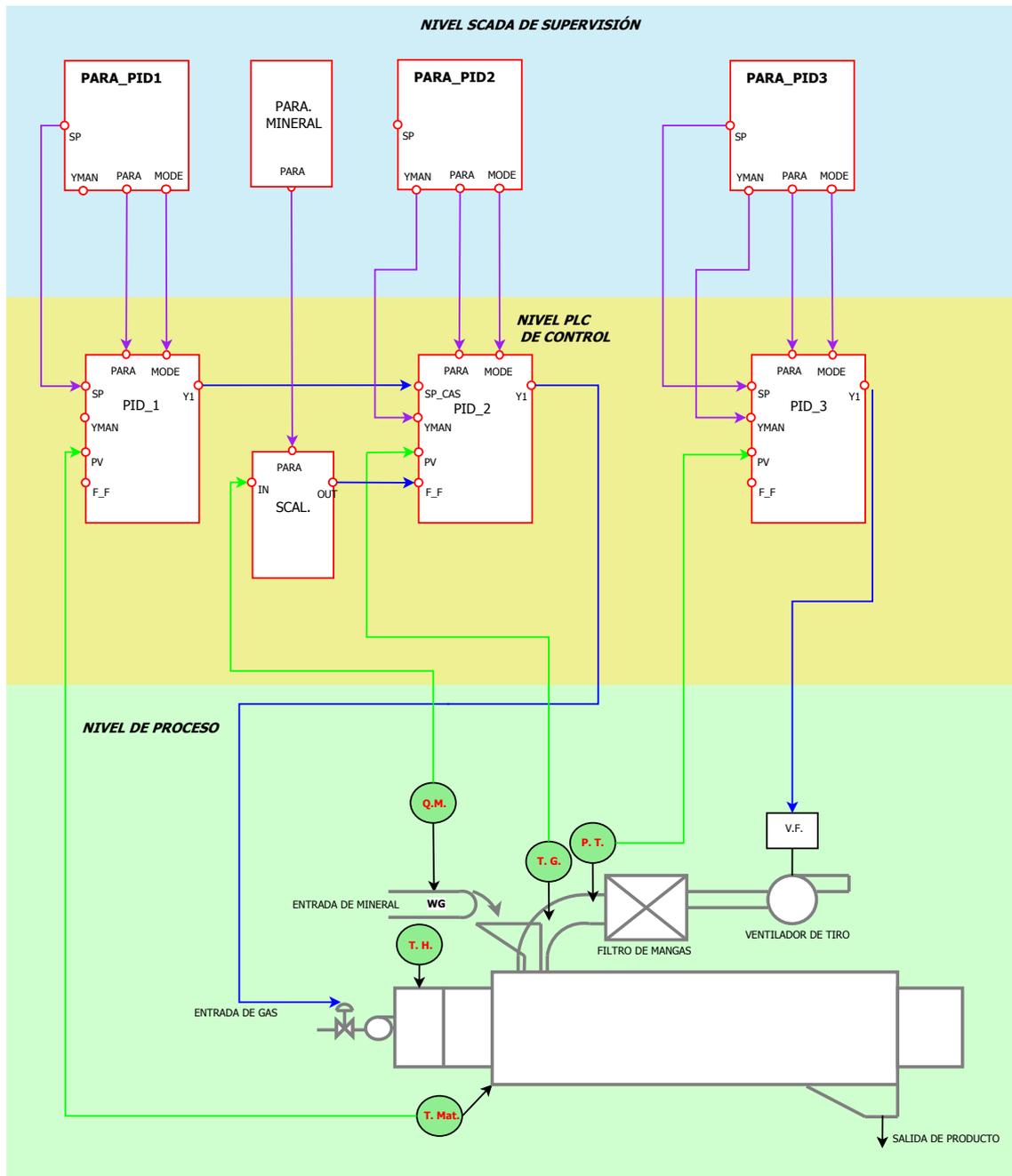


Figura 126. Arquitectura del control PID

La salida de control Y será en todo momento igual a

$$Y = YP + YI$$

Por tanto, la acción correctora será la suma del error sobre la medida obtenida más la integración del mismo en el tiempo estipulado.

Parámetros	Tipo de datos	Significado
SP	REAL	Consigna de temperatura proveniente del SCADA
PV	REAL	Señal de la sonda de temperatura de material calcinado
MODE	Mode_COMP_PID	Señales de control provenientes del SCADA
PARA	Para_COMP_PID	Parámetros de control del lazo provenientes del SCADA <ul style="list-style-type: none"> - <i>gain</i>: Ganancia de la acción de regulación - <i>ti</i>: Constante del tiempo de integración - <i>y_{max}</i> Valor máximo que puede tomar la acción del actuador - <i>y_{min}</i> Valor mínimo que puede tomar la acción del actuador
Y	REAL	Salida de control para pilotaje del segundo lazo (Cascada)
STATUS	Stat_COMP_PID	Indicación de estado al SCADA

Tabla 73. Señales del bloque CPID_1

Dado que es un proceso con un largo retardo debido al recorrido del material, deberá ajustarse un tiempo de integración en consecuencia largo para evitar oscilaciones que lleven el proceso a la inestabilidad. Además, teniendo en cuenta que la temperatura de humos deberá mantenerse dentro de unos márgenes (debe evitarse la salida de humos demasiado fríos que puedan provocar condensaciones en los filtros o demasiado calientes que puedan quemar las mangas filtrantes), deberá establecerse los correspondientes límites para la variable de salida.

Bloque CPID_2:

El segundo regulador de la arquitectura de cascada es el que actúa sobre la acción de la válvula de gas. En este, la señal de guiado de cascada es la que proviene de la salida del primer regulador. El parámetro PV es la temperatura real de los gases de salida del horno.

La salida Y , es función del error de medida calculada de acuerdo a los parámetros de regulación del bloque funcional y actúa directamente sobre la válvula de combustible. En este segundo regulador, también se utilizará el parámetro de entrada YMAN, ya que se supone que durante la fase de arranque del horno se deberá actuar sobre la aportación de gas independientemente de la regulación por temperatura hasta alcanzar un cierto nivel. En este bloque, también se utiliza la entrada FEED_FWD. A esta se conecta la señal de flujo de material de entrada al horno. Esta señal actúa directamente de forma proporcional sobre la acción de la válvula de gas.

A fin de ajustar el nivel de acción sobre este elemento en función de la variación de la señal de entrada, se utilizará el bloque SCALIN. Se utilizarán los parámetros de este bloque para la corrección de ganancia de esta acción en función del estado de

humedad i/o calidad del material crudo. Los parámetros de este bloque serán parametrizables desde el sistema de supervisión.

Este bloque es el que debe controlar la temperatura de humos del horno. Se considera que el valor de esta variable es un indicador en avance de los valores futuros de la temperatura de producto.

Se considera la acción *P* (Proporcional) e *I* (Integral)

El bloque dispone de las señales de entrada según Tabla 74

Parámetros	Tipo de datos	Significado
SP	REAL	Consigna de valor de proceso proveniente del controlador superior (cascada)
PV	REAL	Señal de la sonda de temperatura de humos
MODE	Mode_COMP_PID	Señales de control provenientes del SCADA
PARA	Para_COMP_PID	Parámetros de control del lazo provenientes del SCADA <ul style="list-style-type: none"> - <i>gain</i>: Ganancia de la acción de regulación - <i>ti</i>: Constante del tiempo de integración - <i>y_{max}</i> Valor máximo que puede tomar la acción del actuador - <i>y_{min}</i> Valor mínimo que puede tomar la acción del actuador
FEED_FWD	REAL	Entrada de control en avance de la acción de salida
Y	REAL	Salida de control para pilotaje de la válvula de gas
STATUS	Stat_COMP_PID	Indicación de estado al SCADA

Tabla 74. Señales del bloque CPID_2

Las fórmulas de actuación de las diferentes componentes serán:

$$YP = gain \cdot ERR$$

Siendo

$$ERR = SP - PV$$

Para la función integral:

$$YI = YI(new) = YI(old) + gain \frac{dt}{ti} \frac{ERR(new) + ERR(old)}{2}$$

Donde:

- YI(old)* es el valor *YI* de la última exploración
- ERR(new)* es el valor *ERR* actual
- ERR(old)* es el valor *ERR* de la última exploración
- Dt* es la deriva de tiempo desde la última exploración
- ti* es una constante de tiempo de integración

La salida de control *Y* será en todo momento igual a

$$Y = YP + YI + FEED_FWD$$

Por tanto, la acción correctora será la suma del error sobre la medida obtenida más la integración del mismo en el tiempo estipulado. Además en este caso se añade también la señal en avance FEED_FWD. Este modificador permite ajustar la acción de la válvula de gas a las variaciones del flujo del material de entrada sin tener que esperar a la reacción al error que se produciría con retardo en caso de que no se tuviera en cuenta.

Ya que este proceso se considera relativamente corto en el tiempo, se ajustará una constante de tiempo de integración breve a fin de tener una acción correctora suficientemente rápida.

También se establecen unos límites a la salida de control para evitar que la acción sobre la válvula de gas pueda salir de los márgenes de seguridad establecidos.

Bloque CPID_3:

Este bloque de control corresponde a la regulación del tiro del horno a través de la variación de velocidad del correspondiente ventilador. Existen 2 posibles estrategias para la regulación de esta variable:

- Control proporcional en función de la cantidad de combustible (Figura 127). En este caso, se regula la velocidad del ventilador en lazo abierto en función del gas que se está introduciendo al proceso. Es necesario identificar la curva de correspondencia entre la admisión de gas y las revoluciones del ventilador a fin de configurar el bloque SCALIG, que es que proporciona la consigna al variador de frecuencia en función de la posición de la válvula de entrada de gas. Con este sistema, el tiro efectivo puede ser desestabilizado por otros factores como la colmatación de las mangas filtrantes, etc....

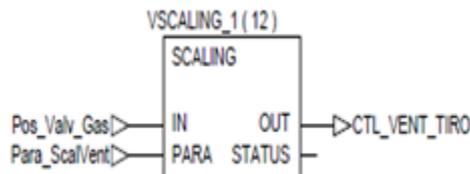


Figura 127. Bloque de control del ventilador del tiro, proporcional al caudal de combustible

- Montaje de un transmisor de presión diferencial en el conducto de salida de gases, de manera que se tenga la lectura de la depresión en este punto, y por tanto, una indicación real del tiro (Figura 128). En este caso, el regulador intenta mantener este valor modulando la velocidad del ventilador para contrarrestar los efectos perturbadores. Esto ha de redundar en un mejor reparto de la llama en el interior del horno y, seguramente, en una mejor eficiencia energética del sistema.

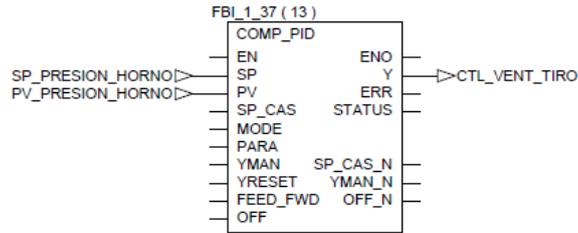


Figura 128. Bloque de control del ventilador del tiro

Se usará la primera segunda estrategia de regulación.

El algoritmo de este regulador es el mismo que el de los anteriormente descritos. El bloque dispone de las señales de entrada según Tabla 75.

Parámetros	Tipo de datos	Significado
SP	REAL	Consigna de depresión del horno proveniente del SCADA
PV	REAL	Señal de la sonda de presión relativa del Horno
MODE	Mode_COMP_PID	Señales de control provenientes del SCADA
PARA	Para_COMP_PID	Parámetros de control del lazo provenientes del SCADA <ul style="list-style-type: none"> - <i>gain</i>: Ganancia de la acción de regulación - <i>ti</i>: Constante del tiempo de integración - <i>y_{max}</i> Valor máximo que puede tomar la acción del actuador - <i>y_{min}</i> Valor mínimo que puede tomar la acción del actuador
Y	REAL	Salida de control para pilotaje del segundo lazo (cascada)
STATUS	Stat_COMP_PID	Indicación de estado al SCADA

Tabla 75. Señales del bloque CPID_3

3.6.3 Simulación del proceso

A fin de verificar el buen funcionamiento del sistema y comprobar la adecuación aproximada de los parámetros calculados antes de la aplicación real en planta, se realiza la programación de una sección en el PLC para simular la respuesta del proceso. En la Figura 129 se muestra el diagrama de bloques de la simulación.

Para establecer una simplificación del proceso a efectos de simulación, se establecen 2 procesos en serie, uno para el modelado del proceso del lazo de control de temperatura de humos y el segundo para el proceso de calcinación del material en función de la energía (gas) entrada al proceso.

SIMULACIÓN DEL PROCESO

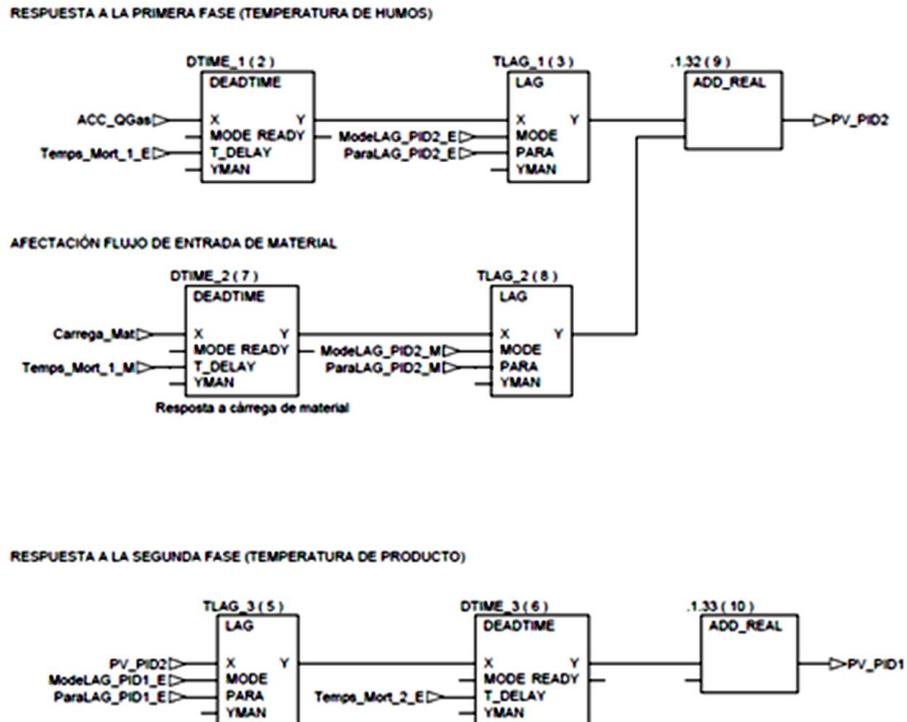


Figura 129. Simulación del proceso en PLC. Diagrama de bloques

Cada uno de estos procesos se compone por un tiempo muerto y por un retardo de primer orden, los dos parametrizables para intentar aproximarse a la respuesta real del horno. Asimismo, se establece también una cadena formado por bloques de las mismas características para modela la carga que representa el flujo de entrada de mineral.

3.6.3.1 Establecimiento de los parámetros del controlador

A partir de los valores históricos de proceso de los que se dispone actualmente, (Temperatura del refractario, temperatura del material y caudal de material de entrada) se puede identificar el tiempo medio del tránsito del material en el interior del tromel o refrigerador que se estima en unos 10 minutos.

A efectos de simulación previa, se estiman los valores de la Tabla 76. En base a estos valores, los bloques de control del PID tendrán los parámetros indicados en la Tabla 77. A fin de agilizar el proceso de simulación se establece una base de tiempo $t/10$.

Proceso	Tiempo muerto	Retardo
Calentamiento de gases	30s	90s
Calentamiento del mineral	10min	30min

Tabla 76. Estimación de los parámetros temporales del proceso

Parámetro	CPID_1	CPID_2	Indicaciones
gain	0.3	0.5	Ganancia de la acción reguladora
ti	8min	60s	Constante de tiempo de integración
y _{max}	120°C	100%	Valor máximo que puede tomar la acción del regulador
y _{min}	100°C	0%	Valor mínimo que puede tomar la acción del regulador

Tabla 77. Valores de los bloques de control PID

3.6.3.2 Simulación temporal

Establecidos los parámetros del proceso, se pone en funcionamiento el simulador, obteniendo las siguientes respuestas a diferentes cambios durante el proceso. Se puede ver la simulación en las diferentes fases del proceso en las figuras (Figura 130, Figura 131, Figura 132 y Figura 133).

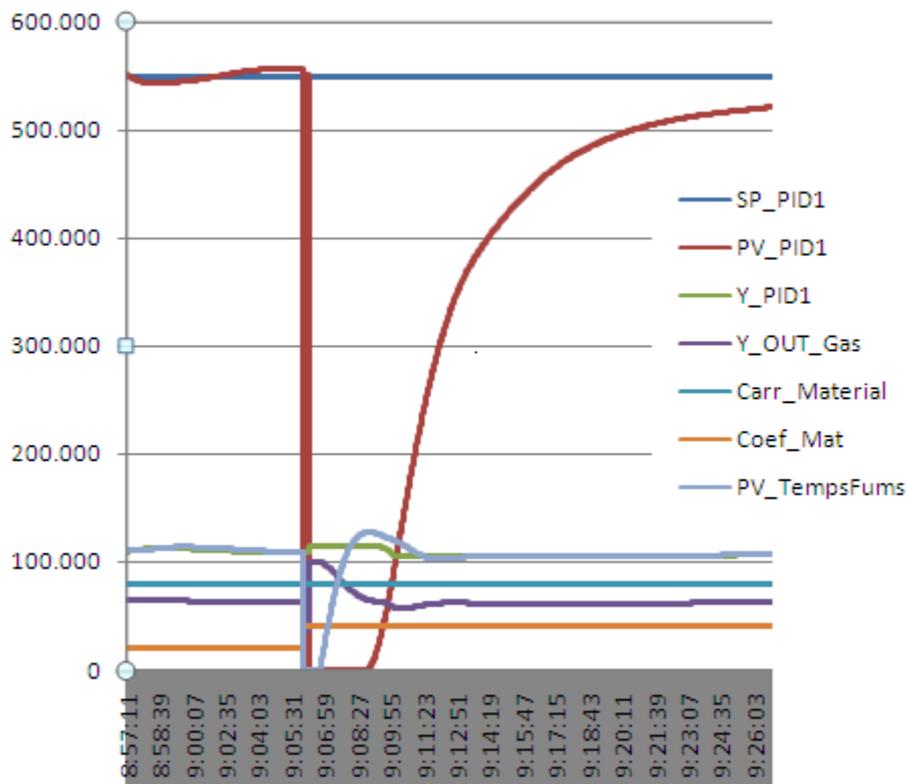


Figura 130. Simulación del proceso de arranque

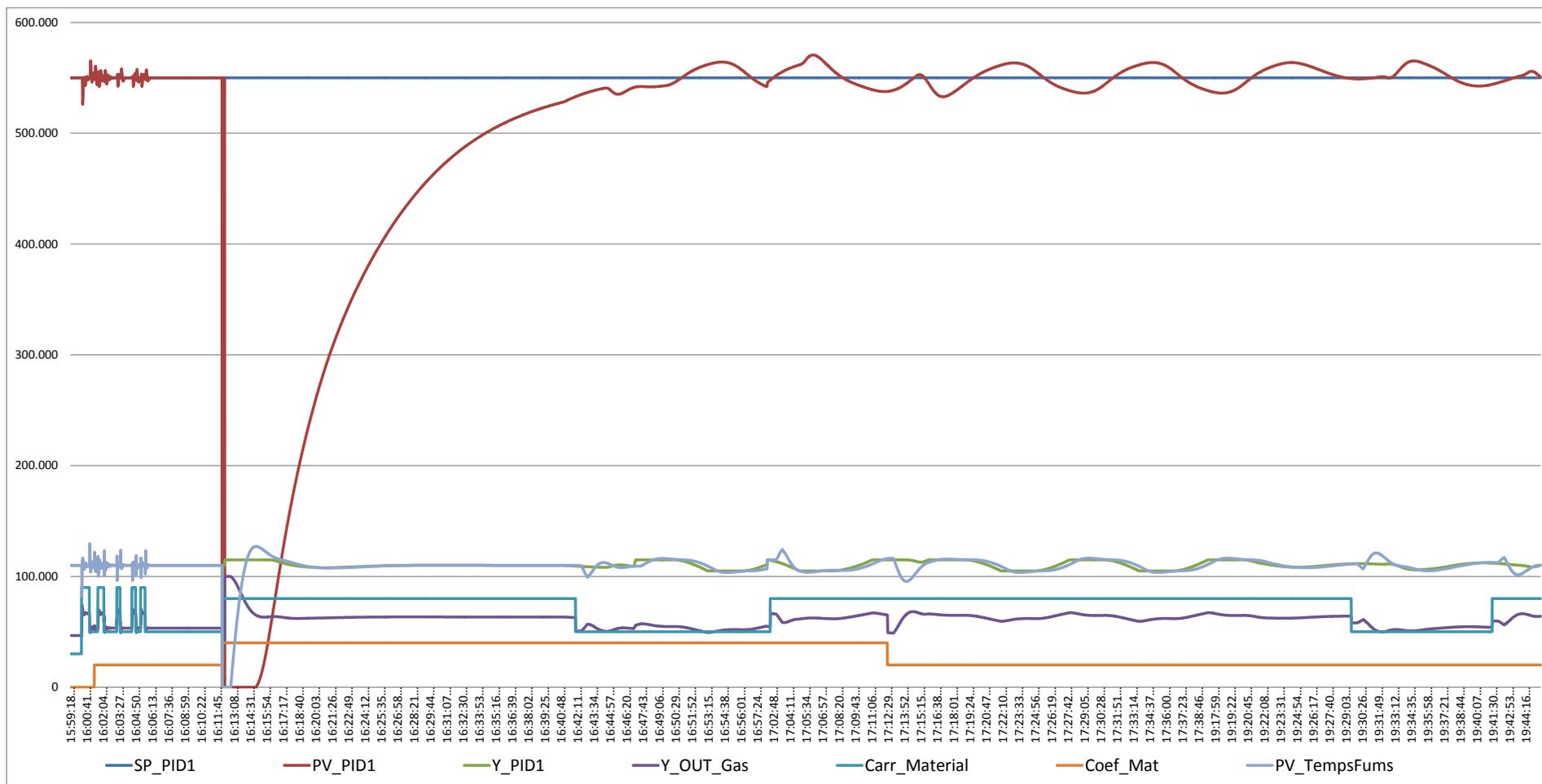


Figura 131. Simulación del proceso de calcinación controlado por PID's

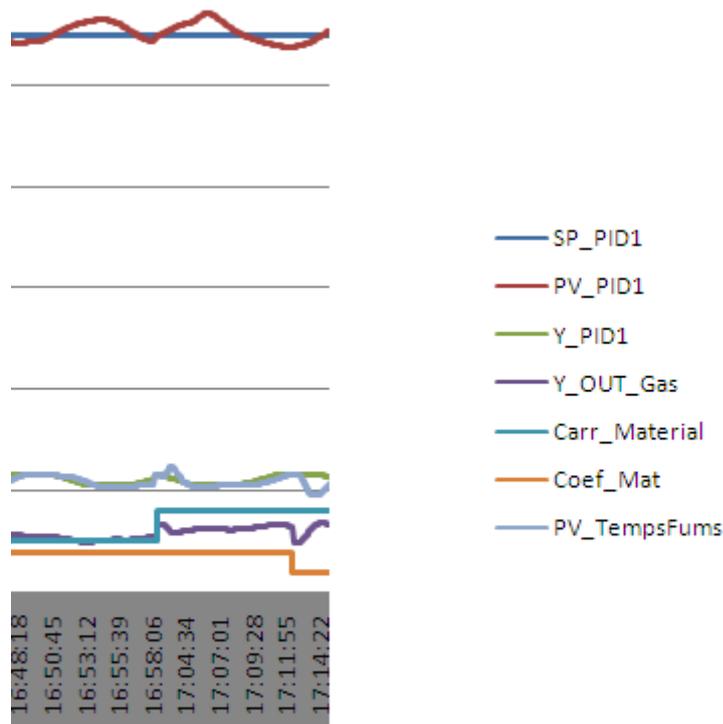


Figura 132. Simulación de un escalón de aumento del caudal de entrada de material

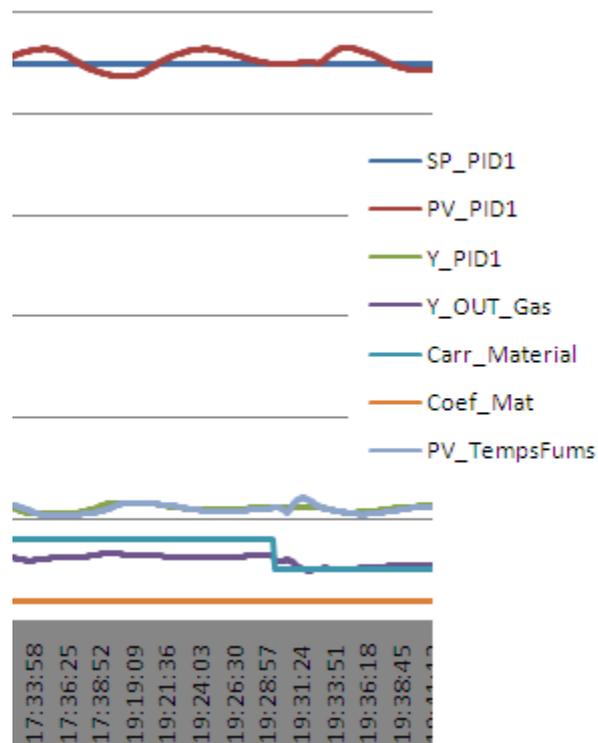


Figura 133. Simulación de un escalón de disminución del caudal de entrada de material

Con los resultados obtenidos de las simulaciones se constata que el sistema es capaz de responder a las principales variaciones sufridas en algunos parámetros del proceso.

3.7 MODELO DEL PROCESO MEDIANTE REDES BAYESIANAS

3.7.1 Aplicación de redes bayesianas

Como se ha visto en el estado del arte de esta tesis doctoral, las redes bayesianas son aptas y se aplican a problemas prácticos fuera del ámbito académico. Este tipo de redes se aplicaran, en éste caso, para el modelado y automatización de un horno rotativo de calcinación directa para la fabricación de anhídrita.

La elección de este tipo de sistema experto para este fin es debido a la facilidad que permiten las RB para representar de una forma relativamente simple un sistema complejo. Estas RB representan modularmente el conocimiento, soportan estructuras gráficas y usan algoritmos para la inferencia y aprendizaje. Esta última característica de las RB es especialmente útil para hacer que el sistema tenga un componente de *sistema inteligente*.

En ésta aplicación se usará un modelo llamado *Árbol de Fallas*, es decir, un sistema en el cual se pueda establecer la probabilidad de que la variable medida esté fuera de los parámetros establecidos como correctos.

3.7.2 Software para RB

En éste caso se seleccionará el software Netica de la compañía canadiense Norsys Software Corp. (www.norsys.com) en su versión 4.16 para Windows (2000, XP, Vista y 7).

Se trata de un software muy intuitivo y gráfico a la vez que potente. Permite el trabajo con redes bayesianas y diagramas de influencia. Netica trabaja con algoritmos muy rápidos y eficientes y permite encontrar valores de probabilidad apropiados para todas las variables desconocidas.

Permite cortar y copiar redes, relacionándolas entre si, así como crear funciones entre variables que las relacionen entre si. Su interfaz gráfico permite ver diagramas de barras y tipo medidores. Usa diagramas de influencia para encontrar las decisiones óptimas que maximizan los valores previstos de las variables, construyendo redes condicionales. A la vez, permite eliminar variables de poco interés sin afectar a la estructura de la red.

Los condicionantes principales para su elección son:

- Genera gráficos de calidad
- Ayuda en pantalla
- Realiza análisis de sensibilidad
- Decisiones óptimas para problemas de decisión secuencial
- Usa árboles acoplados para resolver influencias
- Aprende relaciones probabilísticas entre los datos
- Permite entrada de la relación de probabilidad mediante ecuaciones y funciones
- Facilita la discretización de variables continuas
- Encuentra valores desconocidos
- Sin límites en el tamaño de la red ni en los datos de las variables
- Permite la programación para integraciones de trabajo con PLC industriales

3.7.3 Generación y gestión de una RB

Una vez seleccionado el software adecuado, se establecerán los pasos necesarios para la creación de una red bayesiana.

3.7.3.1 Estimación de la red

En este paso se especificará su estructura gráfica mediante:

- Estimación estructural: Se generan de forma manual o automática todos los nodos o variables del sistema con sus respectivos niveles, para posteriormente generar manualmente la estructura gráfica acíclica.
- Estimación paramétrica: Se añadirá de forma manual o automática los parámetros de la red bayesiana. Netica tiene tres algoritmos diferentes para estimar los parámetros de la red: un método que se basa en la estimación de la frecuencia relativa conjunta, el algoritmo EM y un tercero que evalúa el gradiente de aprendizaje (tipo el algoritmo *backpropagation* que usan las RNA).

En éste caso se usará el método de la estimación de la frecuencia relativa, ya que es el más recomendable cuando no hay un gran número de valores perdidos o desconocidos ni existen variables latentes.

El algoritmo se expresa con la expresión:

$$p(x_i | x_{\pi(i)}) = \frac{n(x_i, x_{\pi(i)})}{n(x_{\pi(i)})}$$

Donde

$n(x_{\pi(i)})$ se referirá al número de casos que contiene la base de datos en los que las variables $X_{\pi(i)}$ toman el valor $x_{\pi(i)}$

$n(x_i, x_{\pi(i)})$ será el número de casos en que $X_i = x_i$ y $X_{\pi(i)} = x_{\pi(i)}$

Ésta expresión podría incurrir en problemas de malas estimaciones en casos en que no exista una combinación de estados determinada y por otro lado podría sobreajustar la estimación en caso de variables poco o muy representadas en las tablas de casos. Por ello Netica ajusta la expresión a la siguiente:

$$p(x_i | x_{\pi(i)}) = \frac{n(x_i, x_{\pi(i)}) + 1}{n(x_{\pi(i)}) + |X_i|}$$

Donde

$|X_i|$ se referirá al número de estados de la variable X_i

Adicionando de esta manera un factor de corrección en la ecuación, basado en la *Ley de Sucesión de Laplace*.

En esta parametrización será importante adicionar los datos expertos, o lo que es lo mismo, los que provienen de la experiencia previa de casos y que se aportará a la estructura de la red.

3.7.3.2 Uso de la RB

Una vez establecida y parametrizada la red se deberá compilarla para que pueda trabajar en modo de inferencia. Compilar una red consiste en generar una distribución previa de las probabilidades asociadas a cada uno de los estados de cada variable. El *Teorema de la Probabilidad Total*, como ya se ha visto, establece que si se dispone de un conjunto mutuamente excluyente de eventos $\varphi = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ cuyas probabilidades suman la unidad, la probabilidad de un nuevo evento B se definirá con la expresión:

$$p(B) = \sum p(B|A_i)p(A_i)$$

Usaremos éste teorema ya que nos permite calcular la probabilidad de un suceso a partir de sus probabilidades condicionadas. Netica compila automáticamente la RB obteniendo en ese momento las probabilidades para cada nodo de la red.

En estos momentos la red ya está preparada para instanciar uno o varios nodos y automáticamente recalculará las probabilidades para los restantes propagándose en todas direcciones.

3.7.3.3 Validación de la red

En esta fase se evaluará como se ajusta la red al conjunto de datos. Normalmente se realizan estudios de validez cruzada de los datos. En estos estudios se estima un modelo con una proporción de un 70% o 80% del total de la muestra y posteriormente se realiza el test con el 30% o 20% restante. El resultado de esta comparación dará la bondad del ajuste de la RB.

Netica permite realizar comprobaciones automáticas del ajuste de la red. Y las puede realizar por tres métodos distintos:

- Pérdida logarítmica: Oscila entre 0 (mejor ajuste) y ∞ , donde:

$$MOAC = -\log(Pc)$$

- Pérdida cuadrática (*brier score*): El resultado será un número entre 0 (mejor ajuste) y 2.

$$MOAC = 1 - 2 Pc + \sum_{j=1}^n Pj^2$$

- Compensación esférica: Entre 0 y 1 (mejor ajuste).

$$MOAC = \frac{Pc}{\sqrt{\sum_{j=1}^n Pj^2}}$$

Donde

P_c es la probabilidad predicha para el estado correcto
 P_j es la probabilidad predicha para el estado j
 n el número de estados
MOAC será la media para todos los casos analizados

A parte se puede generar automáticamente una matriz de confusión o tabla de clasificación, que comparará las predicciones hechas con las observaciones reales. La matriz tendrá tantas filas y columnas como estados tenga el nodo analizado. En cada celda de la matriz se muestra la diferencia entre lo predicho y lo observado. El ajuste perfecto estaría en una matriz con las celdas de la diagonal principal en 1 y 0 en todo el resto de la misma. La tasa global de error (*Error rate*) será un ratio de verificación de este ajuste. Si por ejemplo, esta tasa es del 6%, esto significa que el 6% de los datos predichos no serán correctos.

Cuando las variables son dicotómicas, el software también efectúa un test de ajuste generando una curva ROC (*Receiver Operating Characteristic Curve*) que evalúa la fuerza predictiva de cada nodo (López, 2012).

3.7.4 Modelo estadístico de un horno de anhidrita mediante RB

Como se ha visto en la introducción de este apartado, se aplicarán los conceptos vistos para elaborar un modelo estadístico mediante redes bayesianas que permitirá evaluar el *Árbol de Fallas*, es decir, un sistema en el cual se pueda establecer la probabilidad de que la variable medida esté fuera de los parámetros establecidos como correctos dependiendo de las probabilidades de todas las variables que intervienen en el proceso, en menor o mayor grado de vinculación.

3.7.4.1 Variables de Proceso

En la Figura 134 se representa el proceso de fabricación de anhidrita mediante un horno rotativo. En la misma se pueden presuponer muchas de las variables que intervendrán en el proceso de calcinación.

Las variables de proceso se pueden ver en la Tabla 78.

3.7.4.2 Variables de Control de Calidad

Intervendrán en este análisis otro tipo distinto de variables, las que darán cuenta del control de calidad de las variables de proceso anteriormente descritas. Estas se pueden dividir entre las variables que afectan a la materia prima, es decir, antes de calcinación y las que afectarán al producto terminado después de la misma. Su detalle se encuentra en la Tabla 79 y la Tabla 80.

Código	Nombre	Correspondencia Proceso
V55	Intensidad Molino Min	Molienda Mineral
V56	Luz Criba Molino Min	Molienda Mineral
V57	Intensidad Molino 1º	Molienda Primaria
V58	Luz Criba Molino 1º	Molienda Primaria
V03	Caudal Material	Transporte y Pesaje
V17	Caudal de gas	Calcinación
V25	Velocidad Rotación	Calcinación
V09	Temp Refractario	Calcinación
V13	Temp Material	Calcinación
V21	Temp Salida Mat	Calcinación
V33	Caudal Anll	Calcinación
V35	Extracción de H ₂ O	Calcinación
V70	Forma Llama	Calcinación
V05	Instant Partículas	Filtraje y evacuación
V07	Media Partículas	Filtraje y evacuación
V23	Temp emisión	Filtraje y evacuación
V29	Pres Dif Tiro	Filtraje y evacuación
V31	Caudal emisiones	Filtraje y evacuación
V59	Caudal Mat Filtro	Filtraje y evacuación
V01	Intensidad Molino 2º	Molienda Secundaria
V41	Luz Criba Molino 2º	Molienda Secundaria
V37	Velocidad Enfriador	Enfriado
V38	Pres Dif Enfriador	Enfriado
V40	Temp Ent Silo	Almacenamiento

Tabla 78. Variables que afectan al proceso de calcinación de anhidrita

Código	Nombre	Correspondencia
V60	Frente Explotación	Materia Prima
V42	Granul Entrada	Materia Prima
V43	Pureza Mineral	Materia Prima
V44	Humedad Libre	Materia Prima

Tabla 79. Variables que afectan al control de calidad de la materia prima

Código	Nombre	Correspondencia
V45	Grado Cal An	Producto Terminado
V46	Reactiv An	Producto Terminado
V47	Agua Comb 2ª	Producto Terminado
V48	Granul M >0,2	Producto Terminado
V49	Granul M >0,8	Producto Terminado
V51	pH de An	Producto Terminado
V61	Densidad An	Producto Terminado

Tabla 80. Variables que afectan al control de calidad del producto terminado

El significado y características de estas variables están ampliamente explicados en los apartados correspondientes de esta tesis, así como la metodología de ensayo.

En la Figura 135 se representa un análisis previo en formato gráfico a los factores que afectaran, a priori, a la correcta fabricación de anhidrita (Ishikawa, 1968).

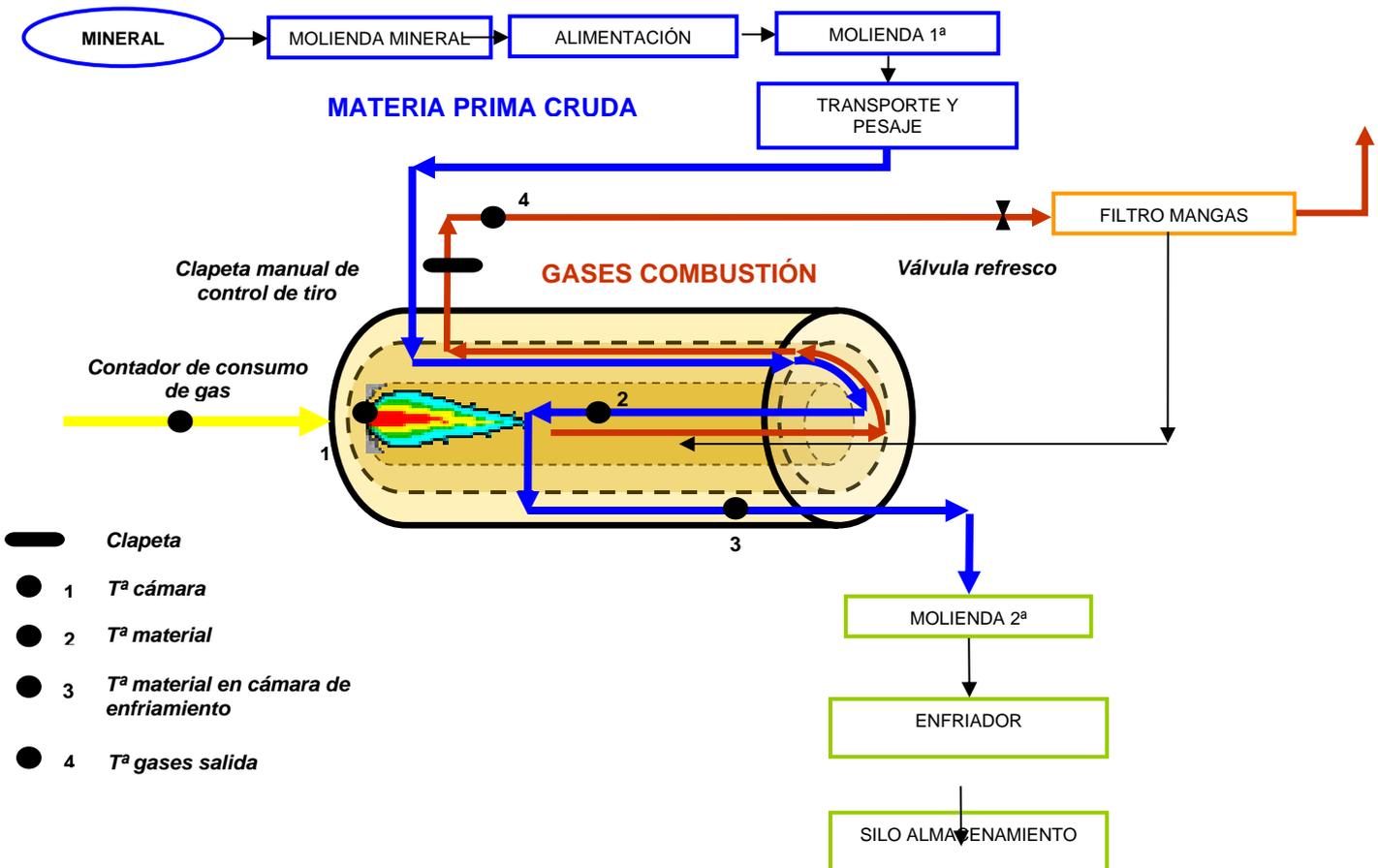


Figura 134. Flujograma del proceso de fabricación de anhidrita

3.7.4.3 Variables indirectas

En este grupo de variables estarán las referentes a la experiencia de los operadores del horno, así como los condicionantes que pueden afectar al rendimiento del mismo. Se pueden ver en la Tabla 81.

Código	Nombre	Correspondencia
V62	Exper Operario	RRHH
V63	Tipo Turnos	Producción
V64	Ritmo Producción	Producción
V69	Rendimiento	Mantenimiento
V65	TRS equipos	Mantenimiento
V66	RO equipos	Mantenimiento
V67	Nivel Engrase	Mantenimiento
V68	Ratio Preventivo	Mantenimiento

Tabla 81. Variables indirectas que afectan a la producción

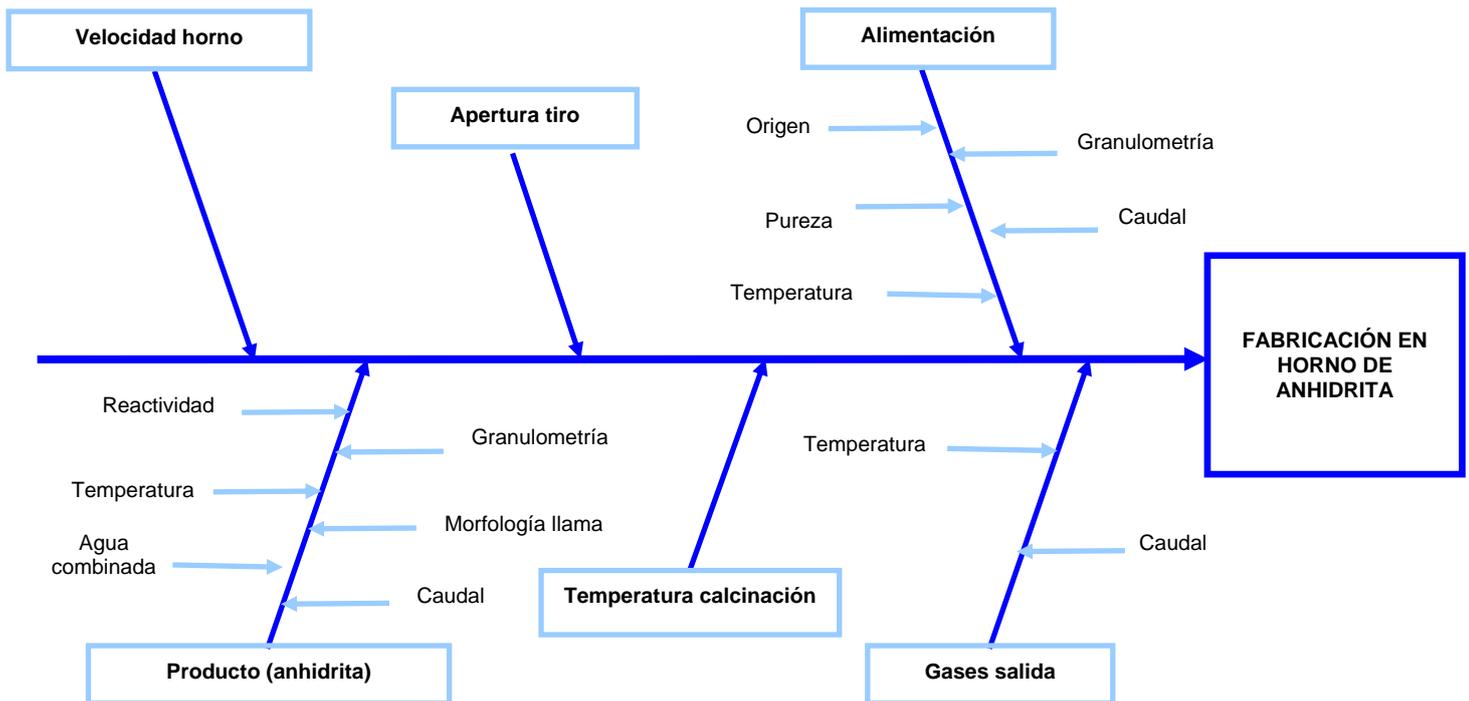


Figura 135. Diagrama causa-efecto en la fabricación de anhídrita

3.7.4.4 Otras variables

En este grupo básicamente estarán las condiciones meteorológicas y las estacionales, lo cual tiene sentido pensar que pueden afectar a la materia prima, al proceso y al producto terminado por diferentes razones para cada uno de ellos (Tabla 82).

Código	Nombre	Correspondencia
V71	Día Sem	Estacional
V72	Día Mes	Estacional
V73	Mes	Estacional
V74	Estación	Estacional
V75	Temp Media	Meteorológica
V76	Temp Max	Meteorológica
V77	Temp Min	Meteorológica
V78	Precipitación	Meteorológica
V79	Hum Rel	Meteorológica
V80	Presión Atm	Meteorológica
V81	Irradiación Sol	Meteorológica
V82	VMed Viento	Meteorológica
V83	Dirección Viento	Meteorológica
V84	Ráfaga Viento	Meteorológica

Tabla 82. Otras variables que afectan al sistema de calcinación

3.7.4.5 Tratamiento de los datos

Una vez realizado el análisis del proceso y de las variables más o menos indirectas, internas y externas, que puedan afectarlo, se obtiene un listado de 57 variables que se pueden ver en la Tabla 83.

Código	Nombre	Unidades	Discretización	Media	σ	Comportamiento
V01	Intensidad Molino 2º	A	Continuo	23,41	±5,23	
V03	Caudal Material	Tm/h	Continuo	6,07	±0,45	
V05	Instant Partículas	mg/Nm3	Continuo	32,76	±6,21	
V07	Media Partículas	mg/Nm3	Continuo	32,7	±5,68	
V09	Temp Refractario	ºC	Continuo	778	±83,4	
V13	Temp Material	ºC	Continuo	551	±44,2	
V17	Caudal de gas	m3/h	Continuo	103,11	±3,73	
V21	Temp Salida Mat	ºC	Continuo	190,5	±1,7	
V23	Temp emisión	ºC	Continuo	90	±3,3	
V25	Velocidad Rotación	rpm	Marcha, Paro	2	±0	
V29	Pres Dif Tiro	hPa	Bajo, Alto	2,8	±0,4	
V31	Caudal emisiones	Nm3/h	Bajo, Alto	19.700	±2.400	
V33	Caudal Anll	Tm/h	Continuo	4,8	±0,54	
V35	Extracción de H2O	% en peso	Bajo, Alto	19,08	±0,48	
V37	Velocidad Enfriador	rpm	Marcha, Paro	6	±0	
V38	Pres Dif Enfriador	hPa	Marcha, Paro	-	-	-
V40	Temp Ent Silo	ºC	Bajo, Medio, Alto	75	±6	
V41	Luz Criba Molino 2º	mm	D1.11, D1.31	-	-	-
V42	Granul Entrada	%>1mm	Bajo, Ok, Alto	40,9	±16	
V43	Pureza Mineral	% H2O comb	Bajo, Ok, Alto	18,3	±1,50	
V44	Humedad Libre	% H2O	Bajo, Alto	0,90	±0,67	
V45	Grado Cal An	mm H2O prov	Bajo, Ok, Alto	5,55	±1,50	
V46	Reactiv An	-	Ok, No Ok	-	-	-
V47	Agua Comb 2ª	% H2O comb 2ª	Bajo, Ok, Alto	0,45	±0,11	
V48	Granul M >0,2	%>0,2mm	Bajo, Ok, Alto	25,9	±3,60	
V49	Granul M >0,8	%>0,8mm	Bajo, Ok, Alto	2,31	±0,82	
V51	pH de An	pH	Bajo, Ok, Alto	10,16	±0,80	
V55	Intensidad Molino Min	A	Marcha, Paro	220	±70	
V56	Luz Criba Molino Min	mm	D200, D220	-	-	-
V57	Intensidad Molino 1º	A	Continuo	165,3	±64,6	

Código	Nombre	Unidades	Discretización	Media	σ	Comportamiento
V58	Luz Criba Molino 1º	mm	D10, D12	-	-	-
V59	Caudal Mat Filtro	Tm/h	Bajo, Alto	0,015	$\pm 0,002$	
V60	Frente Explotación	-	Blanca, Escayola, Yeso			
V61	Densidad An	kg/m3	Bajo, Ok, Alto	963	± 67	
V62	Exper Operario	-	Normal, Experto	-	-	-
V63	Tipo Turnos	-	M, T, N	-	-	-
V64	Ritmo Producción	Tm/h	Bajo, Medio, Alto	709	± 310	
V65	TRS equipos	%	Bajo, Medio, Alto	67	± 17	
V66	RO equipos	%	Bajo, Medio, Alto	99	± 1	
V67	Nivel Engrase	%	Bajo, Medio, Alto	65	± 11	
V68	Ratio Preventivo	%	Bajo, Medio, Alto	63	± 25	
V69	Rendimiento	%	Bajo, Medio, Alto	86	± 6	
V70	Forma Llama	-	Ok, No Ok	-	-	-
V71	Día Sem	-	lu, ..., do	-	-	-
V72	Día Mes	-	Inicio, Medio, Final	-	-	-
V73	Mes	-	ene, ..., dic	-	-	-
V74	Estación	-	Primavera, ..., Invierno	-	-	-
V75	Temp Media	ºC	Bajo, Medio, Alto	14,8	$\pm 8,0$	
V76	Temp Max	ºC	Bajo, Medio, Alto	20,6	$\pm 9,6$	
V77	Temp Min	ºC	Bajo, Medio, Alto	9,33	$\pm 7,7$	
V78	Precipitación	mm	Bajo, Medio, Alto	6,76	± 18	
V79	Hum Rel	%	Bajo, Medio, Alto	68,6	± 20	
V80	Presión Atm	hPa	Bajo, Medio, Alto	993	± 13	
V81	Irradiación Sol	MJ/m2	Bajo, Medio, Alto	16	$\pm 9,7$	
V82	VMed Viento	m/s	Bajo, Medio, Alto	2,73	$\pm 1,9$	
V83	Dirección Viento	º	N, S, E, O	157	± 96	
V84	Ráfaga Viento	m/s	Bajo, Medio, Alto	9,76	$\pm 5,6$	

Tabla 83. Relación de variables implicadas en el proceso

En dicha tabla se ha relacionado el código de la variable, su nombre descriptivo junto a las unidades en que se mide y sus valores más probables así como la desviación estándar para cada una de ellas.

Una parte de las variables se mantendrá en formato continuo o natural, ya que el número de datos y experiencia con las mismas es suficiente como para mantenerlas en este formato. Otra parte se ha discretizado a partir de valores continuos por alguna de las siguientes razones:

- Por agruparlas en dos o tres estados y así simplificarlas (por ejemplo las meteorológicas)
- Para describirlas mediante su estado: correcto/incorrecto (por ejemplo las de control de calidad)
- Por su naturaleza discreta (por ejemplo las luces de criba de los molinos)

Por otra parte se muestra en la Tabla 83 una simplificación gráfica de la evolución de la variable en el tiempo para poder apreciar el comportamiento temporal de la misma.

Tal como se ha visto en la sección correspondiente, donde se ha realizado un análisis clásico de las variables de sistema, los datos recogidos tienen muchas y diferentes procedencias. El número global de datos es muy importante, ya que se tienen unos 700.000 datos recogidos en un período menor a dos años. Algunas fuentes son automáticas mediante el sistema Scada implantado, otras están recogidas de reportes manuales realizadas por los operarios de producción, algunas más provienen de informes de control de calidad y laboratorio y por último se tienen las recogidas de forma puntual como control específico.

En las Figura 136 y Figura 137 se ha registrado gráficamente algunas variables de proceso registradas en período de un minuto, durante un ciclo de calcinación de una semana, de lunes a viernes. Se puede apreciar en la Figura 136 el arranque, el trabajo a régimen permanente y el paro del horno de calcinación, así como el discontinuo ciclo de trabajo de los molinos secundarios del proceso. Se observan las variabilidades de cada una de las variables, así como los puntos de descontrol puntual del propio proceso, como por ejemplo la rotura de una manga en un instante concreto, reflejada en la representación de la variable de la emisión de partículas a la atmósfera.

Este tipo de tratamiento clásico permite representar, como ya se ha visto, la realidad de una forma gráfica y como no, también analítica.

Para este proyecto se usará otra forma de análisis, como son las redes bayesianas.

3.7.4.6 Creación de la estructura de la RB

El análisis de las variables del proceso y sus relaciones se realizará, como ya se ha dicho, mediante las estructuras de las redes bayesianas.

En este trabajo, se usará de una forma indistinta, los términos variables y nodos como sinónimos, cosa que no es completamente rigurosa, ya que los nodos pueden ser naturales (los que describen el comportamiento de variables), pero también podrían ser nodos de decisión, constantes u otro tipo. Por otra parte también se tratarán como sinónimas las palabras probabilidad y creencia, cosa que tampoco es estricta, pero que permite simplificar en la terminología de este tipo de análisis.

Para estructurar la red, el primer paso será definir los nodos (según la tabla de variables implicadas) y sus relaciones. En la Figura 138 se puede ver la estructura básica de la red en su forma más sencilla, mostrando sólo las relaciones entre los nodos de la misma.

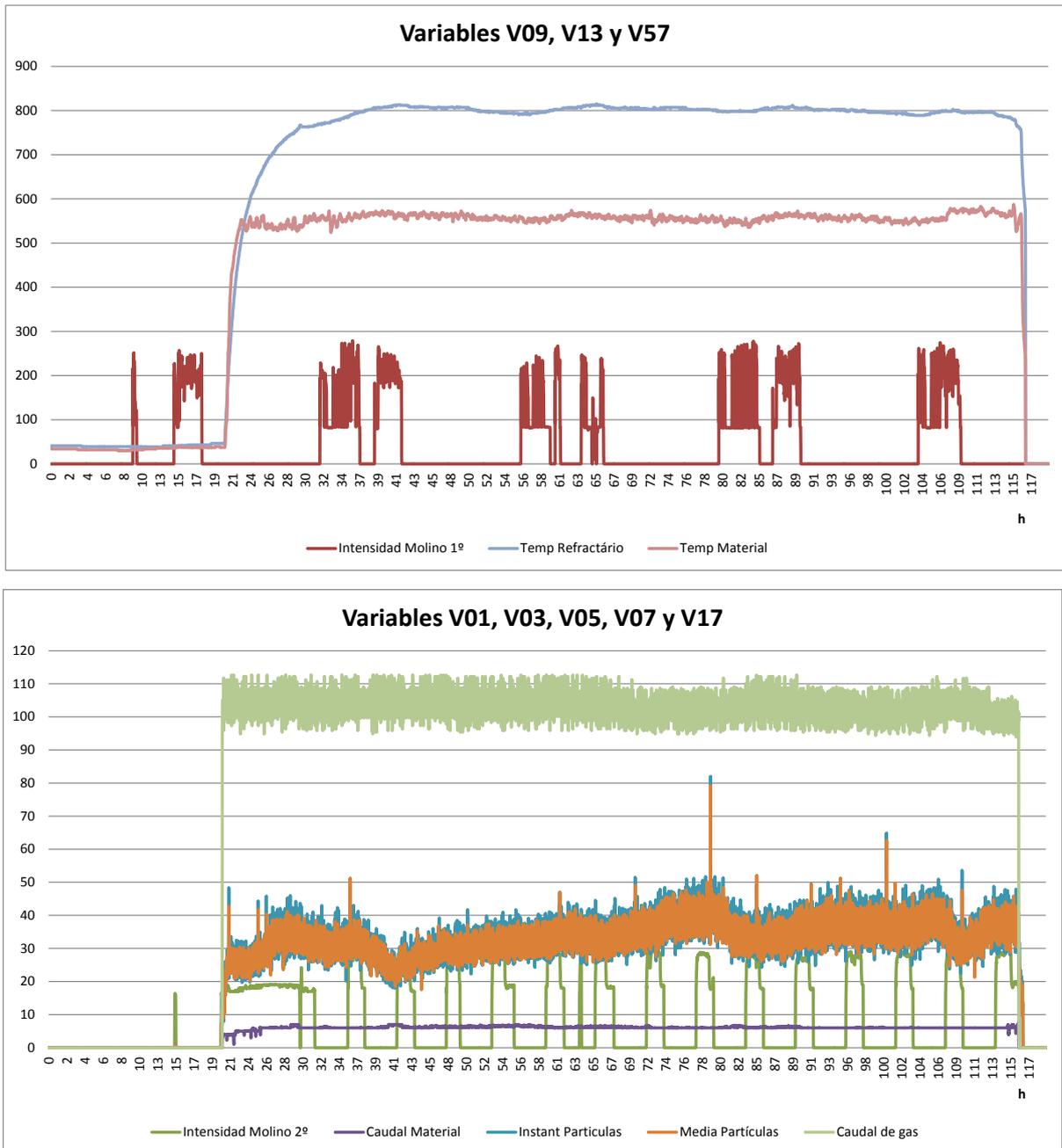


Figura 136. Representación temporal de algunas variables de proceso (en eje horizontal horas)

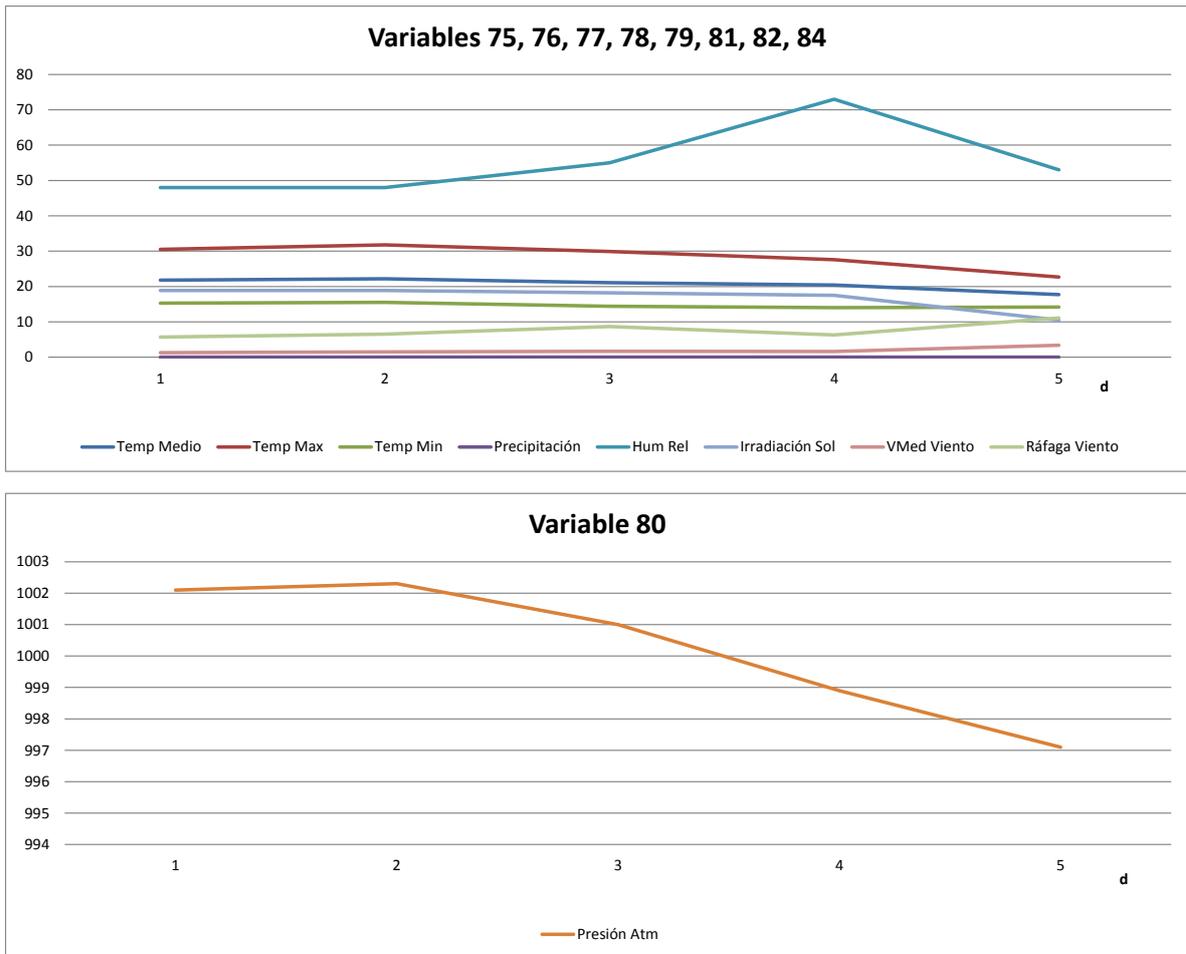


Figura 137. Representación temporal de algunas variables meteorológicas (en eje horizontal días)

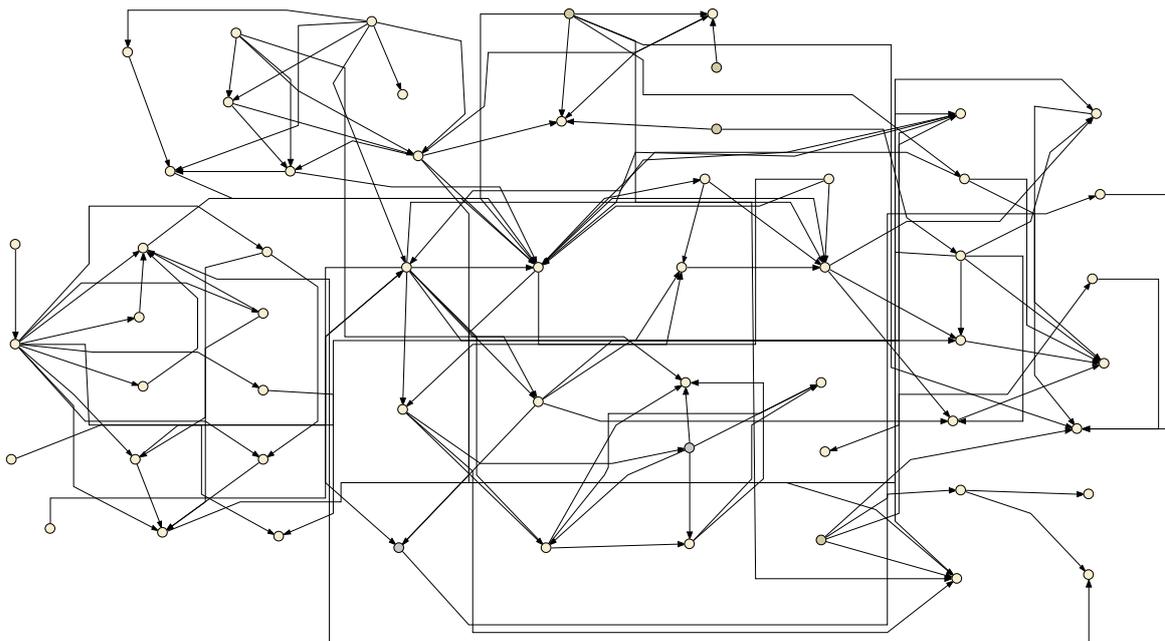


Figura 138. Modelo conexional de la RB

Cada variable tendrá sus nodos padres y sus nodos hijos, como se ve en la Figura 140. La relación entre los mismos vendrá definida, a priori por la experiencia en el proceso de fabricación de An y será presupuesta como correcta. Se verá más adelante que las suposiciones iniciales se modificarán una vez calculadas las relaciones internodales y analizando su magnitud.

En la Figura 139 a Figura 142 se muestran detalles de la red bayesiana respecto a partes concretas del proceso, a nivel de control de calidad, meteorología e indirectas del proceso respectivamente. Por ejemplo, se puede apreciar como la granulometría de la An afectará a su densidad, pero no al revés, la densidad no tiene por qué afectar a la granulometría.

Como se ha visto en el estado del arte, es importante que las relaciones entre nodos no creen bucles cerrados con las flechas en el mismo sentido, ya que la red sería incapaz de calcular las creencias por el sistema actual.

Se puede observar en los detalles mostrados de redes parciales en que existen nodos sin relacionar con otros nodos de su misma naturaleza, pero si se relacionaran con nodos de naturaleza distinta una vez puestos en valor y en el contexto general de toda la red.

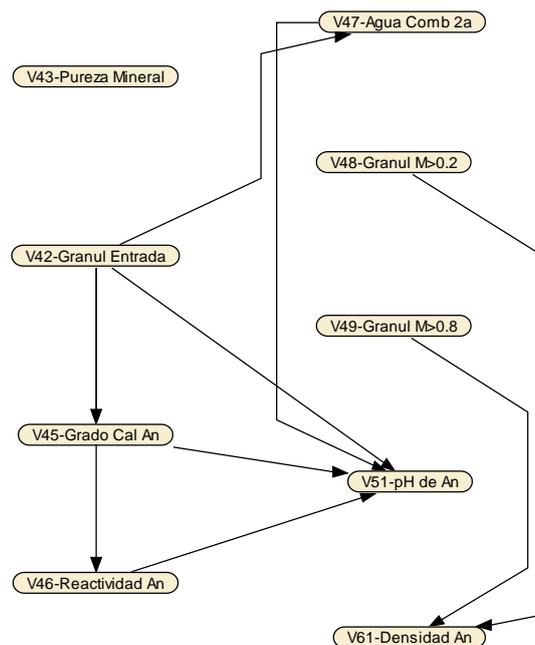


Figura 139. Estructura de RB con variables de control de calidad

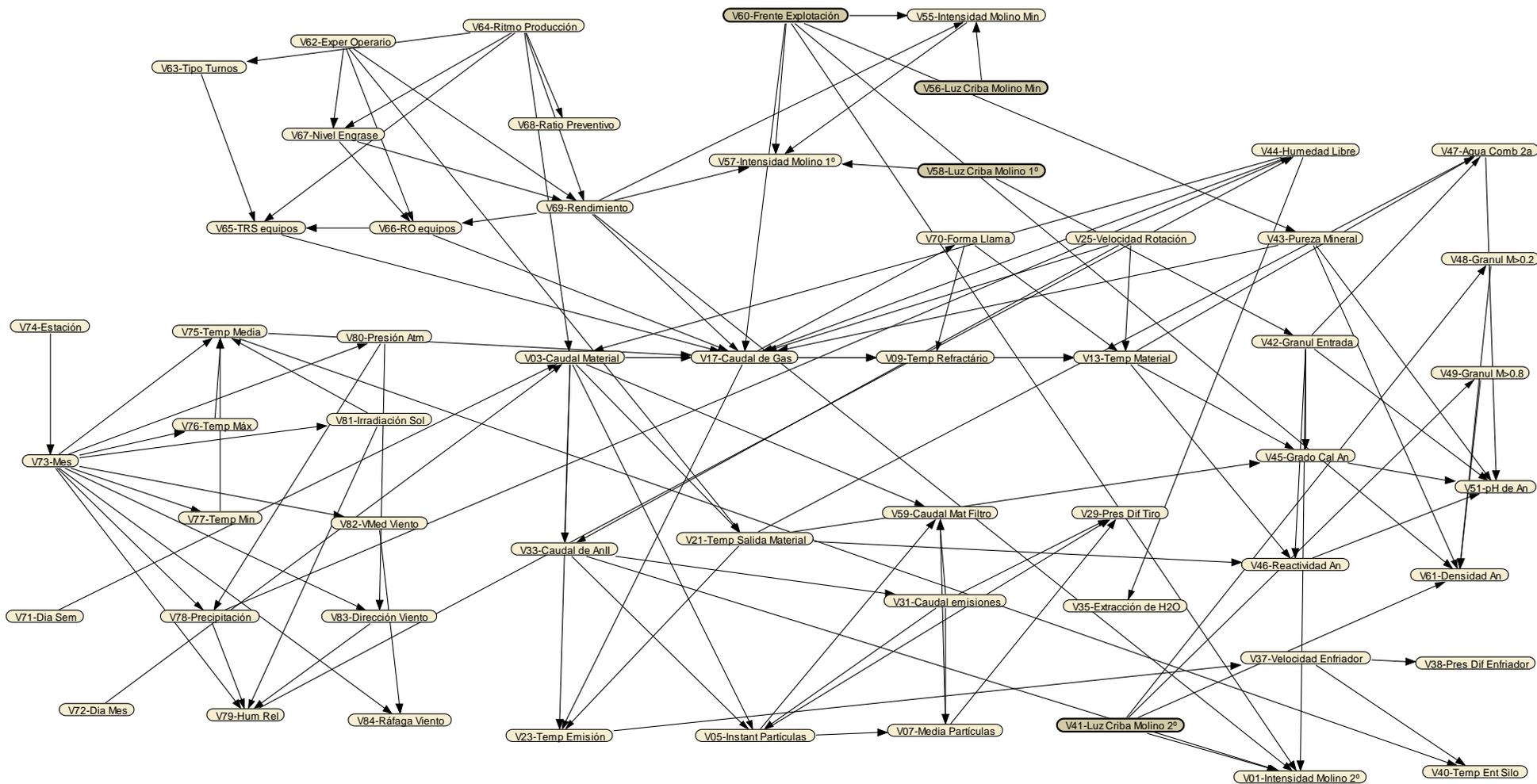


Figura 140. Estructura completa de la RB

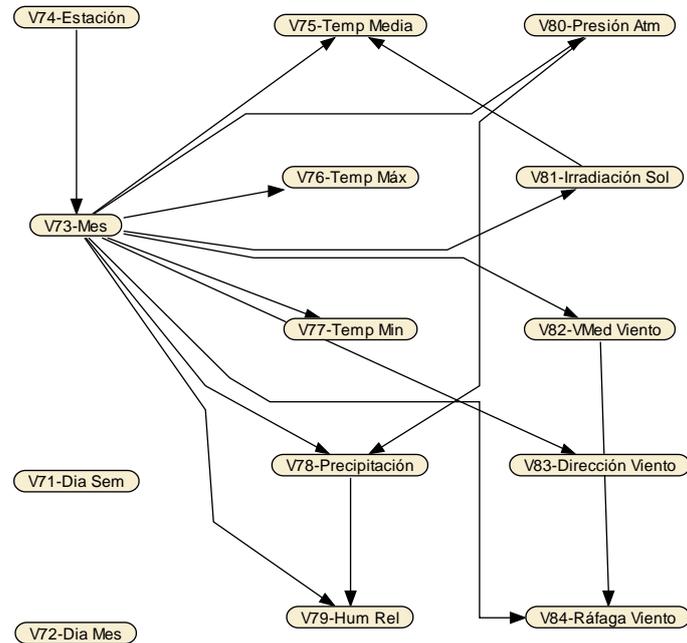


Figura 141. Estructura de RB con variables meteorológicas

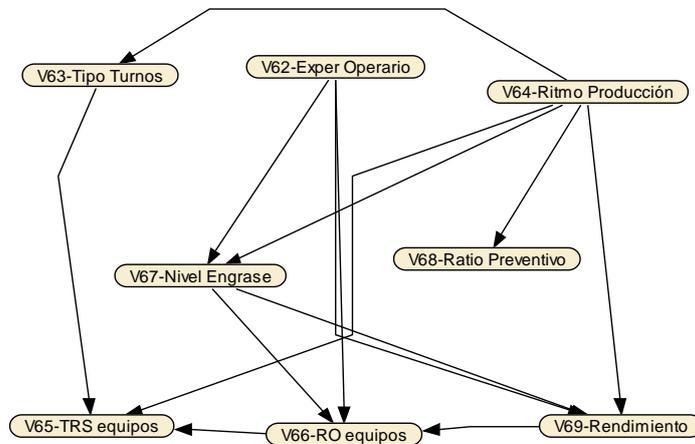


Figura 142. Estructura de RB con variables indirectas de proceso

3.7.4.7 Parametrización de la creencia y programación de la RB

En el trabajo que se presenta, el lector podrá estimar la complejidad de la súper-estructura de la RB para el proceso de calcinación de anhídrita. Esta red, evidentemente, escapa a cualquier razonamiento estadístico clásico que no permita algoritmos rápidos y gestionados mediante software y ejecutados mediante ordenador. Se están valorando 57 nodos mediante más de 100 enlaces dirigidos entre ellos, lo que supone más de 350.000 cálculos de probabilidad condicionada entre las variables. Por otra parte, cada variable tiene varios estados, tanto si son discretas como si son continuas (el propio software las discretiza para su representación, aunque las calcule

como continuas). La potencia de cálculo necesaria es por tanto muy importante en la red.

Sería imposible, en una red de las características descritas en el párrafo anterior realizar los cálculos de las probabilidades condicionales e introducirlas al sistema. Para este fin, el software Netica dispone de un módulo de aceptación de datos mediante un fichero tipo texto. En él se incorpora el caso a estudiar para que el propio sistema calcule las probabilidades, a priori, para cada estado de cada nodo en particular, en caso de ser estos discretos y que realice una estimación a partir de un número de rangos elegido, de las probabilidades de los nodos continuos. La única información que dará la red hasta el momento, será el porcentaje de probabilidad de los estados de cada nodo, sin influenciarse entre si.

En la Figura 143 se puede ver una representación de los valores esperados de algunas variables meteorológicas mediante un indicador de rango y de valores más probables.

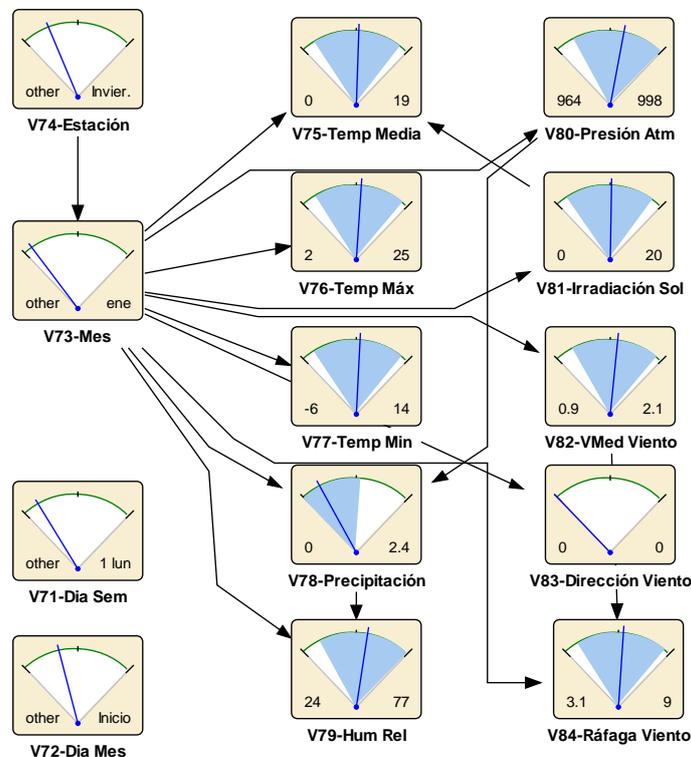


Figura 143. Variables meteorológicas de la RB sin instanciar (vista metrónomo)

El siguiente paso a seguir, una vez introducido el caso a estudiar a la RB, será el de compilar la red, paso en el que el sistema crea el conjunto de probabilidades para cada una de los estados de los nodos. En este caso, se puede decir que la red empieza a ser operativa. Se puede instanciar diferentes nodos para ver cómo reaccionan los estados de otros nodos relacionados con éste. Por ejemplo, en la Figura 144, donde se pueden apreciar varias instanciaciones de la subred de análisis meteorológico, se observa que si se introduce en la red la información que se está en enero, automáticamente, aumenta considerablemente la probabilidad de que las temperaturas sean bajas, cosa que no puede sorprender, pero también indica que el viento soplará probablemente del norte en un 51,5% de los casos, cosa que a priori, no se tenía tan clara. Así mismo, si se instancia también la presión atmosférica marcando que es baja, se podrá asegurar en un 54,8% de que la velocidad de la

ráfaga de viento sea baja, en el caso de que haya viento (un 53,8% de que sea bajo o no haya).

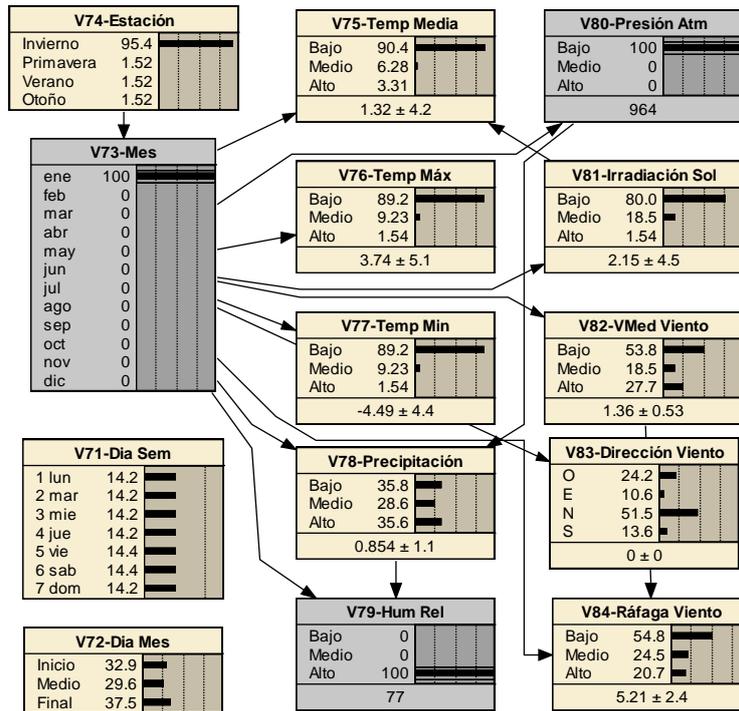


Figura 144. Variables meteorológicas de la RB con algunas instanciaciones (vista barras de creencia)

Se ha visto, por tanto, la influencia de la propagación de las instanciaciones y las probabilidades por toda la red, aguas arriba y aguas abajo. En la Figura 145 se muestra la red completa. Puede observarse en ella la gran complejidad y entramados relacionales que comporta. Así mismo la gran complejidad de cálculo estadístico que requiere.

Una vez se ha obtenido la red bayesiana del proceso a partir de los datos y registros históricos introducidos, se analizará el comportamiento de la red según unos datos de control, que en este caso serán un ciclo semanal de calcinación (Figura 146). Los porcentajes de los estados de cada nodo variaran más o menos una vez introducido el período de control, dependiendo de si los nuevos datos siguen las regularidades estadísticas más o menos similares a los datos históricos. Evidentemente, si el mes de control es octubre, en la nueva red, hay un 100% de probabilidad de cumplirse el estado octubre del nodo mes. Sobre todo las variables continuas, se verán afectadas más o menos en sus rangos en función de la bondad de ajuste de los datos.

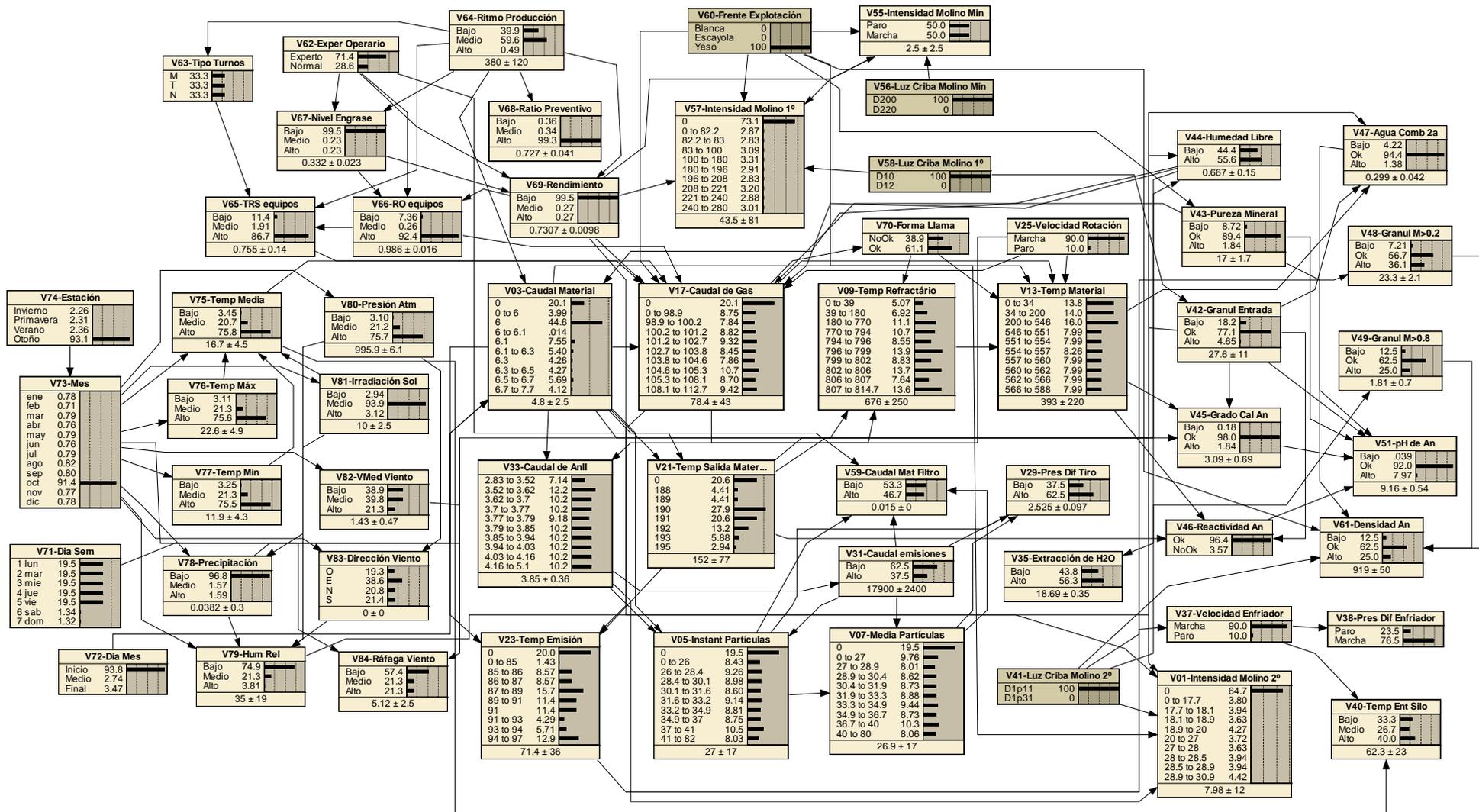


Figura 146. RB completa compilada con una nueva parametrización referencial de control para las variables

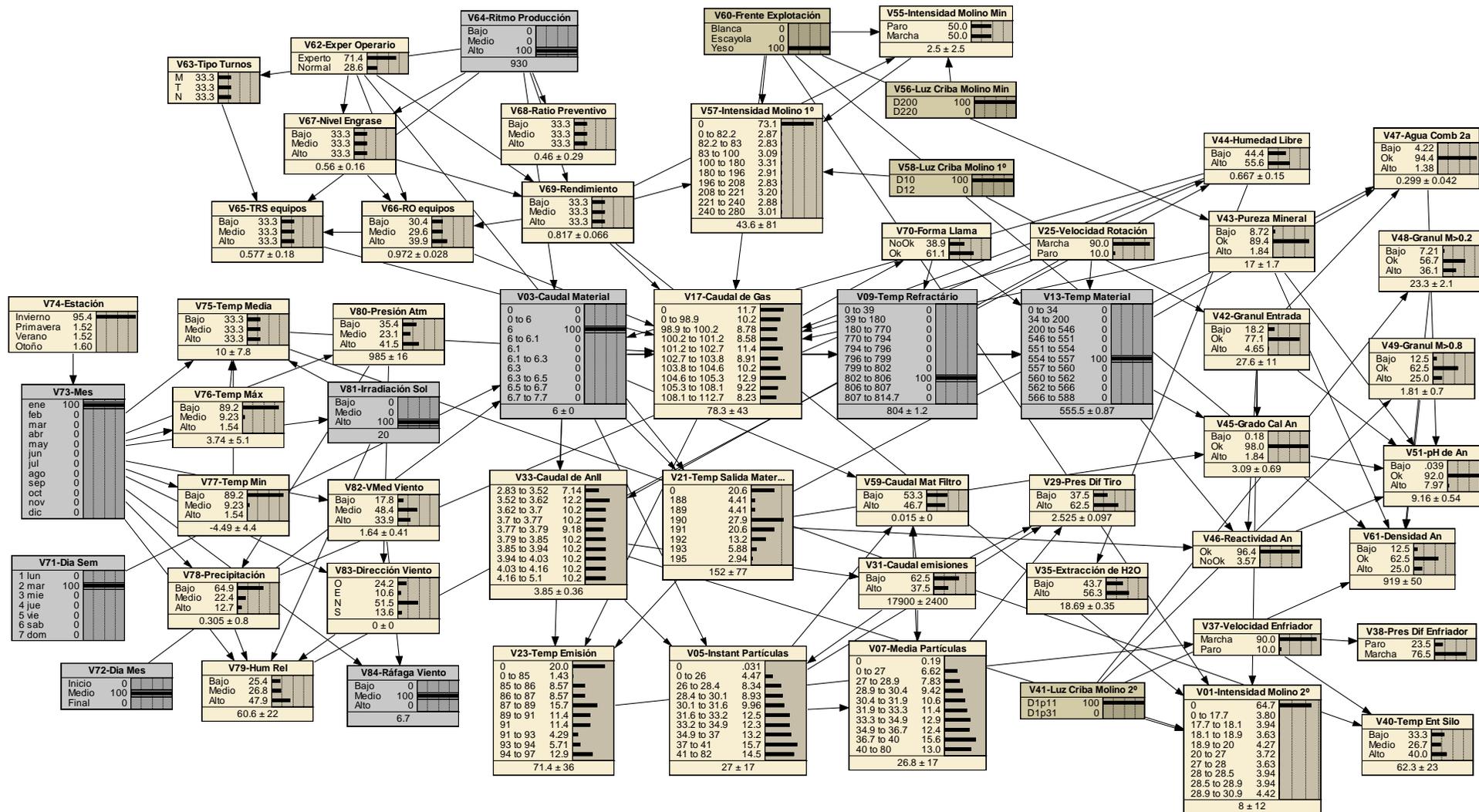


Figura 147. Ejemplo de instanciación de la RB

En la Figura 147 se puede ver el comportamiento de la red, una vez se instancian algunos de sus nodos y como el resto de la estructura varia, adaptándose a esta nueva configuración en función de las relaciones entre si de sus variables. Por ejemplo, si se instancia a 6m³/h el caudal de material al horno, hay un riesgo mayor de sobrepasar el caudal de partículas permitido por ley (50 mg/Nm³), que pasa de un 8% a un 14% de riesgo, respecto a trabajar con una variabilidad estándar de caudal.

La instanciación parcial dirigida de la RB permitiría obtener un modelo estable y fiable del proceso. Esto servirá, entre otras muchas cosas, para predecir estados (mejor dicho, probabilidades), que permitirán obtener las desviaciones sobre lo previsto inicialmente, valorar la importancia de cada subproceso o de cada variable del proceso respecto al proceso conjunto.

Uno de los factores más determinantes, sino el fundamental, para la elección de esta herramienta en éste proyecto, es la capacidad de la red en el aprendizaje. Éste aprendizaje ya se ha tratado bastamente en el estado del arte de este volumen. Esta característica permitirá introducir al sistema y a la red, cada vez datos más fiables, con más experiencia, y esto, a todas luces, hará día a día cada vez más sólidos sus resultados.

Se aprecia este modelado como una herramienta muy potente para el diseño, la remodelación, el análisis y el trabajo diario de cualquier sistema de producción.

3.7.4.8 Análisis de la RB

En el apartado anterior se han establecido y trabajado con el modelo del proceso mediante una súper-estructura de RB. En este apartado se valorará la red y la bondad de sus parámetros y sus relaciones (Tabla 84).

57	Nodos (sin incluir las constantes)
0	Nodos de decisión
0	Nodos de utilidad
0	Nodos constantes
117	Enlaces (no desconectados)
0	Enlaces desconectados
0	Enlaces de acción retardada
0	Ciclos dirigidos (sin retrasos)
61	Bucles (sin tener en cuenta las direcciones de enlace)
1	Red separada (sin tener en cuenta las constantes)
361,750	Número CPT (número total de probabilidades condicionales)
0	Nodos negativos

Tabla 84. Características de la RB

Se han introducido en la RB modelo múltiples casos correspondientes a más y menos rangos temporales para comprobar la bondad de la red en condiciones diferentes y comparando siempre con el histórico total de casos, que cómo se ha dicho anteriormente dato a dato se retroalimenta y se hace más parecido a la realidad del proceso.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
V73-Mes	0.008	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.914	0.008	0.008
	0	0-6	6	6-6.1	6.1	6.1-6.3	6.3	6.3-6.5	6.5-6.7	6.7-7.7		
V03-Caudal Material	0.201	0.040	0.446	0.000	0.075	0.054	0.043	0.043	0.057	0.041		
	0	0-17.7	17.7-18.1	18.1-18.9	18.9-20	20-27	27-28	28-28.5	28.5-28.9	28.9-30.9		
V01-Intensidad Molino 2º	0.647	0.038	0.039	0.036	0.043	0.037	0.036	0.039	0.039	0.044		
	0	0-26	26-28.4	28.4-30.1	30.1-31.6	31.6-33.2	33.2-34.9	34.9-37	37-41	41-82		
V05-Instant Partículas	0.195	0.084	0.093	0.090	0.086	0.091	0.088	0.088	0.105	0.080		
	0	0-27	27-28.9	28.9-30.4	30.4-31.9	31.9-33.3	33.3-34.9	34.9-36.7	36.7-40	40-80		
V07-Media Partículas	0.195	0.098	0.080	0.086	0.087	0.089	0.094	0.087	0.103	0.081		
	0	0-82.2	82.2-83	83-100	100-180	180-196	196-208	208-221	221-240	240-280		
V57-Intensidad Molino 1º	0.731	0.029	0.028	0.031	0.033	0.029	0.028	0.032	0.029	0.030		
	0	0-85	85-86	86-87	87-89	89-91	91	91-93	93-94	94-97		
V23-Temp Emisión	0.200	0.014	0.086	0.086	0.157	0.114	0.114	0.043	0.057	0.129		
	0	0-98.9	98.9-100.2	100.2-101.2	101.2-102.7	102.7-103.8	103.8-104.6	104.6-105.3	105.3-108.1	108.1-112.7		
V17-Caudal de Gas	0.201	0.088	0.078	0.088	0.093	0.084	0.079	0.107	0.087	0.094		
	0-34	34-200	200-546	546-551	551-554	554-557	557-560	560-562	562-566	566-588		
V13-Temp Material	0.138	0.140	0.160	0.080	0.080	0.083	0.080	0.080	0.080	0.080		
	0-39	39-180	180-770	770-794	794-796	796-799	799-802	802-806	806-807	807-814.7		
V09-Temp Refractario	0.051	0.069	0.111	0.107	0.086	0.139	0.088	0.137	0.076	0.136		
	2.83-3.52	3.52-3.62	3.62-3.7	3.7-3.77	3.77-3.79	3.79-3.85	3.85-3.94	3.94-4.03	4.03-4.16	4.16-5.1		
V33-Caudal de Anll	0.071	0.122	0.102	0.102	0.092	0.102	0.102	0.102	0.102	0.102		
	0	188	189	190	191	192	193	195				
V21-Temp Salida Material	0.206	0.044	0.044	0.279	0.206	0.132	0.059	0.029				
	1 lun	2 mar	3 mie	4 jue	5 vie	6 sáb	7 dom					
V71-Dia Sem	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.013	0.013					
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño								
V74-Estación	0.023	0.023	0.024	0.931								
	O	E	N	S								
V83-Dirección Viento	0.193	0.386	0.208	0.214								

	Bajo	Medio	Alto
V40-Temp Ent Silo	0.333	0.267	0.400
V64-Ritmo Producción	0.399	0.596	0.005
V65-TRS equipos	0.114	0.019	0.867
V66-RO equipos	0.074	0.003	0.924
V67-Nivel Engrase	0.995	0.002	0.002
V68-Ratio Preventivo	0.004	0.003	0.993
V69-Rendimiento	0.995	0.003	0.003
V75-Temp Media	0.035	0.207	0.758
V76-Temp Máx	0.031	0.213	0.756
V77-Temp Min	0.032	0.213	0.755
V78-Precipitación	0.968	0.016	0.016
V79-Hum Rel	0.749	0.213	0.038
V80-Presión Atm	0.031	0.212	0.757
V81-Irradiación Sol	0.029	0.939	0.031
V82-VMed Viento	0.389	0.398	0.213
V84-Ráfaga Viento	0.574	0.213	0.213
	Bajo	Ok	Alto
V42-Granul Entrada	0.182	0.771	0.047
V43-Pureza Mineral	0.087	0.894	0.018
V45-Grado Cal An	0.002	0.980	0.018
V47-Agua Comb 2a	0.042	0.944	0.014
V48-Granul M>0.2	0.072	0.567	0.361
V49-Granul M>0.8	0.125	0.625	0.250
V51-pH de An	0.000	0.920	0.080
V61-Densidad An	0.125	0.625	0.250
	Blanca	Escayola	Yeso
V60-Frente Explotación	0	0	1
	Inicio	Medio	Final
V72-Dia Mes	0.938	0.027	0.035
	M	T	N
V63-Tipo Turnos	0.333	0.333	0.333
	Bajo	Alto	
V29-Pres Dif Tiro	0.375	0.625	

V31-Caudal emisiones	0.625	0.375
V35-Extracción de H2O	0.438	0.563
V44-Humedad Libre	0.444	0.556
V59-Caudal Mat Filtro	0.533	0.467
	D10	D12
V58-Luz Criba Molino 1º	1	0
	D1p11	D1p31
V41-Luz Criba Molino 2º	1	0
	D200	D220
V56-Luz Criba Molino Min	1	0
	Experto	Normal
V62-Exper Operario	0.714	0.286
	Marcha	Paro
V25-Velocidad Rotación	0.9	0.1
V37-Velocidad Enfriador	0.9	0.1
	NoOk	Ok
V70-Forma Llama	0.389	0.611
	Ok	NoOk
V46-Reactividad An	0.964	0.036
	Paro	Marcha
V38-Pres Dif Enfriador	0.235	0.765
V55-Intensidad Molino Min	0.5	0.5

Tabla 85. Tabla de creencia de la RB

En la Tabla 85 se puede apreciar la tabla de probabilidades antes de instanciación para los nodos de la estructura según una muestra de datos introducida. A esta figura también se le llama *tabla de creencia* de la RB. En la misma se muestran las probabilidades para cada estado de cada variable.

Otro tipo de análisis posible de la RB es el que estudia las relaciones entre las variables como se puede ver en la Tabla 86, también llamado *árbol de relación* de la red. Se analizarán así las implicaciones y el tamaño de probabilidades combinatorias entre los estados de los mismos.

Registro	Relacionados	Tamaño	Variables implicadas
0	[1]	81	V63, V64, V66, V65
1	[0 2 13 18]	3,240	V64, V62, V69, V44, V03, V66, V65
2	[1 3]	8,640	V62, V69, V44, V03, V66, V65, V21
3	[2 4 12 24]	2,332,800	V60, V69, V25, V44, V03, V43, V66, V65, V75, V17, V21
4	[3 5 11]	432,000	V13, V60, V69, V25, V03, V43, V17, V21
5	[4 6 9]	129,600	V42, V13, V60, V69, V25, V03, V43, V21
6	[5 7 21]	16,200	V33, V42, V60, V69, V25, V03, V43
7	[6 8 14]	1,620	V41, V33, V42, V60, V69, V43
8	[7 15]	5,400	V01, V41, V33, V42, V60, V69
9	[5 10]	12,960	V45, V46, V47, V42, V13, V43, V21
10	[9]	486	V51, V45, V46, V47, V42, V43
11	[4]	40,000	V70, V09, V13, V25, V03, V17
12	[3 19]	24,000	V23, V03, V75, V17, V21
13	[1]	162	V67, V64, V62, V69, V66
14	[7]	486	V48, V49, V61, V41, V60, V43
15	[8 16]	54	V58, V42, V60, V69
16	[15 17]	360	V55, V57, V58, V60, V69
17	[16]	36	V56, V55, V60, V69
18	[1 33]	1,260	V71, V72, V64, V44, V03
19	[12 20]	60	V37, V23, V75
20	[19 31]	18	V40, V37, V75
21	[6 22]	2,000	V31, V05, V33, V03
22	[21 23]	4,000	V07, V59, V31, V05, V03
23	[22]	400	V29, V07, V31, V05
24	[3 25 28]	216	V73, V81, V44, V75
25	[24 26 32]	648	V78, V79, V73, V81, V44
26	[25 27]	1,296	V83, V78, V79, V73, V81
27	[26]	432	V80, V83, V78, V73
28	[24 29]	972	V77, V76, V73, V81, V75
29	[28 30]	108	V82, V84, V73
30	[29]	48	V74, V73
31	[20]	4	V38, V37
32	[25]	4	V35, V44
33	[18]	9	V68, V64
Tamaño total: 3,019,600			

Tabla 86. Árbol de relaciones de la RB

3.7.4.9 Influencia de las variables

En la simulación de casos presentada, uno de los objetivos será la obtención de la relacional entre las variables que conforman la RB, sobre todo para determinar las influencias más notables. En la Tabla 87 se pueden ver algunas relacionales entre nodos, que serán las que más influirán en el proceso.

Variable	Bisabuelos	Abuelos	Padres	Nodo	Hijos	Nietos	Biznietos
V03-Caudal Material	V73, V80, V83, V81	V78, V79	V44, V64, V71, V72	V03	V05, V13, V09, V23, V17, V33, V21, V59	V07, V29, V47, V45, V46, V37, V70, V01, V31	V51, V38, V40
V13-Temp Material	V78, V79, V63, V62, V67, V73, V81, V77, V76	V44, V64, V71, V72, V60, V43, V65, V66, V69, V75	V09, V03, V17, V70, V25	V13	V47, V45, V46	V51	
V17-Caudal de Gas	V80, V83, V74	V64, V71, V72, V78, V79, V63, V62, V67, V73, V81, V77, V76	V60, V03, V25, V44, V43, V65, V66, V69, V75	V17	V09, V13, V70, V23	V47, V45, V46, V37	V51, V38, V40
V23-Temp Emisión	V78, V79, V63, V67, V73, V81, V77, V76	V62, V44, V64, V71, V72, V60, V25, V43, V65, V66, V69, V75	V21, V03, V17	V23	V37	V38, V40	
V31-Caudal emisiones	V44, V64, V71, V72	V25, V03	V33	V31	V59, V29, V05, V07		

Tabla 87. Relaciones de los nodos más influyentes

Lo que corresponde a un resultado similar al ofrecido en el apartado de la evaluación de las variables del proceso por métodos clásicos, reforzando la argumentación. En la Tabla 88 se pueden obtener la sensibilidad a otras variables de los principales nodos

Finalmente, se evaluará, en el análisis para un caso concreto, la bondad de correlación del modelo entre este caso concreto (un ciclo semanal) y todos los datos históricos. Se debe tener en cuenta que es normal que haya una distancia entre la realidad de una semana concreta y el total de los datos históricos (la muestra corresponde a menos del 1% de los datos). De todas formas en la Tabla 89 se calcularán los principales ratios de esta relación de la parte con el total (la descripción de los parámetros se ha visto al inicio de este capítulo). Los ratios mejorarán a la vez que se produzcan más experiencias y se haga mayor el historio, pero los ratios obtenidos pueden considerarse buenos y corroboran el modelo.

Principal	Sec	Reducción de Varianza	%	Varianza de las creencias
V03	V03	60,400	100	0.5816659
	V05	17,420	89.3	0.1427716
	V07	8,793	87	0.1333534
	V09	7,087	14.9	0.0204472
	V13	6,769	4.42	0.0036746
V09	V09	6,638	100	0.7953205
	V13	6.27	28.8	0.0192070
	V03	5.60	14.6	0.0086754
	V05	5.45	11.7	0.0018797
	V07	0.94	11.2	0.0016282
V13	V17	0.28	11	0.0016195
	V13	45,850	100	0.7943173
	V09	14,140	30.8	0.0524781
	V03	2,022	4.41	0.0029539
	V05	1,854	4.04	0.0011649
V17	V17	1,838	4.01	0.0010703
	V07	1,803	3.93	0.0010720
	V17	1,786	100	0.7906649
	V09	222.10	12.4	0.0120153
	V13	72.37	4.05	0.0021490

Tabla 88. Sensibilidad a otras variables de los principales nodos

Nodo	Ratio de Error	Pérdida logarítmica	Pérdida Cuadrática	Compensación Esférica
V03-Caudal Material	35.46%	1.174	0.5051	0.6771
V13-Temp Material (test1)	29.78%	1.879	0.7737	0.4388
V13-Temp Material (test2)	39.56%	2.186	0.8667	0.3583
V17-Caudal de Gas	29.89%	2.254	0.888	0.3347
V31-Caudal emisiones	49.65%	1.986	0.8327	0.4146

Tabla 89. Ratios de algunas variables de la RB expuestas a test de nuevas muestras de datos

4 ANÁLISIS DE APLICACIONES

En éste capítulo se aportarán algunas de las contribuciones de aplicación de ésta tesis al proceso de calcinación de anhídrita que se detallarán en las siguientes líneas.

La tarea principal del operador de planta es la de controlar de forma continua el funcionamiento de los equipos a su cargo, en cuanto a los flujos de entrada y salida de todos los elementos de proceso. A la vez normalmente debe realizar comprobaciones muestrales de control de calidad de los productos terminados, así como engrases y mantenimientos de primer nivel en los equipos. Se añade que el operador debe tener capacidad y el control suficiente del proceso, como para poder observar anomalías ocasionales que se repitan en cualquier parte de la implantación para poder resolver si esta en su capacidad hacerlo y/o comunicar a los ingenieros de planta para que resuelvan problemas que a priori no paran por avería los equipos, pero que a la larga, éstas desviaciones, pueden producir cualquier tipo de problema que produzca una avería.

Se ha visto en los capítulos anteriores que el operario de calcinación dispone de herramientas para realizar el control del proceso y esta alerta preventiva y predictiva. Dispone de un entorno MES junto a el sistema Scada que le proporciona una visión privilegiada de todo el proceso, de forma parcial y total, lo que le permite corregir y ajustar las desviaciones. Por otro lado se ha implantado los lazos de control necesarios para que el sistema trabaje de una forma autónoma, tal como se ha desarrollado en el capítulo 3.7. La experiencia del operador será clave en todo este proceso, de forma que el grado de experiencia se ha incluido como variable en éste modelo del proceso mediante redes bayesianas detallado en el capítulo 3.8. Dicho modelo permitirá al operador obtener datos que no aparecen en el sistema de control tradicional y le permitirá intuir de forma sistemática, con la ayuda de la red de creencia elaborada, anomalías en el proceso global y en los subprocesos particulares.

Aún con todas las herramientas disponibles, en este apartado, se aplicará, como aportación novedosa, una nueva herramienta inteligente de control experto para el operador. Se usaran para este fin de nuevo las redes bayesianas, pero esta vez se modelará una red de decisión (en el capítulo 3.8, el modelo se desarrollo mediante una RB de creencia). Se usará la red bayesiana para evaluar el riesgo de que aparezca el efecto *windup* o *reset-windup*, problema habitual en los PID en su parte integral, como se describirá en este mismo capítulo.

Para evaluar este efecto se usaran las nuevas variables de proceso que se han creado al automatizar el mismo y se añadirá la variable de humedad como factor de riesgo para el efecto. Estas nuevas variables se añadirán a las variables que se han determinado como críticas de proceso, después de los análisis en los apartados 3.4 y 3.8 de esta tesis.

Como se ha visto, la implantación de un controlador de lazo cerrado PID al proceso de calcinación de la anhídrita, ha requerido mejorar el control de varios elementos de monitorización que se añaden a los elementos anteriores, esto ha generado unos datos más fiables que los anteriores, medidos de forma manual. El análisis de las nuevas variables obtenidas y el mejor ajuste de los datos respecto a los datos obtenidos por el primer proceso, antes de la implantación del modelo, también será el cometido de este capítulo.

4.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE REGULACIÓN APLICADO

4.1.1 Fiabilidad de los datos de control

La implantación del PID desarrollado en el capítulo 3.7 implica la necesidad de obtener una mejor y más eficiente monitorización de las variables implicadas en la calcinación de la anhidrita. En los capítulos 3.4 y 3.8 ya se analizaron dichas variables y se acordaron cuáles son las críticas del proceso. Lamentablemente la información en forma de datos recogida para dichas variables no era en todas igual de homogénea. En algunas de ellas se disponían de datos en continuo y para cada minuto de funcionamiento de los equipos, por lo que la trazabilidad era elevada. Otras variables reportaban datos cada dos horas, por lo que disminuía el grado de efectividad de su seguimiento. Existían multitud de tipologías más para el reporte: cada 4 horas, diarias, mensuales, discretas, recogidas a mano, por el sistema scada, mediante sondas digitales, etc. Con las modificaciones realizadas y una vez evaluadas las variables críticas, se uniformizan todas ellas a reporte continuo cada minuto y automático mediante software AEmes trabajando sobre el Scada. Esto da una gran fiabilidad de datos. Para ello se han realizado cambios en los equipos.

4.1.1.1 Instalación de un variador de frecuencia

Se realizó la instalación de un variador de frecuencia para el ventilador del horno. Con ello se fija la variable C_e como un parámetro de regulación clave. Como vimos en el capítulo de descripción y uso del horno, la regulación del caudal de aire expulsado a la atmosfera a través del filtro de manga, se realizaba mediante una clapeta manual, a diferentes grados de apertura (0% totalmente cerrado y 100% totalmente abierto). Esta apertura no era trazable ni reportable y se buscaban medidas indirectas para obtener el caudal de emisión. Instalando un variador de frecuencia se puede obtener una medida proporcional a la apertura actual a través de la velocidad de giro de dicho ventilador, mucho más precisa que la clapeta actual.

Ajuste del variador

El ajuste inicial del variador se realiza de la siguiente forma:

- Se pone el horno a régimen permanente con el sistema tradicional y la clapeta abierta a un porcentaje adecuado para el caudal de gas y de material actual.
- Se realiza la apertura de la clapeta al 100% y se conecta el funcionamiento del ventilador mediante el variador de frecuencia.
- Se regula el variador para que la temperatura de material y la temperatura de emisiones sean las deseadas.
- Se obtiene la proporción directa entre el porcentaje de apertura de la clapeta y la frecuencia del variador
- Para un nuevo proceso se mantiene siempre abierta la clapeta y se regula mediante variador exclusivamente.

Ahorro energético

El aporte del variador de frecuencia, a parte de ser de estabilidad y trazabilidad del proceso, valora muy positivamente un ahorro energético de electricidad y por tanto económico.

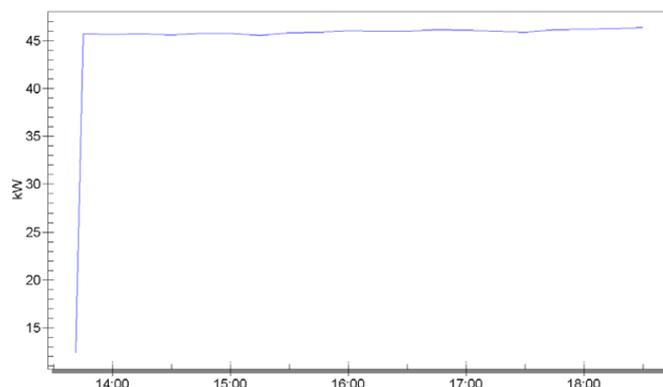


Figura 148. Medición de la potencia del ventilador sin variador

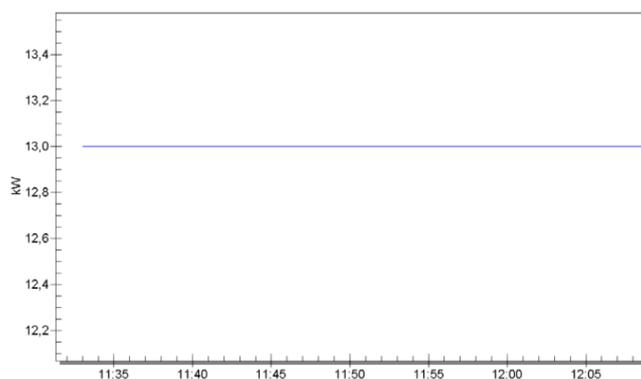


Figura 149. Medición de la potencia del ventilador con variador

En las Figura 148 y Figura 149 se puede apreciar las gráficas de potencia trabajando sin el variador de frecuencia (con clapeta) y mediante el variador. Se puede apreciar la diferencia de potencia realizada para obtener el mismo resultado. Se estima un 70% de reducción de consumo eléctrico con lo que se reducirá 193,844kWh al año. El periodo de retorno de la inversión del variador es de unos 6 meses (sin contar las posibles subvenciones), con lo que es una magnífica medida de optimización.

4.1.1.2 Instalación de pilotaje de la válvula de gas natural

Para la regulación de la entrada de gas natural al horno de anhídrita se realizaba una operación manual de apertura y cierre de la válvula, como se ha visto en el apartado del funcionamiento del quemador de gas. A diferentes grados de apertura (0% totalmente cerrado y 100% totalmente abierto), se conseguía el caudal de gas adecuado para la calcinación. Para que el controlador PID regule este caudal de gas es necesario realizar un pilotaje desde el sistema Scada, por lo que se ha procedido a instalar un potenciómetro para saber en cada momento la posición de apertura de la válvula y por otra parte un servocontrol que permite accionar esta apertura y cierre desde el controlador.

4.1.1.3 Medición continua de la temperatura de salida de gases

Para conocer la temperatura de salida de gases se disponía de un visor de lectura digital conectado a una sonda PT-100. Conocer esta temperatura es fundamental en dos aspectos clave:

- Para regular el sistema mediante PID
- Como seguridad para evitar daños por alta temperatura en las mangas del filtro de extracción de humos

Se ha procedido a cambiar el visor digital por un nuevo elemento de control con conexión directa al sistema Scada para su supervisión y monitorización

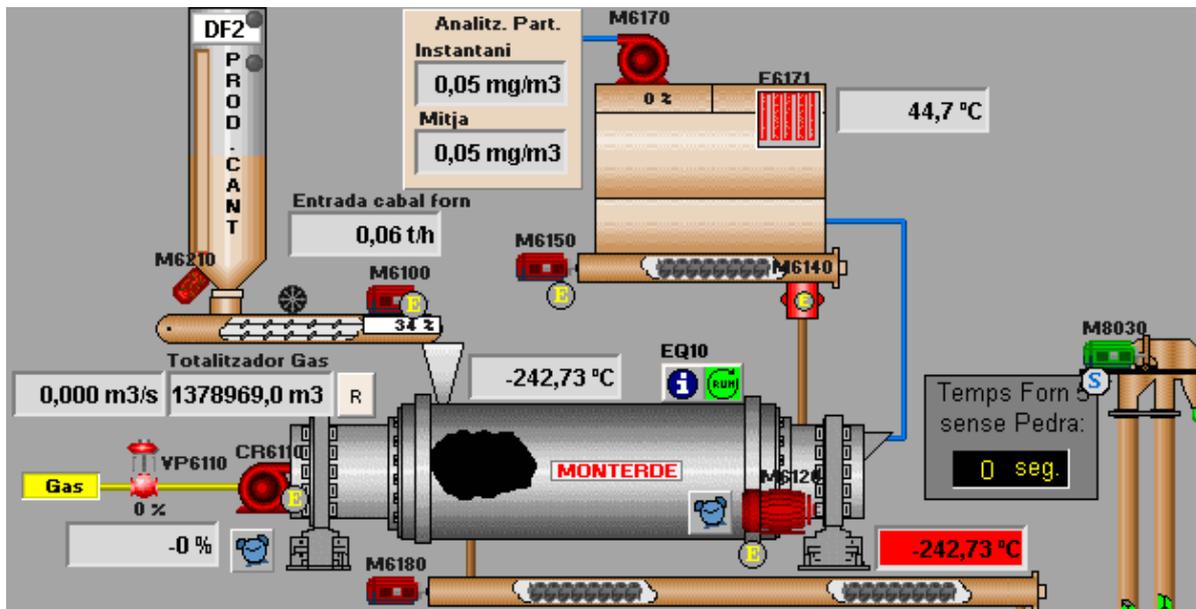


Figura 150. Nueva pantalla de control para el horno de calcinación

4.1.2 Mejora de las correlaciones entre variables

Una vez efectuadas las mejoras descritas en el apartado anterior, se detallaran las mejoras en la correlación de datos de las variables clave implicadas en el proceso. Se compararan las regresiones con los datos obtenidos en el apartado 3.4 con los nuevos datos obtenidos de la lectura en continuo de los parámetros de control. Se realizan las modificaciones en el Scada para que en pantalla aparezcan estas nuevas regulaciones, tal como se muestra en la Figura 150.

4.1.2.1 Variables críticas de proceso

En la Tabla 90 se muestran las variables actuales y las anteriormente consideradas. Como se puede apreciar en dicha tabla aparecen las nuevas variables descritas anteriormente y que servirán como actuación de señales para el controlador PID.

Parámetros de control	Código	Unidades	Tipo
Caudal Material Q_m	V03	Tm/h	Continua
Caudal Gas Natural Q_g	V17	m ³ /h	Continua
Caudal Emisiones Q_e	V31	Nm ³ /h	Continua
Temperatura Refractario T_r	V09	°C	Continua
Temperatura Material T_m	V13	°C	Continua
Temperatura Emisiones T_e	V85	°C	Continua
Frecuencia Variador Material C_m	V86	%	Continua
Apertura Válvula Gas C_g	V87	%	Continua
Frecuencia Variador Ventilador C_e	V88	%	Continua

Tabla 90. Nuevo conjunto de variables críticas de proceso

4.1.2.2 Nuevas correlaciones entre variables

El estudio de los datos obtenidos después de realizar las modificaciones pertinentes permite comprobar la mejora obtenida en cuanto a la obtención de datos. En las figuras (Figura 151, Figura 152, Figura 153 y Figura 154) se pueden observar los principales valores estadísticos de las nuevas variables empleadas. Se han empleado dichas variables y no otras para analizar sus correlaciones, al considerarse éstas las críticas del sistema, es decir, las que se emplearán para la automatización del mismo.

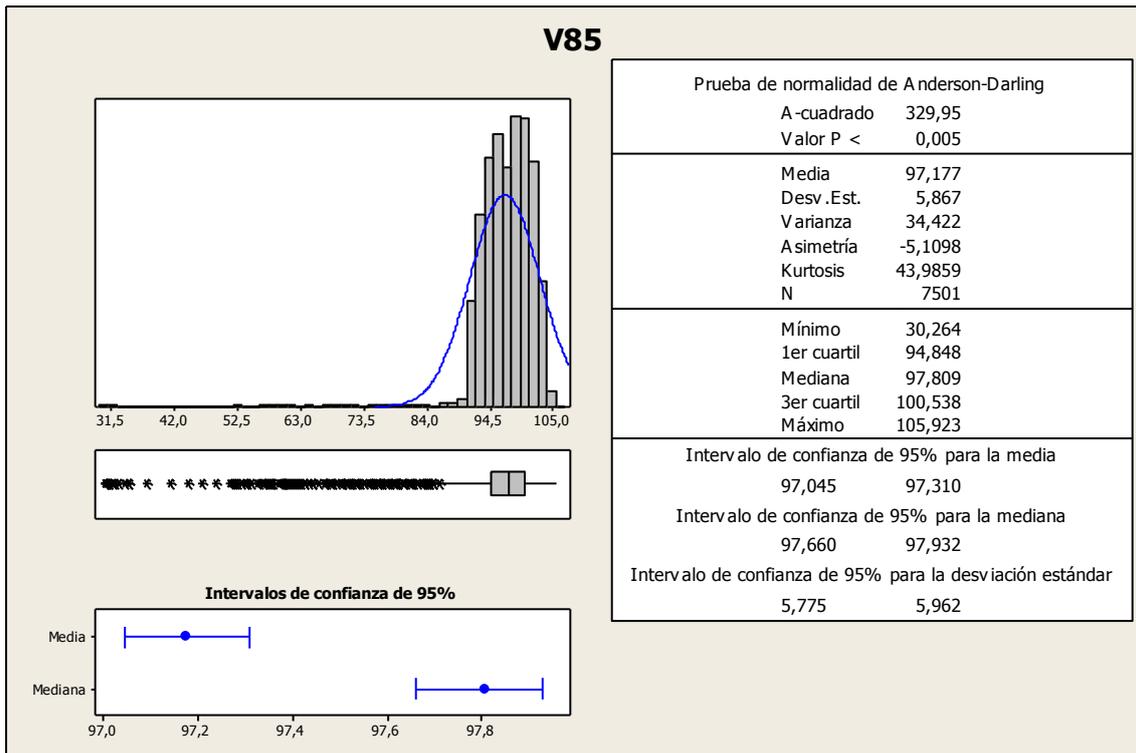


Figura 151. Estadísticas de la variable V85

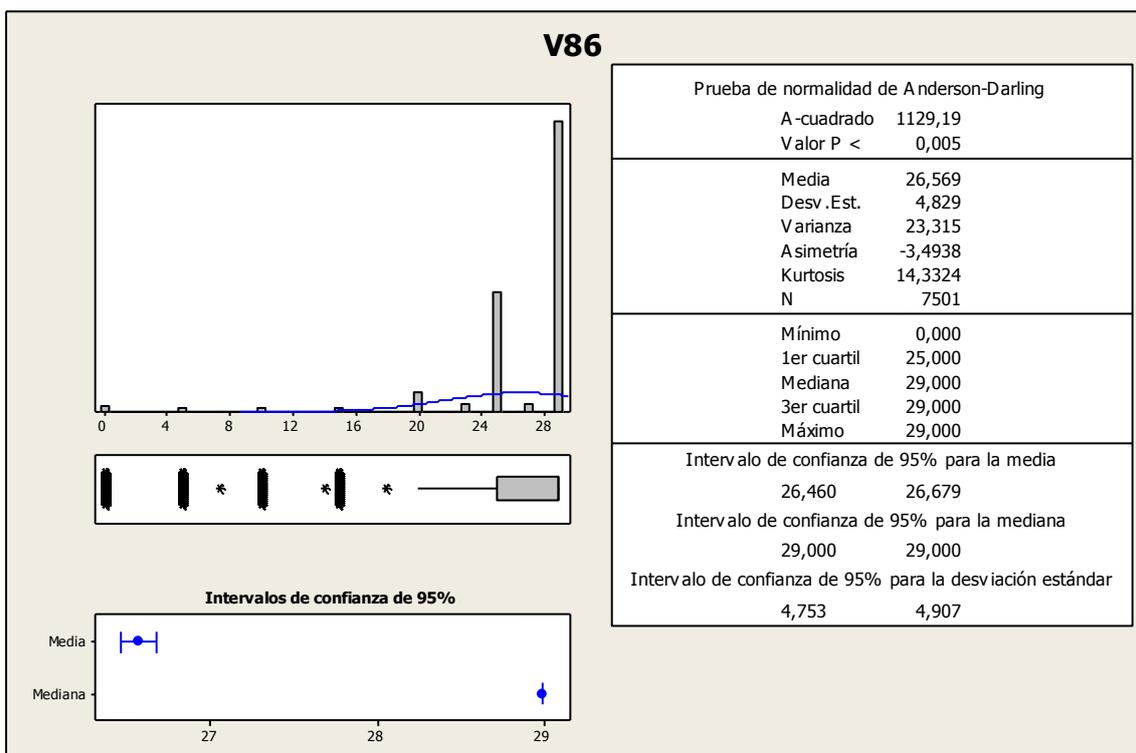


Figura 152. Estadísticas de la variable V86

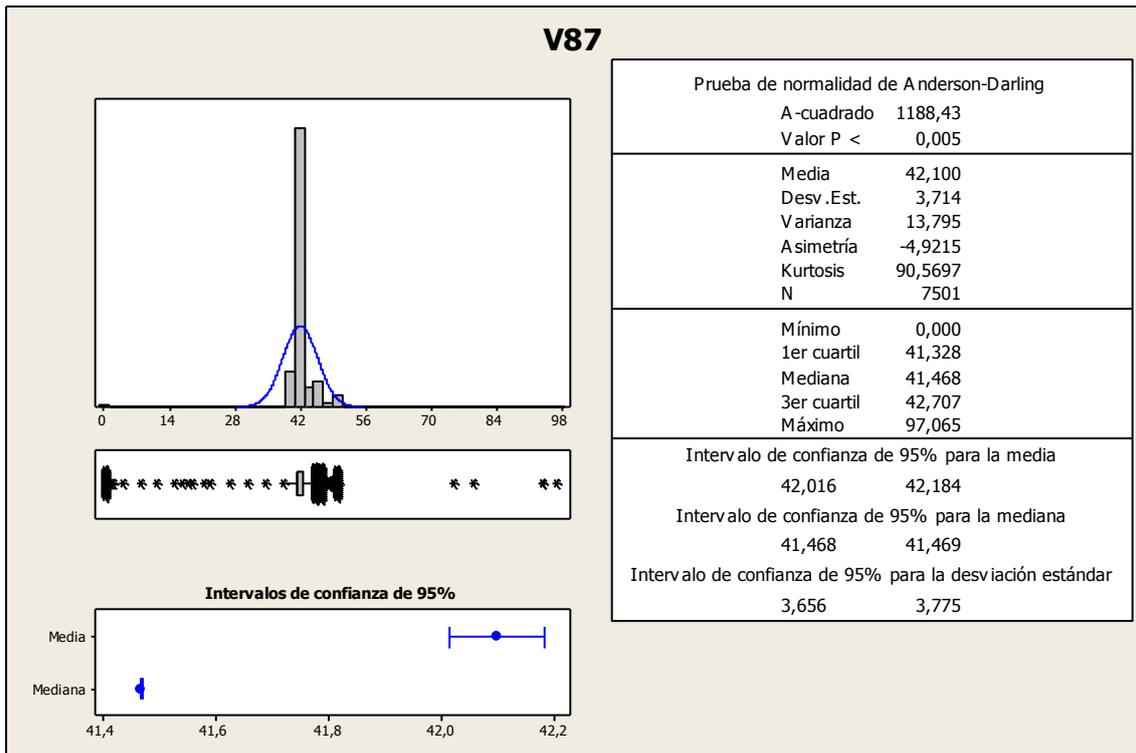


Figura 153. Estadísticas de la variable V87

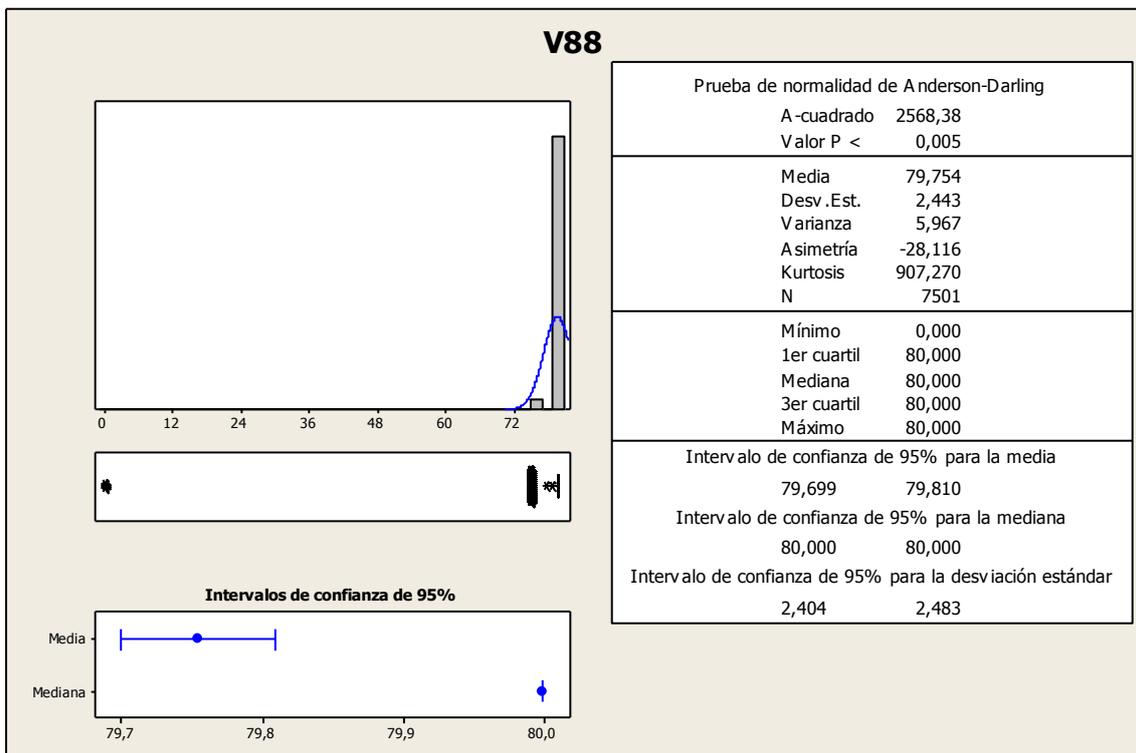


Figura 154. Estadísticas de la variable V88

A la vez se procederá a analizar en las figuras (Figura 155, Figura 156, Figura 157, Figura 158, Figura 159 y Figura 160) la correlación entre las principales variables del proceso (V13 o temperatura del material, como consigna con el resto de variables). En la Tabla 91 se compara la bondad de la correlación mediante el coeficiente R-cuad.

	V13	V86	V87
V86	0,865		
V87	0,974	0,838	
V88	0,850	0,970	0,894

Tabla 91. Coeficiente de correlación entre las nuevas variables con el caudal de material

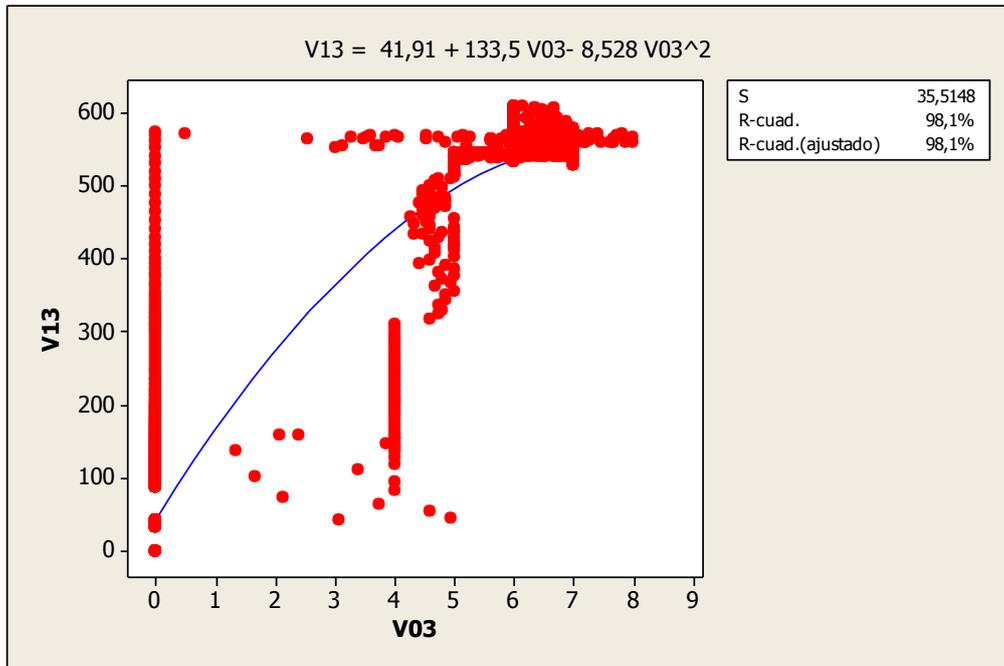


Figura 155. Regresión entre las variables V13 y V03

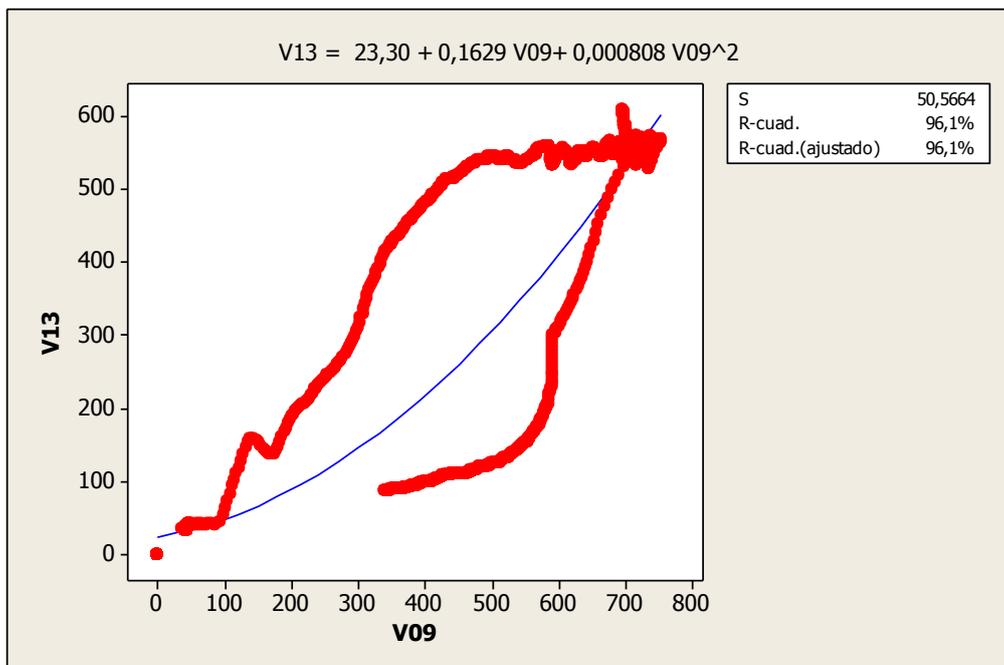


Figura 156. Regresión entre las variables V13 y V09

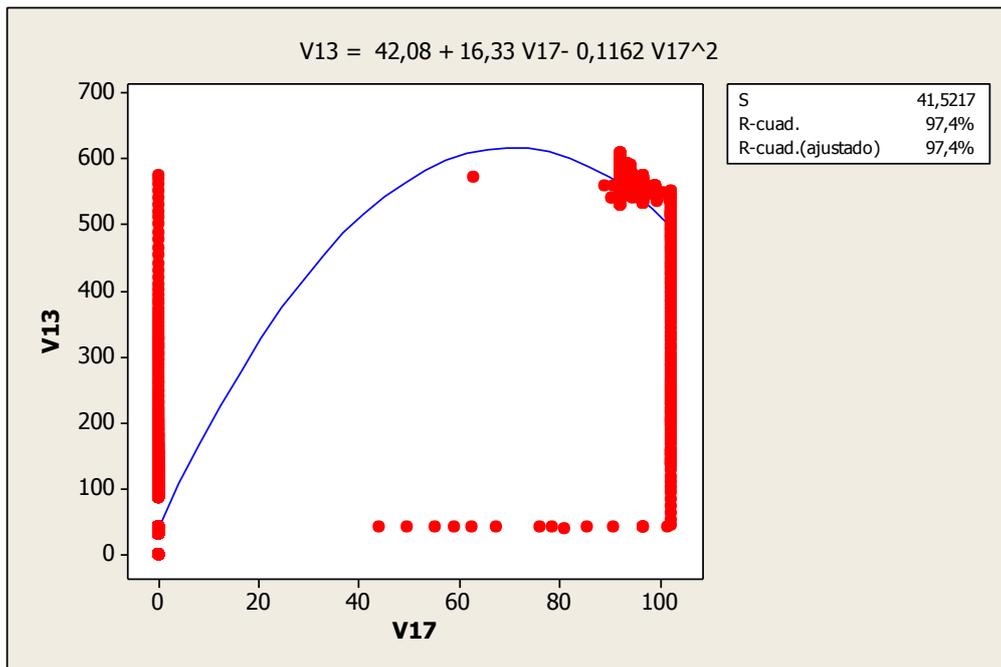


Figura 157. Regresión entre las variables V13 y V17

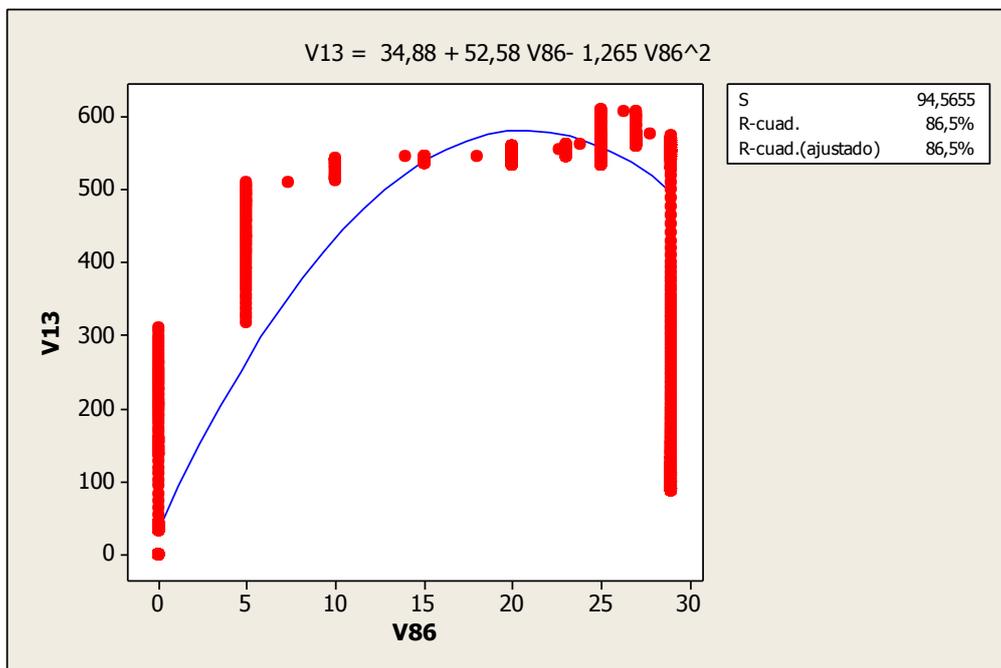


Figura 158. Regresión entre las variables V13 y V86

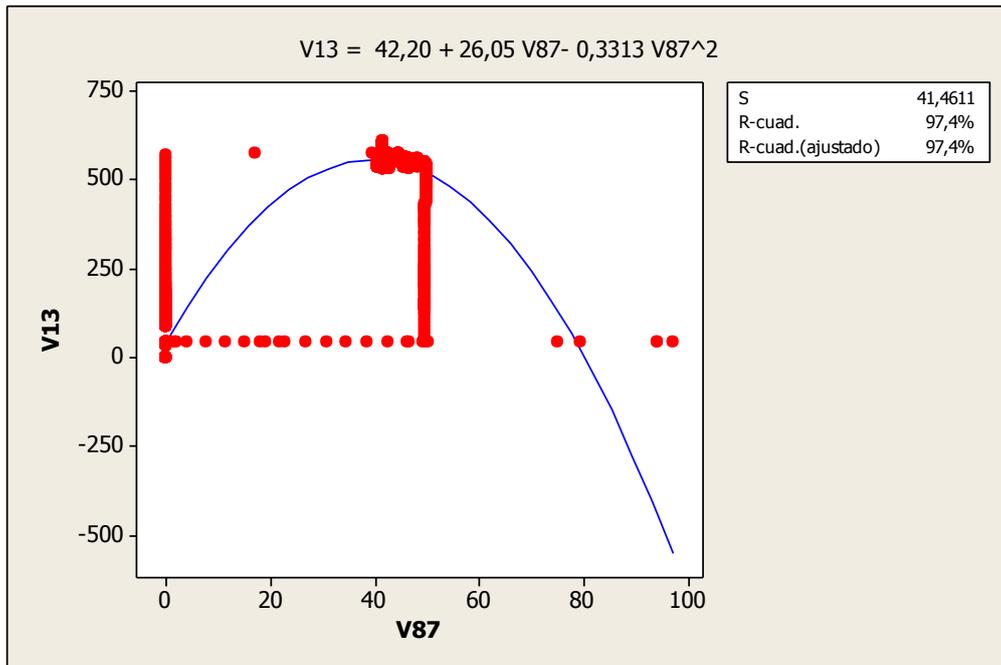


Figura 159. Regresión entre las variables V13 y V87

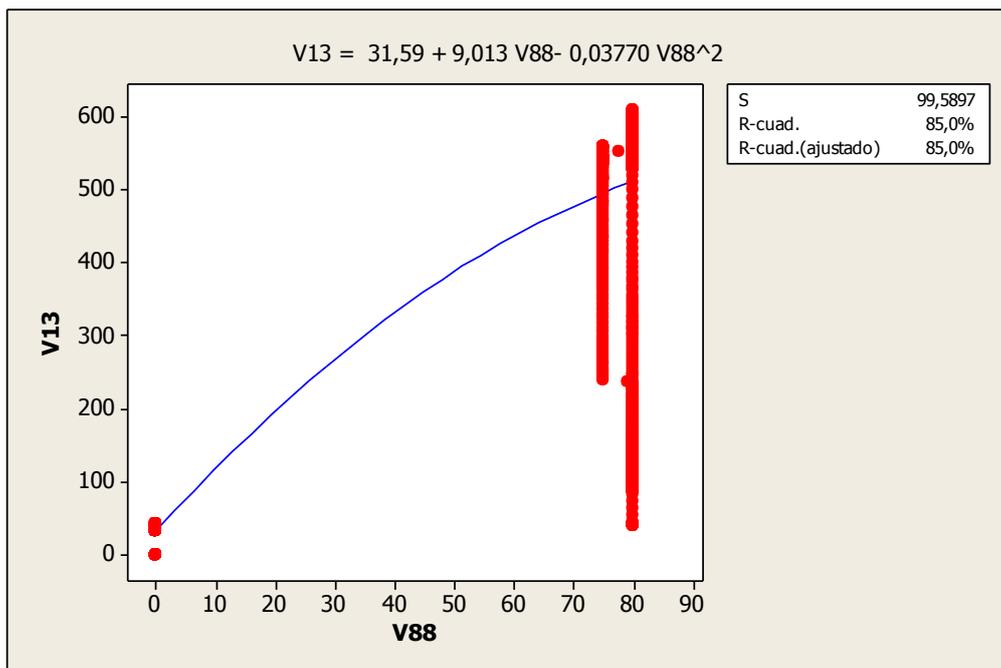


Figura 160. Regresión entre las variables V13 y V88

Se puede evaluar la ecuación de regresión entre la variable de consigna y las de control del proceso con la siguiente expresión:

$$V13 = 31,3 + 10,3 V86 + 10,3 V87 - 2,39 V88$$

Para dicha expresión R-cuad. será de 98,4%.

En la Figura 161 y Figura 162 se puede observar la absoluta correlación para el consumo de gas (caudal de gas o V17) con el caudal de material (V03) y la apertura de la válvula de gas (V86). Esto permite dar por buena la relación actual entre dichos parámetros y comprobar la certeza de los cálculos que se realizarán a continuación.

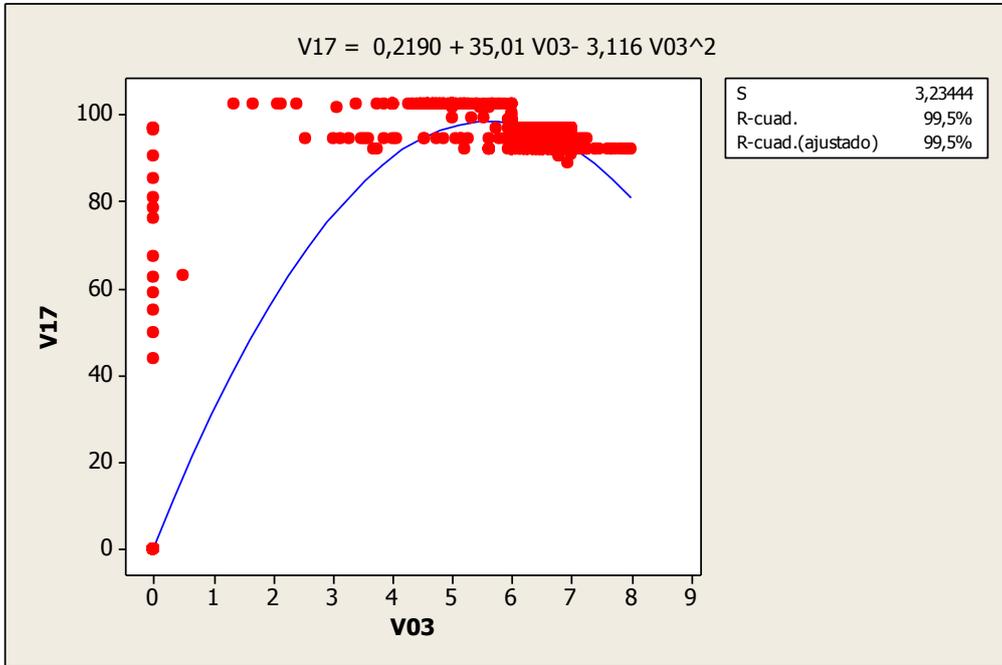


Figura 161. Regresión entre las variables V17 y V03

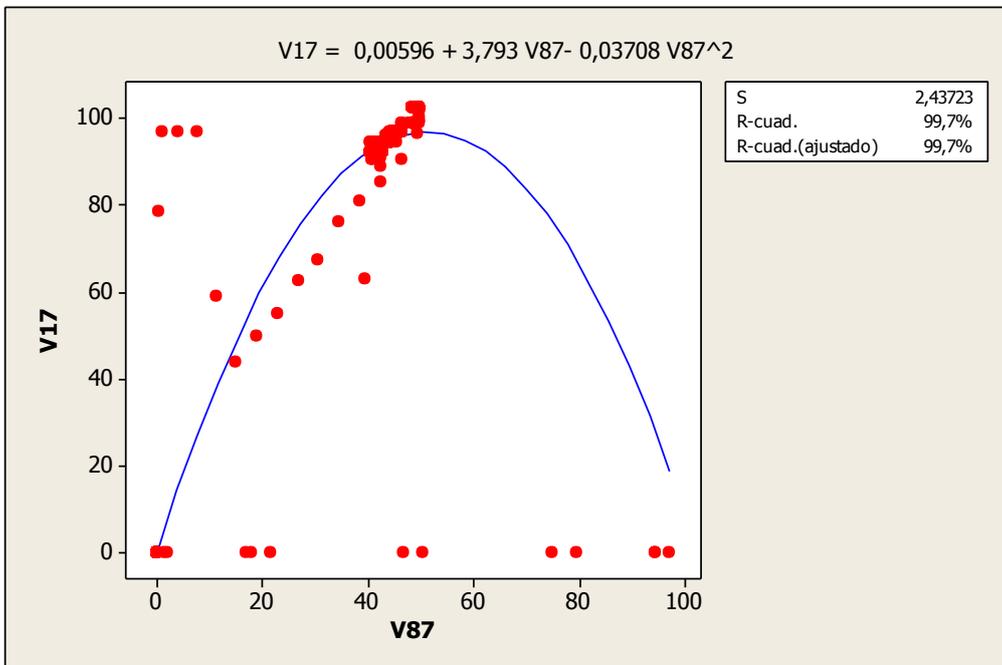


Figura 162. Regresión entre las variables V17 y V87

4.1.2.3 Evaluación de la mejora

Un mejor control de las variables que intervienen en el proceso siempre permitirá ajustar mejor los ajustes de dicho proceso. Por tanto, las mejoras introducidas en el control y las lecturas permitirán mejorar la precisión en la operación de calcinación de anhidrita.

Se ha visto en el apartado 3.3 que la introducción del variador de frecuencia para la gestión de las emisiones a la atmosfera permite un ahorro del 51% del consumo energético en cuanto a electricidad del horno en cuestión.

Por otro lado, se evaluará a continuación la mejora en consumo energético, en cuanto a gas natural se refiere, una vez introducidas las medidas referidas. Se puede evaluar como el consumo específico de gas natural la siguiente expresión:

$$\text{Consumo específico de GN} = \frac{\text{Caudal de GN}}{\text{Caudal de Mineral}}$$

Dónde el resultado se expresará en m³/Tm

En la Figura 163 y Figura 164 se pueden comparar las estadísticas de consumo específico de gas natural en la situación anterior (a las modificaciones) y la siguiente (una vez realizadas).

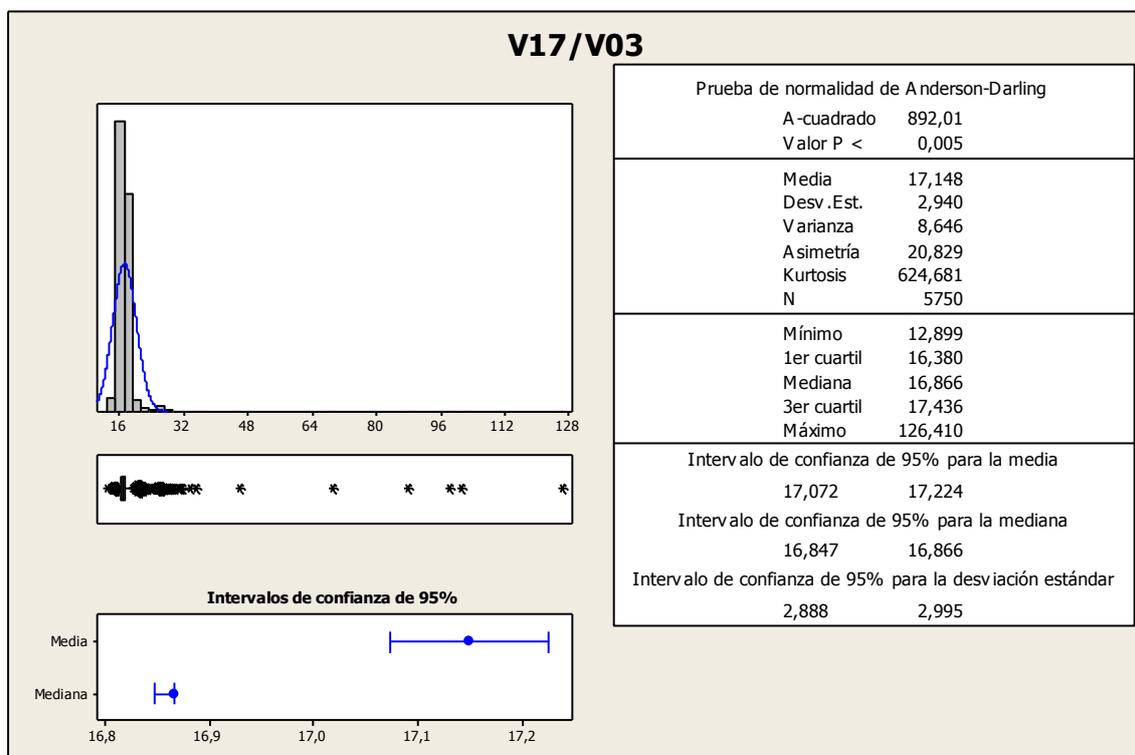


Figura 163. Consumo específico de gas natural antes de realizar las modificaciones en el proceso

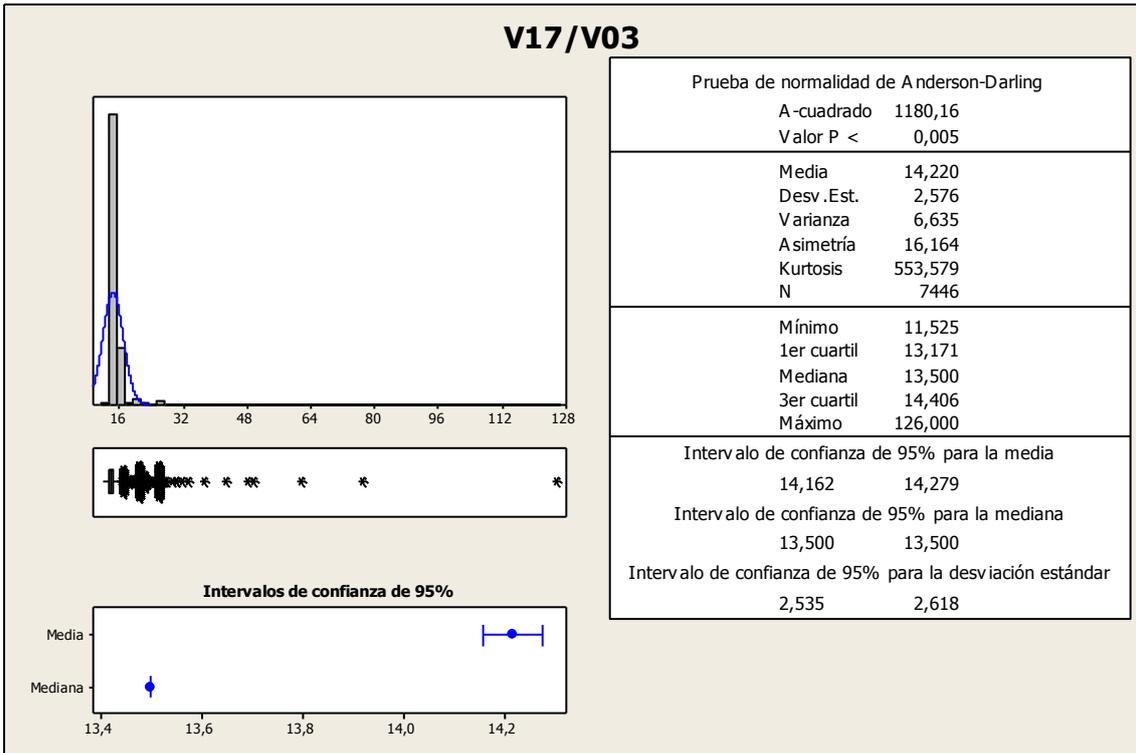


Figura 164. Consumo específico de gas natural después de realizar las modificaciones en el proceso

Se llega pues a la conclusión que el ahorro energético de gas natural producido por las modificaciones en el proceso será debido a un mejor ajuste manual del mismo, mejorando el control de la apertura de la válvula de gas y optimizándolo siempre a la temperatura consigna deseada, consiguiendo un ahorro de un 17% en el consumo. Estos ajustes mejorados se pueden apreciar en las curvas de la Figura 165, Figura 166 y Figura 167.

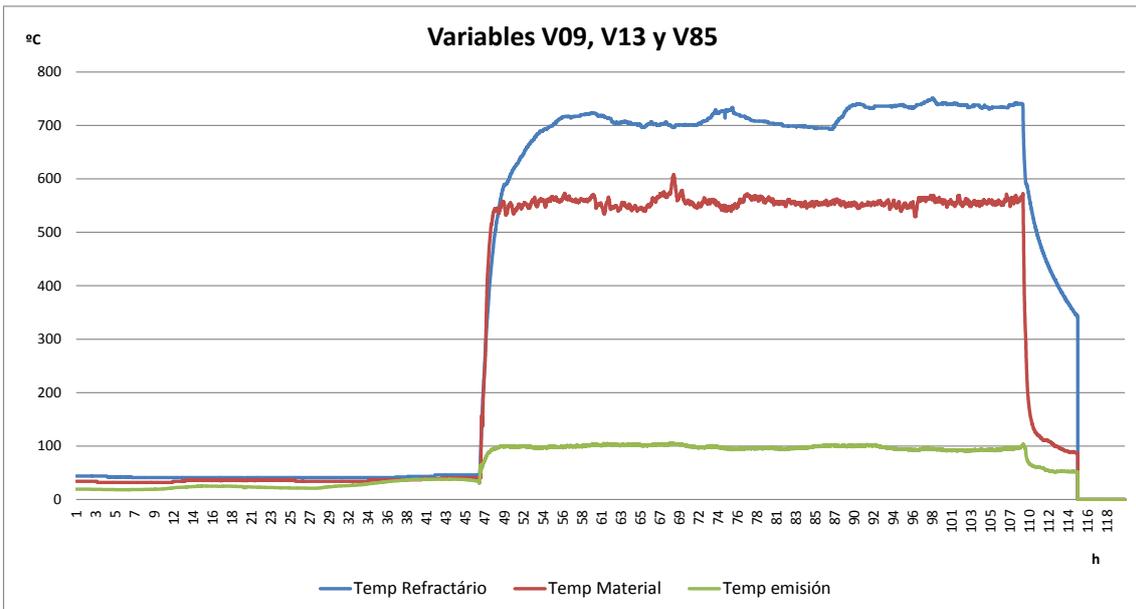


Figura 165. Gráfica de las temperaturas de control del proceso

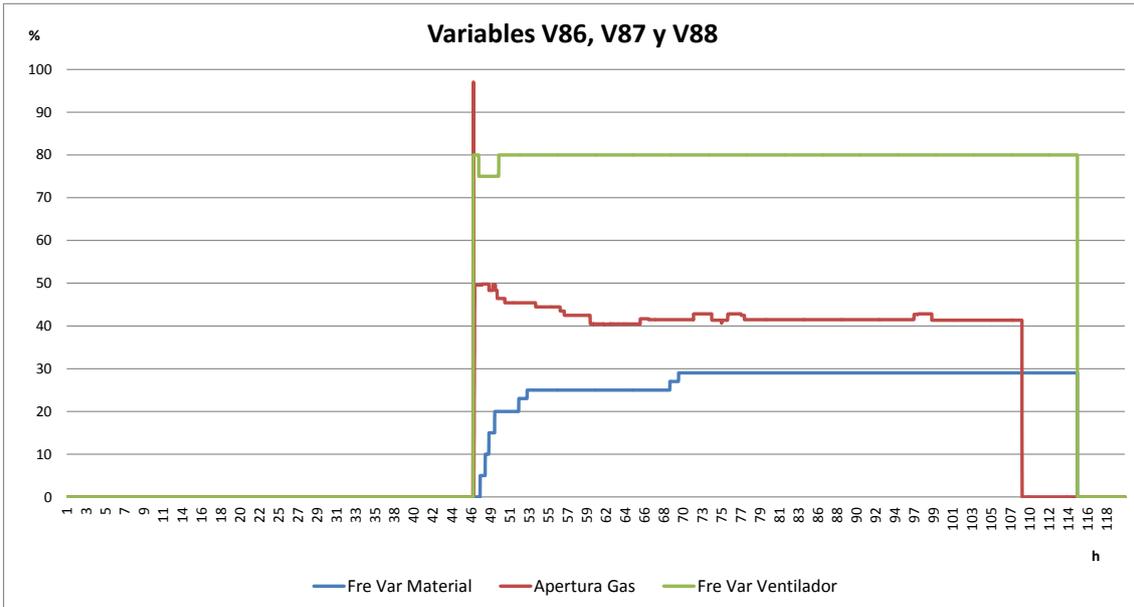


Figura 166. Gráfica de las consignas de control del proceso

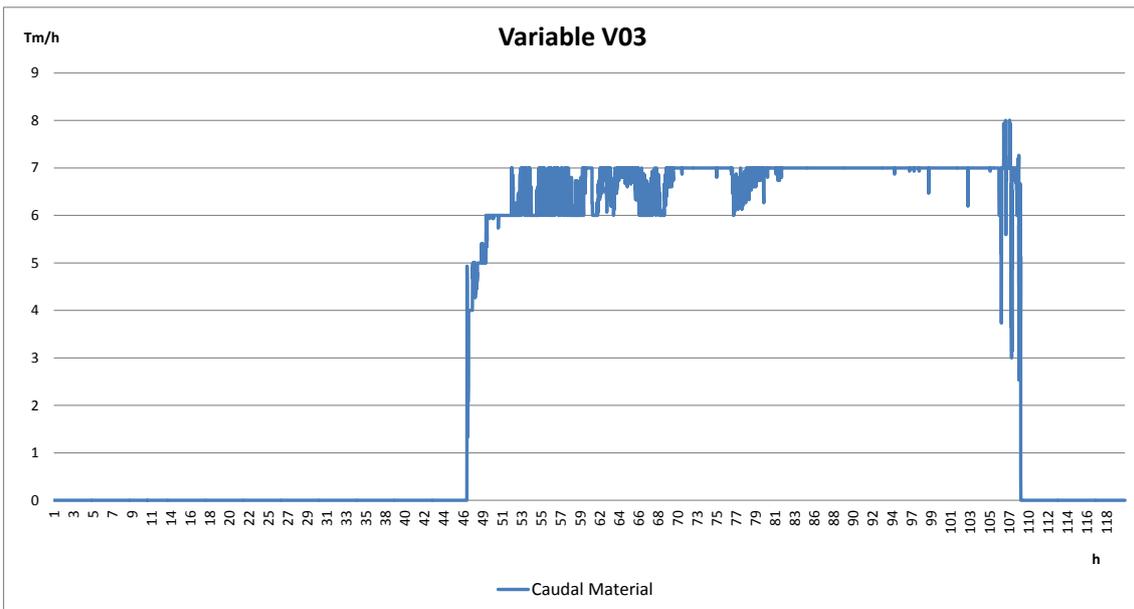


Figura 167. Gráfica de la variable V03 (caudal de material)

Como siguiente paso se automatizará el proceso mediante los controladores PID descritos en los capítulos precedentes. Se estima según los tests realizados y las simulaciones, una mejor gestión energética de la calcinación. Se aumentará el caudal de emisiones un 10%, conservando los valores actuales de consumo de gas natural, y por ende, el caudal de material de entrada se aumentará dicho 10%.

La nueva variable generada V88' se evalúa en la Figura 168. La Figura 169 muestra el nuevo caudal de material obtenido V03'. Con ello, el nuevo consumo específico de gas natural (Figura 170) significará una nueva reducción del 9% del consumo de gas natural, el cuál acumulado al primer ahorro, sumará un 26% de reducción de consumo respecto al proceso original.

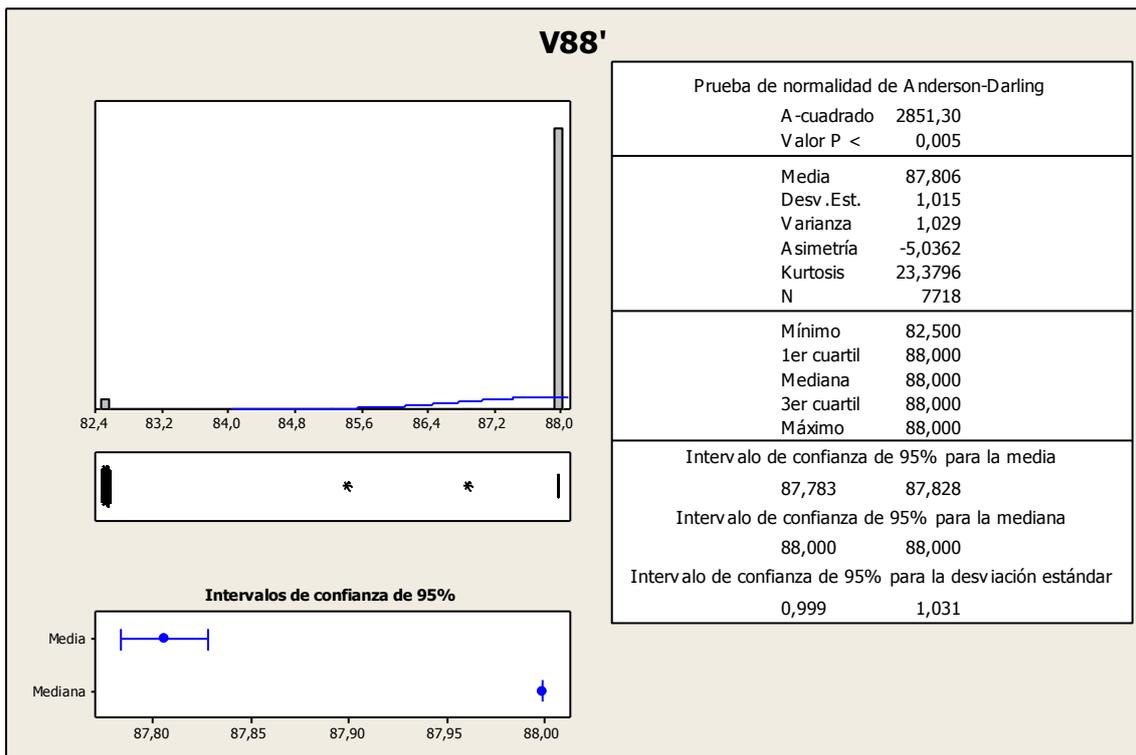


Figura 168. Estadística de la nueva variable relativa a la frecuencia del ventilador de extracción de gases

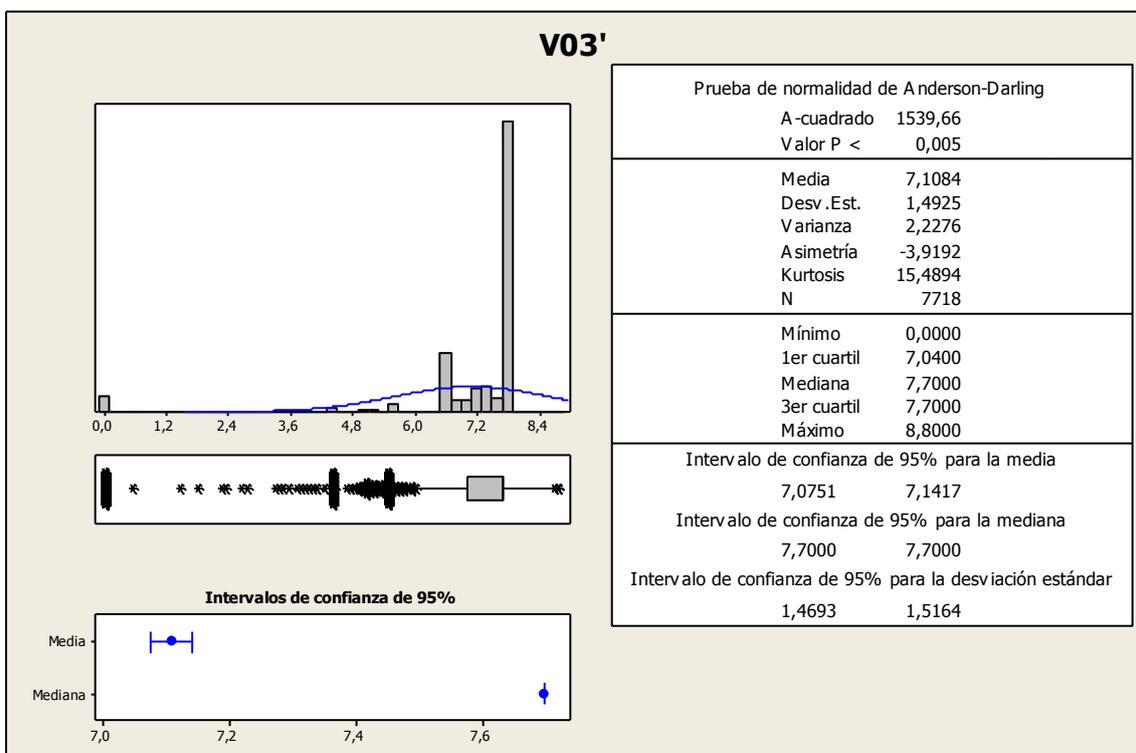


Figura 169. Estadística de la nueva variable relativa al caudal de material

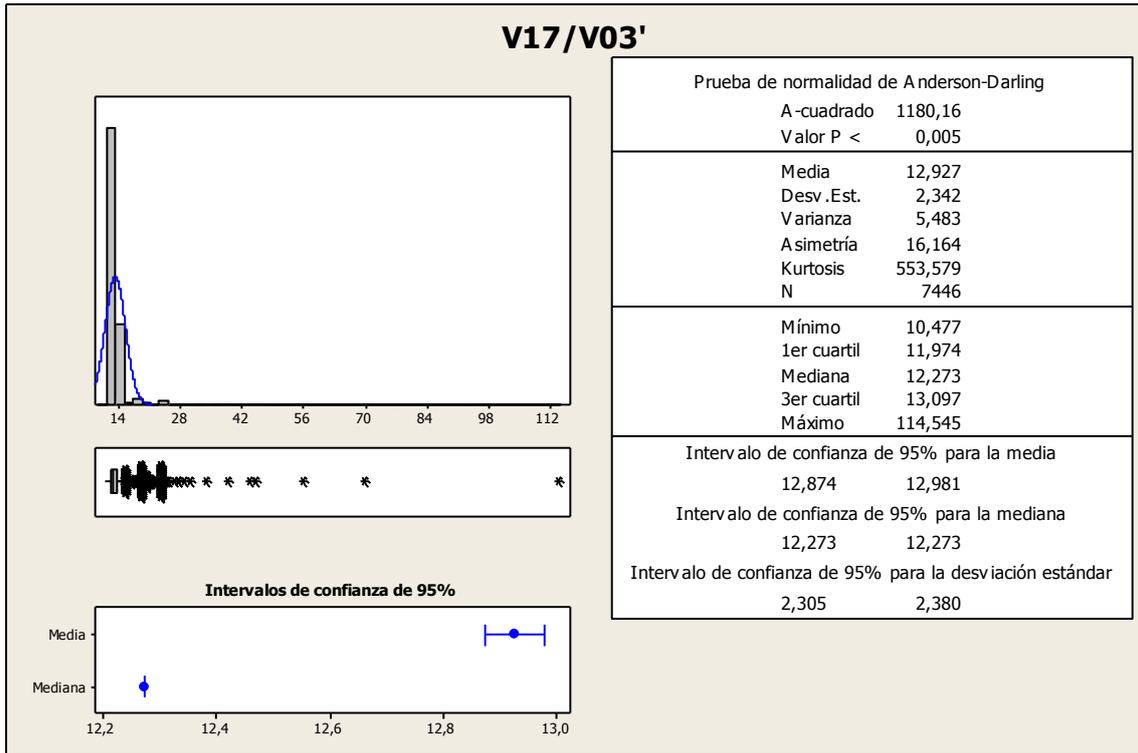


Figura 170. Nuevo consumo específico de gas natural

4.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL MEDIANTE RB

Como se ha visto en la introducción de este capítulo, la aportación de herramientas de supervisión al operador de planta será un elemento fundamental para evitar desviaciones y anomalías en el proceso. En este caso se aportará una herramienta que analizará el riesgo de que se produzca el efecto windup en el controlador PID.

4.2.1 El efecto windup

Todo controlador o elemento accionador real presenta una región de saturación, que sumada al efecto de la parte integradora del PID, puede producir un efecto llamado windup o reset-windup. El efecto windup puede causar fuertes sobrepicos en la respuesta del sistema y puede llegar a saturar el controlador.

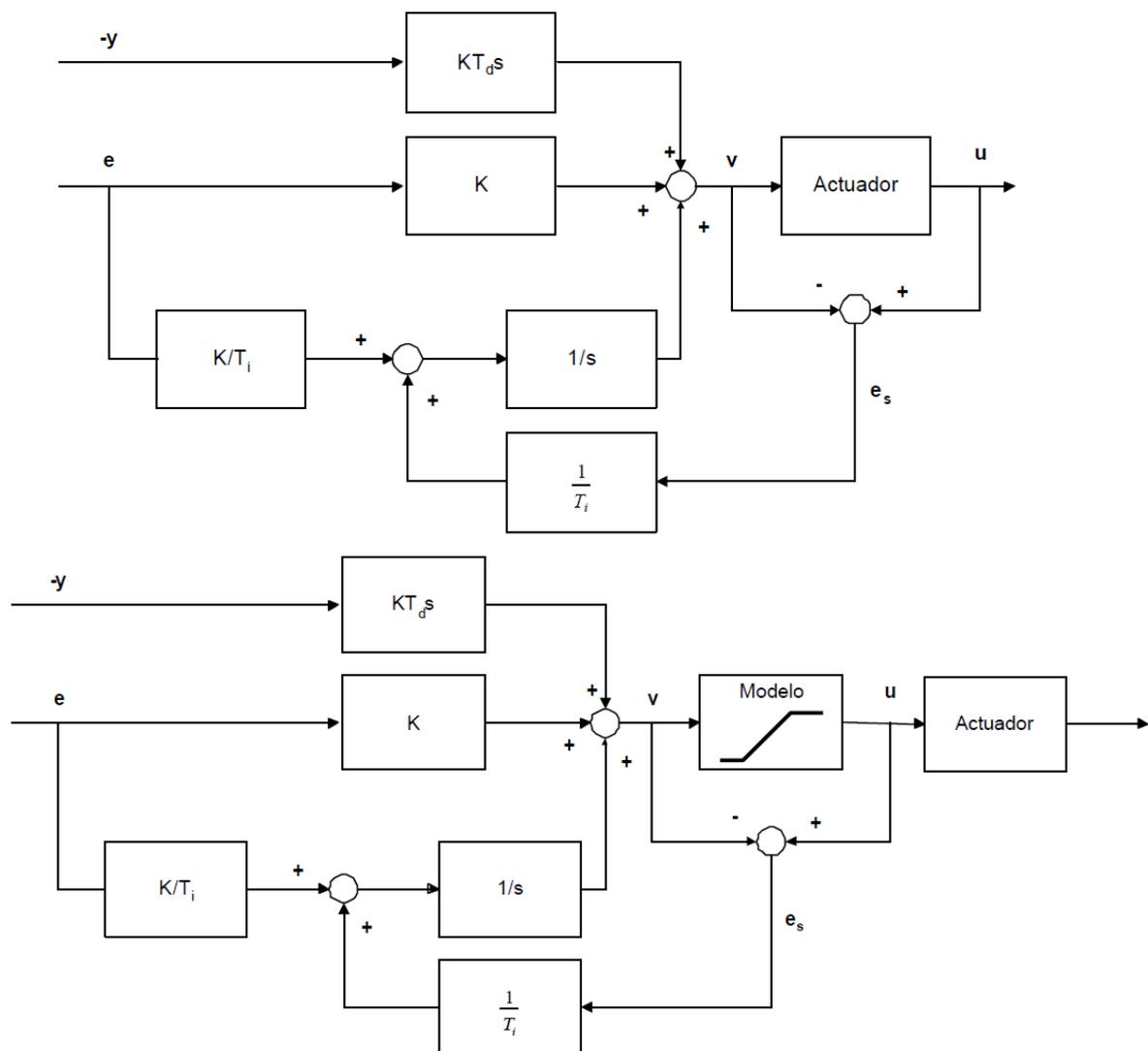


Figura 171. Esquema de una implantación anti-windup

Este efecto se puede producir ante cambios importantes de la señal de referencia o perturbaciones de gran amplitud. En esta aplicación se ha desarrollado un controlador

PI. Suponiendo que se produce una respuesta de error muy importante, es decir, producida por una excitación o un valor importante, el controlador *PI* se satura inmediatamente debido a la función proporcional *P*. La acción integral *I* no dará una respuesta inmediata, pero paulatinamente va integrando el error. Esta integración puede provocar, que debido a su amplitud y duración, el valor integrado adquiera una magnitud muy grande que impida que el controlador entre en saturación, aunque el error en estos momentos haya vuelto a un rango normal de funcionamiento. Esto, a la vez, puede producir fuertes sobrepicos en la respuesta del sistema.

El efecto es más común en sistemas con retardo puro, ya que en el tiempo en que se aplica la excitación y el momento en que el proceso reacciona, la acción integral puede alcanzar un valor importante.

Existen varias estrategias para evitar dicho efecto. Las más comunes son:

- Limitar el termino integral en un rango determinado
- Cortar la acción integral durante su saturación

La Figura 171 muestra un esquema de aplicación anti-windup.

El controlador programado con el bloque COMP_PID tiene mecanismos anti-windup. Estos mecanismos pueden corregir la componente *I* manteniéndola dentro de unos márgenes parametrizables de control, restando la acción *P* de la acción total resultante. Así, el valor de la acción integral nunca llega al 100^a de la acción total de salida, la cual se va reduciendo conforme se reduce el error de medida. También es posible limitar el valor de la acción integral por debajo de los límites de los valores de salida.

Aun así, puede darse el caso (proceso de arranque muy largo, variaciones muy grandes de la carga, etc.) en que la acción integral llegue a saturar la acción de salida. En estos casos, es posible, por medios externos, vigilar la evolución de la salida de control respecto del error para así poder determinar este punto y resetear la acción.

Respecto al proceso de arranque, que es extremadamente largo por la importante inercia térmica del conjunto del horno más la cantidad de material que supuestamente se acumula en esta fase inicial, posiblemente, después de analizar más adecuadamente el proceso se vea más conveniente el establecimiento de una rampa de calentamiento y carga de material automático, a fin de llevar el conjunto a régimen en el periodo de tiempo más corto posible y sin sobrepasar los límites de seguridad establecidos. Se pueden utilizar métodos externos para controlar la evolución y finalización de esta fase de arranque. En este capítulo, se implantará una herramienta adicional de control de este efecto indeseado.

4.2.2 Variables implicadas

Como se ha visto en el punto anterior, una vez implantados los nuevos elementos de actuación y de monitorización en los diferentes niveles del sistema, se obtiene un nuevo conjunto de variables críticas para el proceso, que son las que se usarán para desarrollar las RB de decisión para monitorizar el efecto windup. La lista definitiva de variables se encuentra en la Tabla 92.

Proceso	Parámetros de control	Código	Unidades	Tipo
Monitorización	Caudal Material Q_m	V03	Tm/h	Continua
	Caudal Gas Natural Q_g	V17	M ³ /h	Continua
	Temperatura Material T_m	V13	°C	Continua
	Temperatura Refractario T_r	V09	°C	Continua
	Temperatura Emisiones T_e	V85	°C	Continua
	Emisiones Q_e	V31	Nm ³ /h	Continua
	Humedad Relativa H_r	V79	%	Discreta
Actuación	Frecuencia Variador Material C_m	V86	Hz	Continua
	Apertura Válvula Gas C_g	V87	%	Continua
	Frecuencia Variador Ventilador C_e	V88	Hz	Continua

Tabla 92. Variables de proceso para la evaluación del efecto windup

4.2.3 Programación de una RB de evaluación de windup

La red bayesiana programada en la sección 3.8 es una red de probabilidad o de creencia. Evalúa las probabilidades de cada nodo y las condiciona con cada nodo padre e hijo. Para la aplicación de la evaluación del efecto windup en el controlador PID se usará otro tipo de RB, las redes de decisión. En este tipo de redes se aplicarán los *nodos de utilidad*, donde estará el ajuste o la bondad de los valores a evaluar y los *nodos de decisión*, que darán la respuesta a la pregunta planteada. Estos nodos no representan valores naturales, sino los objetivos, deseos o agendas. Este tipo de nodos contrasta con los *nodos naturales* que son los usados en la sección 3.8, que tenía que ver con la descripción de estados *naturales* o reales de cada variable.

4.2.3.1 Aplicación de la RB de decisión

Para aplicar nodos de utilidad se asignará a cada estado posible dependiendo de sus padres, una puntuación, en la unidad que se quiera, que indicará como se valora cada uno de dichos estados y qué importancia se le dé. Este tipo de nodos combinarán, por tanto, un componente científico (que probabilidades hay de que pase algo) y un componente cualitativo (como ese algo afectará al proceso). Existen varias técnicas y algoritmos para cuantificar los valores subjetivos que precisan los nodos de decisión. Se usará el algoritmo que proporciona el software Netica. Este programa permite la programación de la RB mediante un API que permite conectarlo con diversos sistemas. Se usará AEmes como interface de comunicación.

En la Figura 172 se puede ver la RB de decisión propuesta.

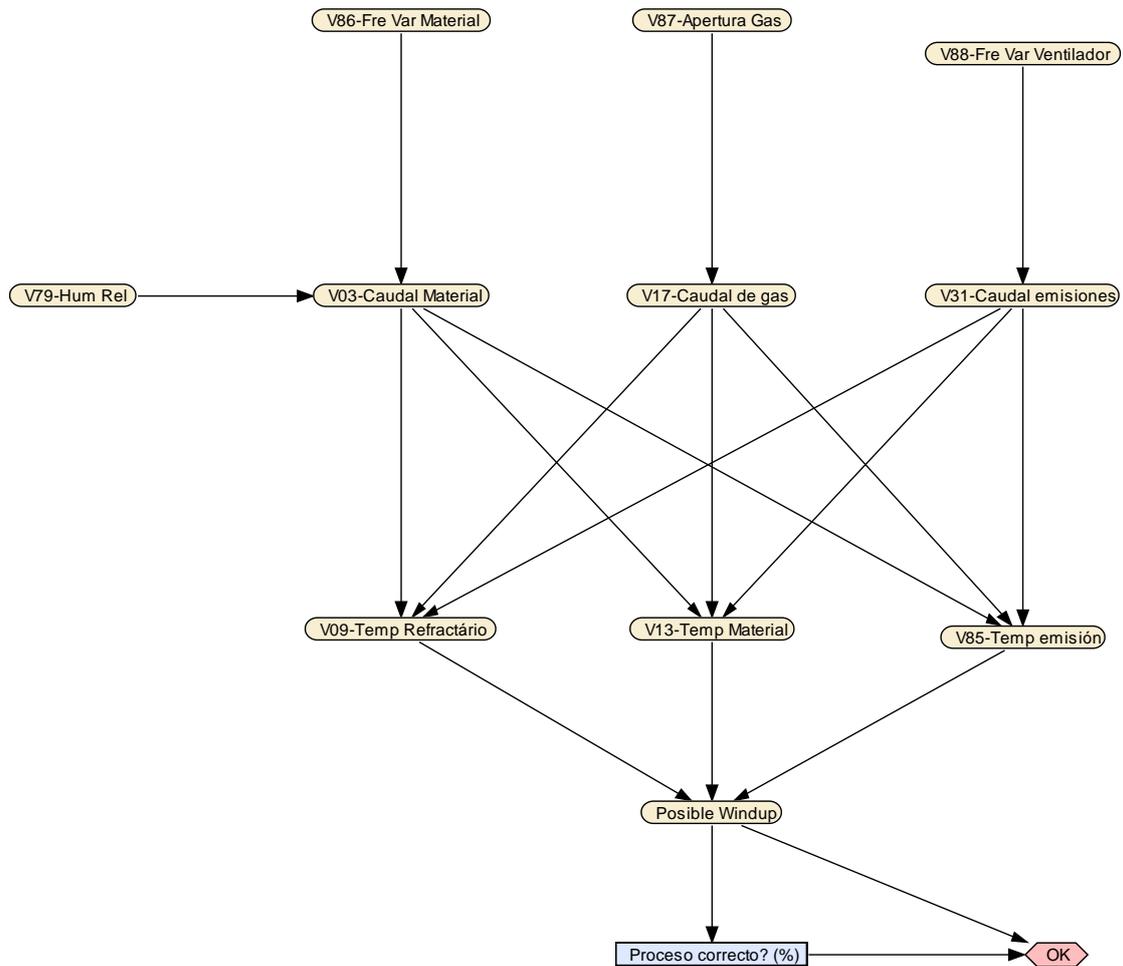


Figura 172. Red bayesiana de decisión para el efecto windup

4.2.3.2 Programación y resultados de la RB de decisión

A partir de las variables críticas de proceso, añadiendo la humedad relativa y todos los datos obtenidos experimentalmente, se compilará la red bayesiana de la Figura 173. Dicha red permitirá conocer el porcentaje de riesgo de que se produzca el efecto windup en los controladores instalados, lo que sin duda, será una herramienta muy útil para el operador local.

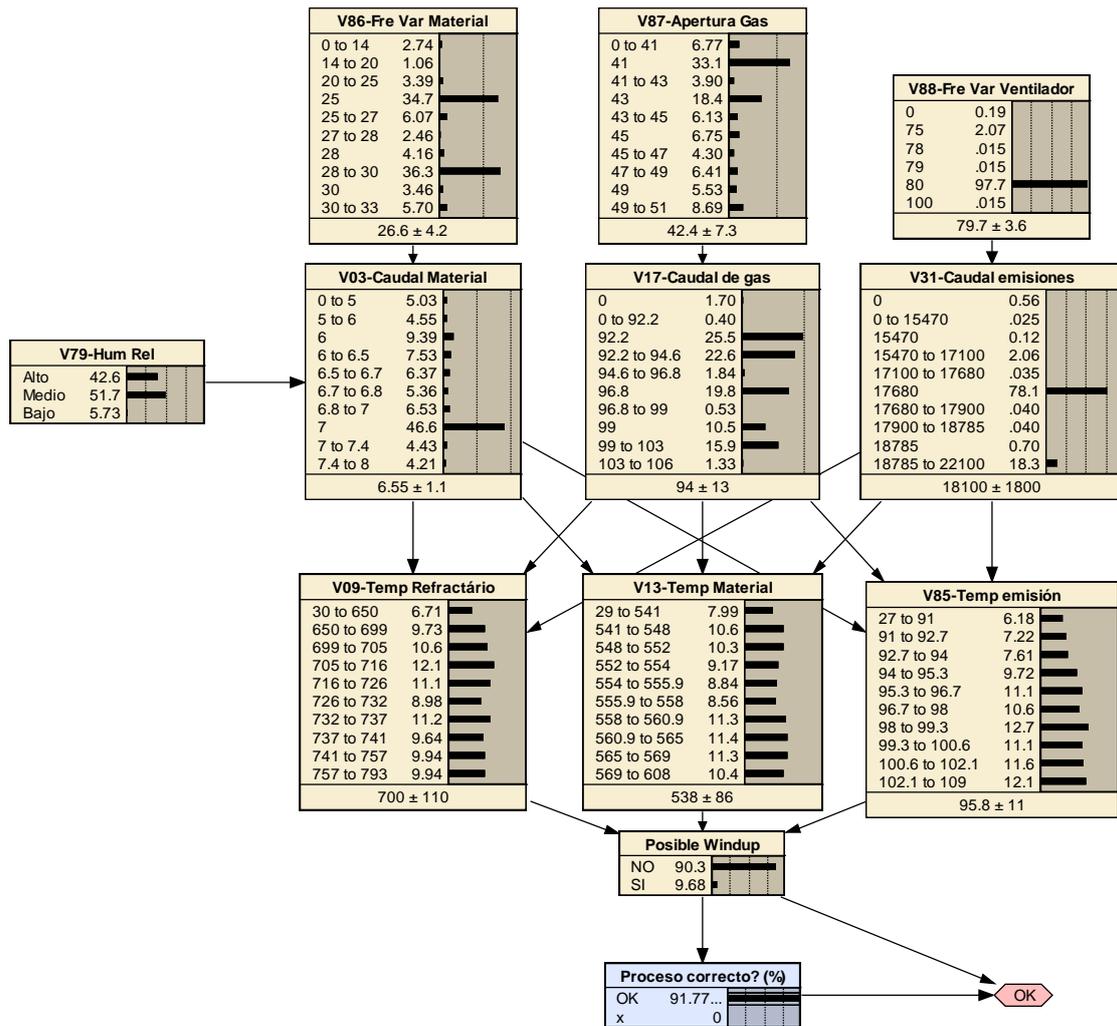


Figura 173. Compilación de la Red bayesiana para evaluar el efecto windup

5 CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

5.1 CONCLUSIONES

Se ha expuesto en esta tesis la importancia del sector del yeso para la construcción en España respecto al resto del mundo. Esta relevancia justificaría que hubiera grandes avances en dicho sector. Lamentablemente se ha visto en los capítulos anteriores que esto no es exactamente así. Se ha tratado y analizado bastante el yeso como mineral y como formulación desde hace ya bastantes años, pero no así sus procesos. Dichos procesos se han definido siempre como simples y prácticamente las formas de trabajar de los últimos cuarenta años han sido similares en muchas plantas de tratamiento de yeso. La molienda no ha evolucionado, la extracción del mineral y el sistema de voladuras muy poco y el ensacado continúa siendo manual o poco automatizado en la mayoría de las plantas españolas. En el caso del proceso de calcinación, que ocupa, aún continúa siendo muy plural y existen un gran tipo de hornos, con muy variadas características, aunque se ha ido imponiendo el horno rotativo de calcinación de cocción directa. Las formulaciones si se han adaptado a los nuevos productos de aditivación, provenientes de las grandes empresas químicas asiáticas o alemanas. Una de las razones de la poca movilidad en este tipo de empresas se atribuye a que el yeso en España es un bien abundante, tal como se ha visto, y el precio del mismo es relativamente bajo. Esto puede producir un decaimiento en la especulación del material de construcción y una menor demanda de productividad. Uno de los cambios que se produce en los últimos años y que redundará en un aumento del interés por la mejora será el gran incremento sufrido por las energías usadas en el proceso, como son gasoil, gas y electricidad. En los últimos años se han creado equipos especializados en el ahorro energético en la mayoría de centros de producción de este país.

Si en el campo de los equipos la evolución ha sido escasa, en el campo de los procesos si se han aportado algunas tecnologías. Se han automatizado parte de la planta de producción y se han implantado tecnologías provenientes de otros sectores más avanzados como son el cementero o el de tratamiento de minerales de mayor valor añadido.

Ésta tesis realiza un avance en este sentido. Se reformula todo el proceso de fabricación y se adaptan medios eficientes para el control, o mejor dicho auto-control de los elementos para la fabricación de anhídrita. Se han analizado las mejores prácticas e implantado estas mejoras en una planta real, comprobando la mejora en todo el proceso de calcinación.

Como se ha visto, la automatización del proceso de fabricación de anhídrita ha permitido tener datos fidedignos del proceso en tiempo real y en muy corto espacio de tiempo, lo cual ha sido imprescindible para su posterior evaluación, ordenamiento y correlación estadística. Posteriormente estas correlaciones han permitido realizar una regulación eficaz del elemento horno: analizar sus retardos, sus parámetros de proceso, sus funciones de transferencia. Se ha comprobado la mejora a partir de esta implantación respecto a la situación inicial de forma clara. Así como los estudios referentes al proceso de combustión y sus balances de masa y energía, han permitido obtener un ahorro considerable en el consumo energético gracias a implantaciones de variadores de frecuencia y autocontroles.

Si se ha descrito en el párrafo anterior la poca evolución en maquinaria y la regular evolución en procesos, la inversión de la empresa de fabricación de yeso en polvo en Inteligencia Artificial y en Sistemas Expertos es prácticamente nula. Se han hecho algunos estudios pero prácticamente no hay ninguna implantación de algún sistema simple de este tipo en la calcinación. Se ha demostrado, a la vez, que la implantación de estos Sistemas Expertos, en concreto las Redes Bayesianas, que es el sistema que se ha implantado, mejora el autocontrol de la calcinación. El sistema implantado funciona en base a un profundo conocimiento de la base del proceso, sus variables y su entorno, mediante una buena automatización y mediante una regulación eficaz del comportamiento de los equipos.

Estas redes de probabilidad implantadas proporcionan al operador de la maquinaria y al ingeniero de planta una herramienta muy importante para el conocimiento del proceso y para el seguimiento y control del mismo, así como para la toma de decisiones al respecto.

Por otra parte, esta tesis trata sobre un proceso industrial aplicado, que como todo proceso de producción, tiene un sentido multidisciplinar e intervienen campos como son la mecánica (estudio del horno), la informática de sistemas (MES), la automática y regulación (PID's), la ingeniería de procesos, la ingeniería química de procesos (flujos de masa y de energía de horno y quemador), la informática (programación PLC y redes) y la estadística y los métodos numéricos (estudio de variables y RB).

5.2 CONTRIBUCIONES DE LA TESIS

Se pueden resumir los aspectos novedosos de esta tesis como los que siguen:

- Aportar una revisión actualizada de los proceso de fabricación de yeso en polvo para la industria de la construcción en general y del proceso de calcinación de anhídrita en particular. Esta parte incluye la recopilación de las mejores prácticas y a elección de la propuesta por parte de esta tesis. Se redefine el proceso, sus elementos de control y los elementos auxiliares del equipo principal, que es el horno rotativo de calcinación de cocción directa.
- Automatizar de forma eficiente el proceso de calcinación de anhídrita dentro de un entorno industrial a diferentes niveles de control, ERP, MES, PLC, SCADA y software de control industrial. Con esta automatización se mejora la eficiencia del funcionamiento de los equipos, la trazabilidad de las fabricaciones, se minimiza la tarea humana y se produce un reporte de datos de calidad de forma automática, así como el análisis de los mismos. Todas las aplicaciones se integran en un mismo sistema.
- Realizar una regulación eficiente mediante controladores PID de los parámetros críticos de la calcinación de la anhídrita. Se consigue una mejora de los ciclos de calcinación y una mayor estabilidad del proceso y de sus variables.
- Crear, programar e implantar un modelo del sistema de calcinación mediante autodiagnóstico. Se usan las redes bayesianas para tal fin. Se crea una red de diagnostico de todas las variables directas e indirectas, de proceso, de calidad, externas, meteorológicas, etc. con la que el sistema reporta automáticamente las probabilidades de fallo o de descontrol de cada variable en las condiciones

actuales de trabajo. Este modelo se autoalimenta creando un bucle de autoaprendizaje para cada ciclo de trabajo

5.3 FUTUROS DESARROLLOS

La tesis actual es muy exhaustiva, ya que estudia desde el origen de los conceptos a estudiar hasta su aplicación real, pasando por todo el análisis individual de cada apartado concreto. Aun así, y en el ámbito que atañe a ésta tesis, se estima que aparecen varias líneas de investigación muy interesantes. Se pueden enumerarlas como:

- Aplicar la tecnología sugerida a toda una planta de fabricación de yeso, con la complejidad que ello representa, para cerrar el círculo de toda la fabricación (entrada mineral, calcinación, almacenaje, mezclado, ensacado y paletizado y estocado).
- Aplicar los conceptos y tecnologías aportadas por esta tesis a diferentes tipos de hornos para calcinación de anhídrita, con el objetivo de realizar comparaciones entre si. Se ha visto en el estado del arte de este trabajo que existen varios tipos de hornos de calcinación de anhídrita, siendo a priori, el más eficiente el tipo rotativo directo. Se podría aplicar toda la metodología a otro tipo de maquinaria de calcinación.
- Realizar el estudio pertinente para automatizar el horno de calcinación mediante redes bayesianas de forma íntegra. Se ha visto en los análisis que en el momento actual (Deventer, 2003) no se ha conseguido realizar los algoritmos necesarios para hacer trabajar las redes bayesianas como dinámicas para su uso en regulación automática. Se estima un campo muy interesante para recorrer en los próximos años, ya que las RB tienen un gran potencial debido a sus características ya detalladas en los capítulos precedentes.
- Aplicar lógica difusa o heurística a la regulación del control PID de un horno de calcinación de anhídrita combinándola con el uso de RB para su supervisión. Puede ser un campo interesante de investigación. Se pueden hacer avances en los estudios actuales al respecto (Lozano, 2002). Algunos investigadores han usado sistemas basados en Redes Neuronales Artificiales para estudios en hornos de cemento (Yang y Cao, 2009) o níquel (Muñoz, 1998).

REFERENCIAS

AENOR (1983). *Placas de escayola para techos desmontables de entramado visto. Condiciones generales y especificaciones. UNE 102021 y Placas de escayola para techos de entramado oculto con juntas aparentes. Condiciones generales y especificaciones. UNE 102022. Madrid*

AENOR (1984). *Yesos y escayolas de construcción. Métodos de análisis químico. UNE 102032. Madrid*

AENOR (1985). *Yesos y escayolas de construcción. Método de análisis de fases. UNE 102037. Madrid*

AENOR (1986). *Aljez o piedra de yeso. Clasificación. Características. UNE 102.001. Madrid*

AENOR (1997). *Quemadores automáticos de aire forzado que utilizan combustibles gaseosos. UNE-EN 676. Madrid*

AENOR (1999). *Yesos y escayolas de construcción. Métodos de ensayo físicos y mecánicos. UNE 102031. Madrid*

AENOR (2002). *Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego. UNE-EN 13501-1. Madrid*

AENOR (2006). *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. UNE-EN 13279-1 y Parte 2: Métodos de ensayo. UNE-EN 13279-2. Madrid.*

AENOR (2009). *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. UNE-EN 13279-1. Madrid.*

AENOR (2010). *Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. UNE-EN 520+A1. Madrid*

AENOR (2012). *Paneles de yeso. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. UNE-EN 12859. Madrid*

Alonso Zarza, A. (2010). *Las rocas evaporíticas. Reduca (Geología). Serie Petrología Sedimentaria, 117-124.*

Andersen, P. y Petersen, N. C. (1993): "A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis", *Management Science*, vol. 39, nº 10, pp. 1261-1264.

Arredondo, F. (1980). *Estudio de materiales. Las rocas en la construcción. Vol. II. El yeso. Madrid: Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC. Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento.*

Arzabe, J. (Noviembre-Diciembre de 1997). *Aplicaciones del yeso: plantas piloto en Bolivia. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 36(6), 599-602.*

- ATEDY SPP. (2010). ATEDY SPP. Recuperado el 15 de Mayo de 2012, de ATEDY SPP: <http://www.atedyspp.es/>
- ATEDY. (2001). *Manual de ejecución de tabiques con paneles de yeso o escayola*. Madrid: Asociación Técnica y Empresarial del Yeso.
- ATEDY. (2011). *Sistemas constructivos con placas de yeso laminado*. Madrid: Asociación Técnica y Empresarial del Yeso.
- Barnard, J., & Bradley, J. (1985). *Flame and combustion*. Chapman and Hall.
- Bellman R., Giertz M. (1973). *On the analytic formalism of the theory of fuzzy sets*. *Information Sciences* 5: 149–156.
- Camdali, U., Erisen, A., & Celen, F. (2004). *Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production*. *Energy Conversion and Management* 45.
- Castillo, E., Gutierrez, JM and Hadi, A. (1997). *Expert Systems and Probabilistic Network Models*, Springer
- Catalhoyuk Research Project. (25 de Abril de 2012). Catalhoyuk. Recuperado el 4 de Mayo de 2012, de <http://www.flickr.com/photos/catalhoyuk/6042191317/in/photostream>
- Cerulla, J. (Noviembre-Diciembre de 1997). *Extracción, explotación, minería y proceso de tratamiento del yeso*. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36(6), 571-577.
- Chang, L., Howie, R., & Zussman, J. (1996). *Rock forming minerals. Volume 5B: Non silicates. Sulphates, Carbonates, Phosphates and Halites*. Harlow: Longman.
- Charniak, E., (1991). *Bayesian Networks without tears*. *AI Magazine, USA*, pp.50-63.
- Cheeseman, P. and J. Stutz (1995). *Bayesian classification (AutoClass): Theory and results*. In U. Fayyad, G. Piatesky-Shapiro, P. Smyth, and R. Uthurusamy (Eds.), *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Menlo Park, California: AAAI Press. Review of R. T. Cox, R.T. (1972). *Probability, Frequency and Reasonable Expectation and The Algebra of Probable Inference*, in *The Journal of Symbolic Logic* 37, pp. 398f.
- Chickering, D.M. (1995). *Learning Bayesian networks is NP-complete*. In D. Fisher & A. Lenz. *Learning from Data*. Springer-Verlag.
- Chow, C. and Liu, C. (1968). *Approximating Discrete Probability Distributions with Dependence Trees*. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 14, 462- 467.
- Ciurana, J.; Arias, G.; Ozel, T. (2009). *Neural network modeling the influence of process parameters on feature geometry and surface Quality on pulsed laser micro machining of hardened steel H13*. *Materials and Manufacturing Processes* , 24, p358-368
- Cooper, G. (1990). *Computational complexity of probabilistic inference using Bayesian belief networks (research note)*. *Artificial Intelligence*, 42, 393- 405.
- Cooper, G.F., Herskovits, E. (1992). *A Bayesian Method for the Induction of Probabilistic Networks from Data*. In *Machine Learning* 9, pages 54-62, Kluwer.

- Cowell, R., Dawid, A., Lauritzen, S., Spiegelhalter, D. (1990). *Probabilistic Networks and Expert Systems*. Springer, New York, NY.
- Cruz-Ramirez, N., *Building Bayesian Networks From Data: a Constraint Based Approach*. Ph. D Thesis. Department of Psychology. The University of Sheffield. (2001).
- D'Ambrosio, B. (1999) *Local expression languages for probabilistic dependence In Proceedings of Seventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence* Los Angeles CA pages 95- 102 Morgan Kaufmann
- Dana, J., & Hurlbut, C. (1959). *Manual de mineralogía*. Barcelona-Buenos Aires-México: Editorial Reverté.
- Davey, N. (1961). *A History of Building Materials*. London: Phoenix.
- Dawid, A. P. (1992). *Application of general propagation algorithm for probabilistic expert systems*. *Statistics and Computing*, 2, 25-36.
- De Finetti, B. (1970). *Theory of Probability*. Wiley and Sons. New York
- Del Río, M. (2002). *Manual de ejecución de revestimientos interiores con yeso*. Madrid: Asociación Técnica y Empresarial del Yeso, ATEDY.
- Departamento de Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía. Universidad de Valladolid. (26 de 10 de 2011). *Servidor web de minerales*. Recuperado el 28 de 03 de 2012, de: http://greco.fmc.cie.uva.es/explorador_mine.asp?cm=1434&nn=1&f=f
- Deventer, R., Denzler, J., and Niemann, H. (2003). *Bayesian controller versus traditional controllers*. University Erlangen-Nürnberg, Chair for Pattern recognition, Erlangen
- Díez, J. *Sistema Experto Bayesiano para Ecocardiografía*. (1994) Tesis doctoral. Departamento de Informática y Automática de la UNED. Madrid.
- Díez, M. (1997). *Yeso. Normalización básica y directiva de productos de construcción*. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36(6), 585-589.
- Dorado, F., Núñez, A., Camacho, EF. y Bordons, C. (2000). *Modelado y Control de un horno de Yeso Rotativo y Continuo*. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela Superior de Ingenieros. Sevilla.
- Dorf, R. and Bishop, R. (1998). *Modern Control Systems*. Addison-Wesley
- Dormido, S. y Pérez, A. (1995). *Fundamentos de Control Predictivo Basado en Modelos (CPBM)*. Jornadas de Automática. Universidad de Valladolid
- Duda, R. O. & P. E. Hart. (1973). *Pattern Classification and Scene Analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- España (1979). *Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio. Norma básica de edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios*. *Boletín Oficial del Estado*, 22 de octubre de 1979, núm. 253, p. 24524-24550.

España (1986). Real Decreto 1302/1986, de 28 de junio. Evaluación de impacto ambiental. Boletín Oficial del Estado, 30 de junio de 1986, núm. 155, p. 23733-23735.

España (1988). Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre. Aprobación del Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental. Boletín Oficial del Estado, 5 de octubre de 1988, núm. 239, p. 28911-28916.

España (2005). Real Decreto 312/2005, de 18 de marzo. Productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego. Boletín Oficial del Estado, 2 de abril de 2005, núm. 79, p. 11317-11318.

España (2006). Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. Código Técnico de la Edificación. Boletín Oficial del Estado, 28 de marzo de 2006, núm. 74, p. 11816-11831.

España (2006). Real Decreto 919/2006, de 28 de julio. Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias ICG 01 a 11. Boletín Oficial del Estado, 4 de septiembre de 2006, núm. 211, p. 31576 -31632.

España (2007). Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre. Documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación Boletín Oficial del Estado, 23 de octubre de 2007, núm. 254, p. 42992 a 43045.

Facundo, G., Benavides, F., RDRD Rostagnol, C. (2006). Proyecto FibRA. Instituto de Computación Facultad de Ingeniería - Universidad de la República Montevideo – Uruguay

Feigenbaum E.A., Buchanan B.G. (1993). DENDRAL and Meta-DENDRAL: roots of knowledge systems and expert systems applications. *Artificial Intelligence* 59: 233–240.

Feigenbaum, A., Edward (1982). *Knowledge Engineering in the 1980's*. Dept. of Computer Science, Stanford University, Stanford, CA

Feigenbaum, E.A. and Buchanan, B.G., (1978). DENDRAL and Meta-DENDRAL: Their Applications Dimension, *Artificial Intelligence*, 11, pp. 5-24.

Felgaer, P.E. (2005). Optimización de redes bayesianas basado en técnicas de aprendizaje por inducción. Tesis de grado en Ingeniería en Informática. s.l.: Laboratorio de Sistemas Inteligentes. Facultad de ingeniería universidad de Buenos Aires

Fernández, S. (2002). *Redes Bayesianas Temporales: Aplicaciones Médicas e Industriales*. Tesis Doctoral. Departamento de Inteligencia Artificial. Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid

Friedman, J. (1996). On bias variance of loss and the curse of dimensionality. *Data Mining and Knowledge Discovery*

Friedman, N. and Goldszmidt, M. (1996). Building classifiers using Bayesian networks In *Proceedings. AAAI 9. Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence* Portland OR pages 277-284. AAAI Press Menlo Park CA

- Friedman, N. and Goldszmidt, M. (1996). *Discretizing continuous attributes while learning bayesian networks*. 13th International Conference on Machine Learning (ICML), pages 157-165.
- Furroy, F. (2003). *Ajust Automàtic d'un Regulador PID Mitjançant Raonament Basat en Casos*. Proyecto fin de carrera. ETIEI. EPS. Universitat de Girona.
- Gárate, I. (1993). *Artes de la cal*. Madrid: Ministerio de cultura.
- Garate, I. (1999). *Artes de los yesos. Yeserías y estucos*. Madrid: Munilla-Lería.
- Gasset, M. (Noviembre-Diciembre de 1997). *Mercado de la placa de yeso laminado*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 36(6), 613-618.
- Geman, S and Geman, D. (1984). *Stochastic relaxation Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images*. IEEE. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 672-742
- Gerhartz, W., & Schulz, G. (1985-1996). *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH.
- Gomá, F. (1979). *El cemento portland y otros aglomerantes*. Barcelona: Editores técnicos asociados, SA.
- Gomis, V. (2007). *El yeso como materia prima*. Recuperado el 25 de Abril de 2012, de <http://iq.ua.es/Yeso>
- González, R., Espinosa, D., Fernández, M.A. y Romero, E. (2004). *Fundamentos de Regulación Automática*. Universidad de Cádiz.
- Gutiérrez, J.C. (2004). *Probabilidad Condicional Instituto Politécnico Nacional*. IPN-UPIICSA. México
- Hawthorne, F. & Ferguson, R. (1975). *Anhydrous sulphates. II. Refinement of the crystal structure of anhydrite*. The Canadian Mineralogist (13), 289-292.
- Heckerman, D. (1996). *A tutorial on learning with Bayesian networks*. Tech. Rep. No. MSR-TR-95-06. Redmond, WA: Microsoft Research.
- Heckerman, D., Geiger, D. and Chickering, D. (1995). *Learning Bayesian Networks: The Combination of Knowledge and Statistical Data*. Machine Learning, 20, 197-243.
- Herskovits, E.H., Copper, G.F. (1991). *Algorithms for Bayesian belief-networks per computation*. Meth. Inf. Med., 30:81-9.
- Hommersom, A., Lucas, P., (2010) *Using bayesian networks in an industrial setting: Making printing systems adaptive*. In: *Proceedings of the 19th European Conference on Artificial Intelligence*. Lisbon, Portugal.
- Howard, R. A. and Matheson, J. E. (1983). *Influence diagrams*. In R. A. Howard & J. E. Matheson (Eds.). *Readings on the principles and applications of decision theory*, 719-762. Strategic Decision Group.

- Howard, R. and Matheson, J. Editors (1983). *The Principles and Applications of Decision Analysis Strategic*. Decisions Group. Menlo Park, CA.
- Hugon, A., & Serre, M. (1982). *Enciclopedia de la construcción - Técnicas de construcción II*. Barcelona: Editores técnicos asociados, SA.
- Ishikawa, K. (1968). *Guide to Quality Control*. Gemba No QC Shuho by JUSE Press, Ltd., Tokyo
- Jackson, P. (1999). *Introduction to Expert Systems*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 399
- Jensen, M.E., Burman, R.D. and Allen, R.G.. (1990). *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, Am. Soc. Civil Engr., New York, NY. 332 pp.
- Jiménez, JL. (2003). *BayesN: Un Algoritmo para Aprender Redes Bayesianas Clasificadoras a partir de datos*. Tesis que para obtener el grado de Maestro en Inteligencia Artificial. Facultad de Física e Inteligencia Artificial. Universidad Veracruzana
- Kass, R., Tierney, L. and Kadane, J. (1988). *Asymptotics in Bayesian computation* In Bernardo, J., DeGroot, M., Lindley, D. and Smith, A. editors *Bayesian Statistics 3*, pages 261-278 Oxford University Press.
- Knauf. (1993). *Sechoir a carreaux de plâtre a condenseur*. Ciments, bétons, plâtres, chaux (800).
- Korf, R. (1993). *Linear-space best-first search*. *Artificial Intelligence* 62:41–78.
- Krishnamoorthy, V. and Shan, MC. (2000). *Virtual Transaction Model to Support Workflow Applications*", SAC (2)'00, p. 876-881
- Kuehl, R.O. (2001), *Diseño de Experimentos, Principios Estadísticos del Análisis y Diseño de Investigación*, México, Ed. Thomson Learning.
- Lauritzen, S. & Spiegelhalter, D. J. (1988). *Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems*. *Journal of the Royal Statistical Society series B*, 50(2):157-224.
- Lauritzen, S.L. (2002). *Lectures on Contingency Tables*. Electronic Edition.
- Leonard, T. and Hsu, J. (1999). *Bayesian Methods*, New York: Cambridge University Press
- López, J. (2012). *Cómo Construir y Validar Redes Bayesianas con Netica*. *Revista Electrónica de Metodología Aplicada* Vol. 17 nº 1, pp. 1-171. Universidad de Almería
- López, J. (2012). *Cómo Construir y Validar Redes Bayesianas con Netica*. *Revista Electrónica de Metodología Aplicada* Vol. 17 nº 1, pp. 1-17
- Lozano, JL., López, MJ., Terrón, J. y Mesa, F. (2002). *Sistema de Ayuda al Operador en Tiempo Real Basado en Redes Bayesianas, Lógica Borrosa y G2*. Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Cádiz.
- Lynch, A. (1977). *Mineral crushing and grinding circuits*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.

Mamdani E.H. (1976). *Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controller*. *International Journal of Man-Machine Studies* 8(6): 669–678.

Maps of World. (6 de Febrero de 2012). *Maps of World*. Recuperado el 16 de Abril de 2012, de <http://www.mapsofworld.com/minerals/world-gypsum-producers.html>

Marcos, C. (2009). *OpenCourseWare Universidad de Oviedo*. Recuperado el 3 de mayo de 2012, de *Mineralogía*. Tema 26. Haluros, Carbonatos, sulfatos. Otros grupos aniónicos.:
http://ocw.uniovi.es/file.php/39/1C_C11812_A/contenidos%20en%20pdf%20para%20descargar/26.pdf

Marín-Llanes, L., Medina-Pagola, J., André-Ampuero, M., Caballeros, A. (2001). *Desarrollo de un sistema experto para los estudios estratégicos en la Consultoría BioMundi/IDICT*. *Ciencias de la Información, Norteamérica*, 32

Martin, J. and Van Lehn, K. (1995). *Discrete factor analysis learning hidden variables in bayesian networks*. *Technical report*. Department of Computer Science University of Pittsburgh, PA.

Martínez, F., Díaz, M.C., Martín, M.T., Rivas, V.M., Ureña, L.A. (2002). *Aplicación de redes neuronales y redes bayesianas en la detección de multipalabras para tareas IR*. Universidad de Jaén, España

McCulloch, W. S. and Pitts, W. H. (1943). *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115-133.

Merchan, C., & Regueiro, M. (2009). *Panorama Minero*. Recuperado el 3 de Abril de 2012, de *Instituto Geológico y Minero de España*:
<http://www.igme.es/internet/PanoramaMinero/actual/yeso%2009.pdf>

Mineralogy Database. (31 de Diciembre de 2009). *Mineralogy Database*. Recuperado el 7 de Mayo de 2012, de www.webmineral.com

Ministerio de Fomento. (Octubre de 2011). *Catálogo de elementos constructivos del CTE*. Recuperado el 8 de Mayo de 2012, de:
<http://www.elementosconstructivos.codigotecnico.org>

Ministerio de Industria, E. y. (2010). *Estadística Minera*. Recuperado el 3 de abril de 2012, de *Ministerio de Industria, Energía y Turismo*:
<http://www.minetur.gob.es/energia/mineria/Estadística/Paginas/EstadísticaMinera.aspx>

Minsky M. (1975). *A framework for representing knowledge*. In *The Psychology of Computer Vision*, Winston PH, ed. McGraw-Hill, New York.

Minsky, M. and Papert, S. (1972). *Perceptrons*, MIT Press, Cambridge, Mass.

Morales, M. E. (2006). *Modelización y predicción en estadística universitaria*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Almería.

Mottana, A., Crespi, R., & Liborio, G. (1991). *Guía de minerales y rocas*. Barcelona. Grijalbo.

Muñoz, A. (1998). *Algoritmos y Sistemas de Control Borroso Aplicados en una Planta de Calcinación de la Industria de Producción de Níquel*. Editorial Pueblo y Educación.

Neapolitan, R.E. (1990) *Probabilistic Reasoning in Expert Systems: Theory and Algorithms*, John Wiley & Sons, New York

Newell, A., Shaw, J. C. and Simon, H. A. (1963). *Empirical explorations with the logic theory machine: a case study in heuristics*, in *Computers and Thought*, Feigenbaum, E. A. and Feldman, J. (Eds.). McGraw Hill, New York.

Newell, A., Simon. H.A., (1963). *GPS: A program that simulates Human Thought*", *Computers and Thought*, ed. Feigenbaum, E., Feldman, J., NY, McGraw-Hill, 272-296.

Nikolopoulos, S., Pitsillides, A., Tipper, D. (1997). *Addressing Network Survivability Issues by Finding the K-Best Paths through a Trellis Graph*. INFOCOM. P.370-377

Nolhier, M. (1986). *Construire en Plâtre*. Paris: L'Harmattan.

Olmsted, S. (1983). *On representing and solving decision problems* PhD thesis. Department of Engineering-Economic Systems. Stanford University.

Ortí, F. (1989). *Evaporitas marinas*. En A. Arche, *Sedimentología* (págs. 89-177). Madrid: CSIC.

Ortí, F., & Rosell, L. (1991). *Mineralogía de rocas evaporíticas. Prácticas de petrografía de rocas sulfatadas evaporíticas*. En J. Pueyo, *Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos* (págs. 87-118). Barcelona: Publicacions Universitat de Barcelona.

Ortí, F., Rosell, L., & Salvany, J. (1992). *Depósitos evaporíticos en España: aspectos geológicos y recursos*. En J. García, & J. Martínez, *Recursos minerales de España* (págs. 1171-1209). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC.

Patronato de la Alhambra y el Generalife. (3 de mayo de 2012). *web oficial del Patronato de la Alhambra y el Generalife*. Recuperado el 4 de mayo de 2012, de <http://www.alhambra-patronato.es/index.php/Galeria-de-imagenes/529/0/>

Pearl, J. (1986). *Fusion, propagation and structuring in belief networks*. *Artificial Intelligence*, 29:241-288.

Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems*. Morgan Kaufmann, Palo Alto, Calif., U.S.A.

Pearl, J. (1995) *Causal diagrams for empirical research* *Biometrika* 82 669-700

Pérez, M^aL. y Martín, Q. (2003). *Aplicaciones de las Redes Neuronales Artificiales a la Estadística*. Cuadernos de Estadística. La Muralla.

Perry, R., & Green, D. (1997). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. Mc. Graw Hill.

Piedrafita (1999). *Ingeniería de la Automatización Industrial*. Ra-Ma

Quillian M.R. (1968). *Semantic Memory*. In *Semantic Information Processing*, Minsky M, ed. 227–270. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

- Ramsey, F. (1993). *Truth and probability* In Braithwaite, R. Editor. *The Foundations of Mathematics and other Logical Essays*. Humanities Press. London Reprinted in Kyburg and Smokler
- Rebane, T and Pearl, J. (1989). *The recovery of causal polytrees from stadistical data*. Nort-Holland : Levitt and J.F. Lemmer. In *Uncertainty in artificial Intellegence*, 3, L.N. Kanal, T.S.
- Regueiro, M., & Calvo, J. (1997). *El Yeso. Geología y yacimientos en España*. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36(6), 563-569.
- Rivero, L. (Noviembre-Diciembre de 1997). *Fabricación de productos de base yeso y sus aplicaciones industriales*. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36(6), 591-598.
- Robins, J. (1986). *A new approach to causal inference in mortality studies with sustained exposure results*. *Mathematical Modeling*, 7. 393- 452
- Robinson J.A. (1965), *A machine oriented logic based on the resolution principle*, *Journal of the Association for Computing Machinery*, 12, 23-41.
- Rodríguez, D., Dolado, J. (2007). *Redes Bayesianas en la Ingeniería del Software*. Universidad de Alcalá
- Rouchy, J. (1982). *La genesè des évaporites messiniennes de Méditerranée*. Paris: Museum National d'Histoire Naturelle.
- Rubin, D. (1978). *Bayesian inference for causal effects. The role of randomization*. *Annals of Statistics*, 6. 34-58
- Rubio, A. (2000). *Guía interactiva de minerales y rocas*. Recuperado el 03 de 04 de 2012, de <http://www2.montes.upm.es/Dptos/DptoSilvopascicultura/Edafologia/aplicaciones/GUIA%20MINERALES/indice.html>
- Russell, S. & Norvig, (2004). *P. Inteligencia artificial (Un enfoque moderno)*, segunda edición. Prentice–Hall Hispanoamericana.
- Russell, S., Binder, J.; Koller, D; & Kanazawa, K. (1995). *Local learning in probabilistic networks with hidden variables*. *Proceedings of the 14th. International Joint Conference on Artificial Intelligence, Montreal, San Francisco: Morgan Kaufmann*.
- Sacerdoti, A. (2010). *Desarrollo de modelos de fallas de sistemas electrónicos utilizando redes bayesianas*. UNLAM. Argentina
- Sakthivel, T.S. and V. Kalyanaraman, V. (1993). *A KBES for integrated engineering Engineering with Computers* . Volume 9, Number 1, 1-16
- Sanz, D. (2009). *Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Scenna, N., & col., y. (1999). *Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos*.

- Schiaffino, S. (2011). *Inteligencia Artificial. Redes de Bayes*. ISISTAN – Fac. Cs. Exactas Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires Tandil, Argentina
- Schmidt R., Wyvill B., Sousa M. C., Jorge, J. A. (2005). *Shapeshop: Sketch-based solid modeling with blobtrees*. In *Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*, pp. 53–62.
- Schofield, P., Knight, K., & Stretton, I. (1996). *Thermal expansion of gypsum investigated by neutron powder diffraction*. *American mineralogist*, 81, 847-851.
- Schulz, G. (2002). *Regelungstechnik, Mehrgrößenregelung -Digitale Regelungstechnik- Fuzzy Regelung*. Oldenburg Verlag, München, Wien
- Shachter, R. (1988). *Probabilistic inference and influence diagrams*. *Operations Research*, 36 589-604.
- Shanon, C.E. (1950) *Programming a computer for playing chess*, *Philosophical Magazine, Series 7*, 41, 256–275
- Sherwood, R., Reid, J., & Prausnitz, T. (1979). *The properties of Gases and Liquids*. New York: Mc. Graw Hill.
- Shortliffe, E. H. (1976). *Computer-Based Medical Consultations: MYCIN*, Elsevier, New York
- Siler, W., Buckley, J.J. (2005). *Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning*, John Wiley & Sons
- Simon, H.A. (1983). *Why should machines learn?*. *Machine Learning*, Michalski et al. (eds.) Palo Alto, CA. Tioga.
- Singh, M., Provan, G. (1995a). *A Comparison of Induction Algorithms for Selective and non-Selective Bayesian Classifiers*. In *Proceedings of the 12th International Conference on Machine Learning*, 497-505. Morgan Kaufmann.
- Spiegelhalter, D.J., and Lauritzen, S.L. (1990). *Sequential updating of conditional probabilities on directed graph structures*. *Networks*, 20, 579-605.
- Spirtes, P. & Glymour, C.(1993). *Causation, Prediction and Search*, Springer-Verlag.
- Spirtes, P. and Meek, C. (1995). *Learning Bayesian networks with discrete variables from data in Proceedings of First International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Montreal QU. Morgan Kaufmann
- Spirtes, P., Glymour, C. and Scheines, R. (1993). *Causation Predictions and Search*. Springer-Verlag. New York
- St. Clair, D.W. (1999). *Sintonizado de Controladores y Comportamiento del Lazo de Control*. Tiempo Real, S.A.
- Súcar, L.E, Pérez-Brito, P. and Ruiz Suárez. (1995). *Induction of Dependency Structures from Data and its Application to Ozone Prediction*. J.C. Melbourne, Australia. VIII International Conference on Industrial and Engineering.

Tapia, F.J. (2007). *Modelo Bayesiano para la Optimización y Personalización del Proceso de Aprendizaje en Línea: Estudio Casuístico*. Tesis doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España

Thiesson, B. (1995a). *Accelerated quantification of Bayesian networks with incomplete data* In *Proceedings of First International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Montreal QU pages 306-309. Morgan Kaufmann

Tukey, J. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley

U.S. Geological Survey. (2011). *Mineral Commodity Summaries 2011*. Virginia: U.S. Geological Survey.

Villanueva, L., & García, A. (2001). *Manual del Yeso*. Madrid: Asociación Técnica y Empresarial del Yeso-DOSSAT 2000.

Wang, Z. & Webb, G. I. (2002). *Comparison of lazy Bayesian rule and tree-augmented Bayesian learning*. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Data Mining, ICDM-2002* (pp. 775–778). Maebashi, Japan.

Weiss, S.M and Kuliskowski, C.A. (1984). *A Practical Guide to Designing Expert Systems*. Rowman and Allanheld, Totowa, N. J

Wirsching, F. (2005). *Artículo "Calcium sulfato"*. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.

Yang, B. and Deguang, C. (2009). *Action-Dependent Adaptive Critic Design Based Neurocontroller for Cement Precalciner Kiln*. Suzhou. *I.J.Computer Network and Information Security*, 1, 60-67

Ziegler, J. G. and Nichols, N. B. (1942). *Optimum Settings for Automatic Controllers*. *ASME Transactions*, 64.

ANEXOS

ANEXO I. ESTADÍSTICAS DE LAS VARIABLES ANALIZADAS

1.- Caudal de Material V03: Qm

Descripción

Caudal de entrada del material en el horno nº5.

Tipo de medición

Instrumento: Auto-Scada

Toma de datos: Continuo

Fecha inicio toma de datos: 01/04/2010

Unidades: Tm/h

Resumen Estadístico de los resultados registrados

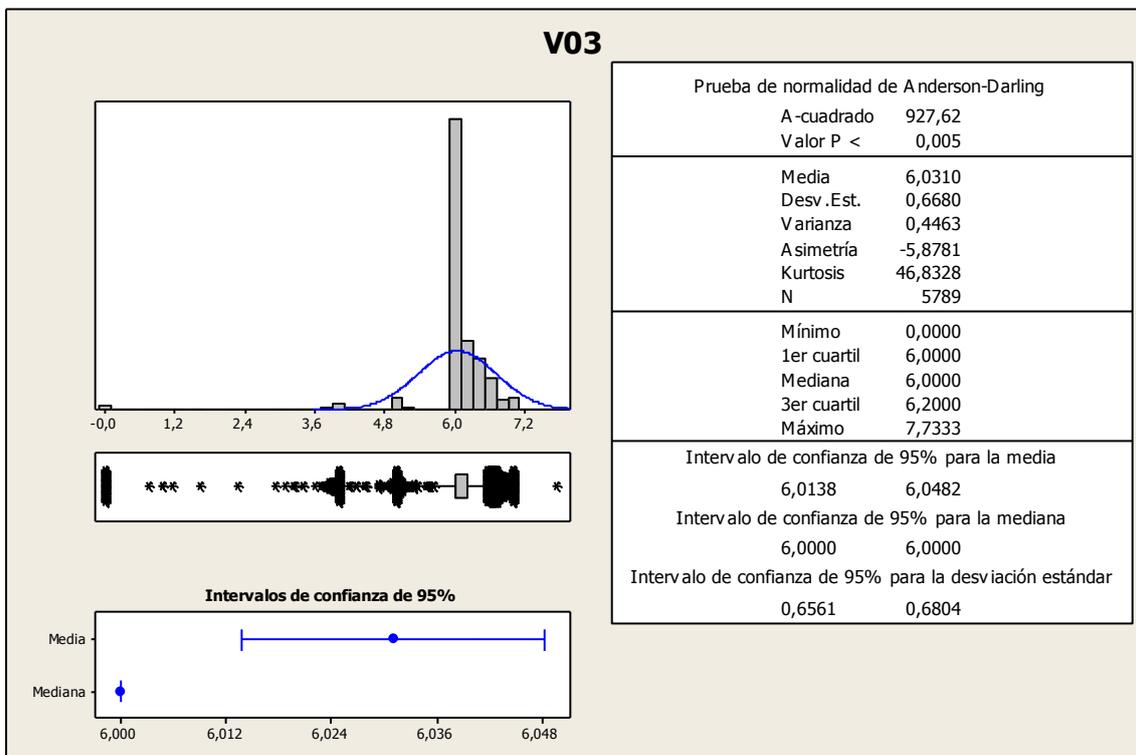


Figura 174. Estadísticas de la variable V03

Perfil de esta variable durante un proceso entero de calcinación

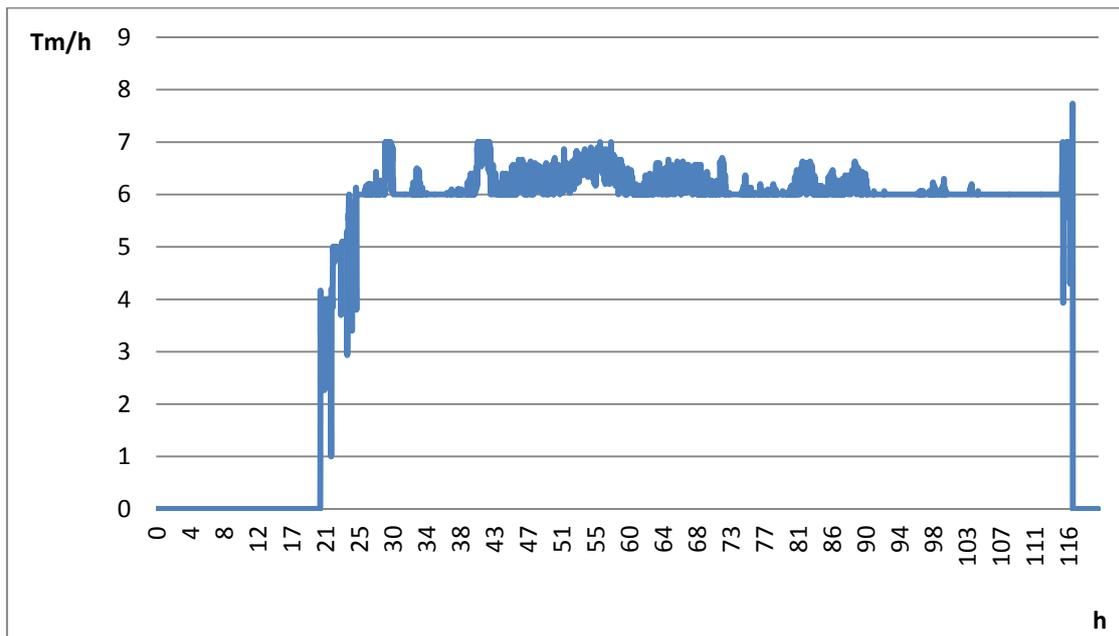


Figura 175. Perfil de la variable V03

Comentario

El perfil de la variable muestra el caudal de entrada de material al horno. Según los datos, el gráfico muestra una entrada regular y uniforme de material.

Hipótesis afectación de esta variable con el resto de variables del sistema

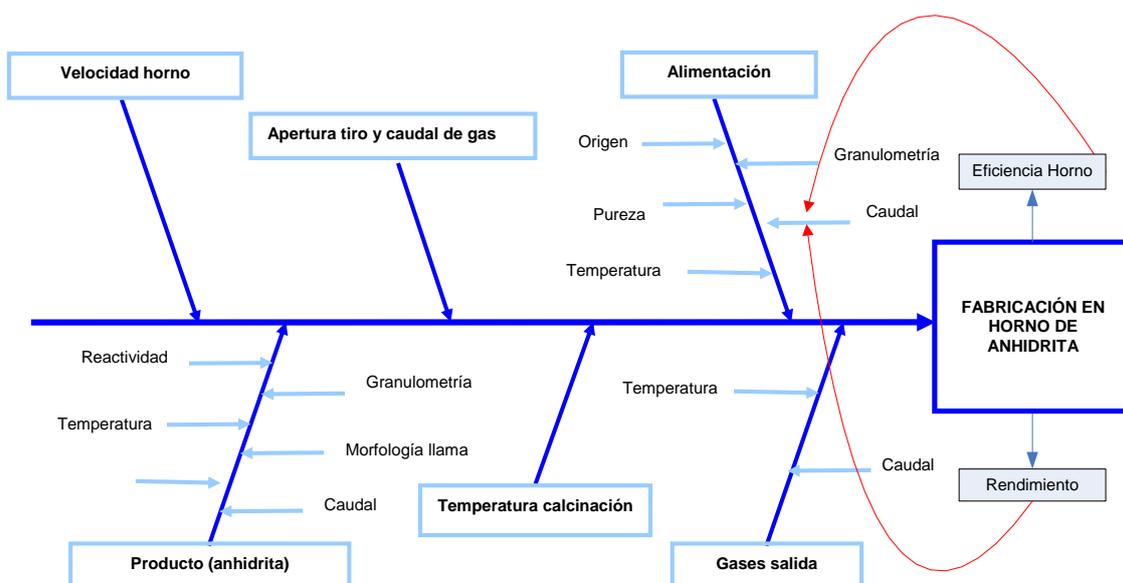


Figura 176. Diagrama causa-efecto de la variable V03

2.- Partículas sólidas emitidas en valor instantáneo V05: Pi

Descripción

Partículas sólidas emitidas instantáneamente en el horno n°5

Tipo de medición

Instrumento: Auto-Scada

Toma de datos: Continuo

Fecha inicio toma de datos: 01/04/2010

Unidades: mg/Nm³

Resumen Estadístico de los resultados registrados

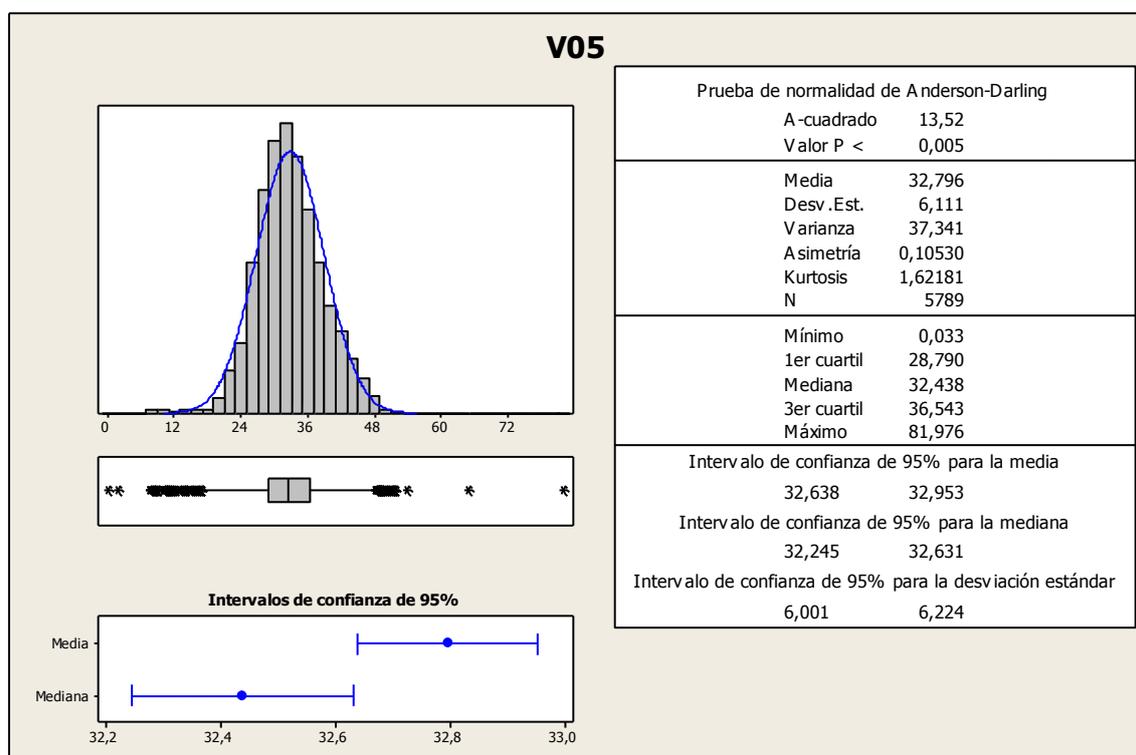


Figura 177. Estadísticas de la variable V05

Perfil de esta variable durante un proceso entero de calcinación

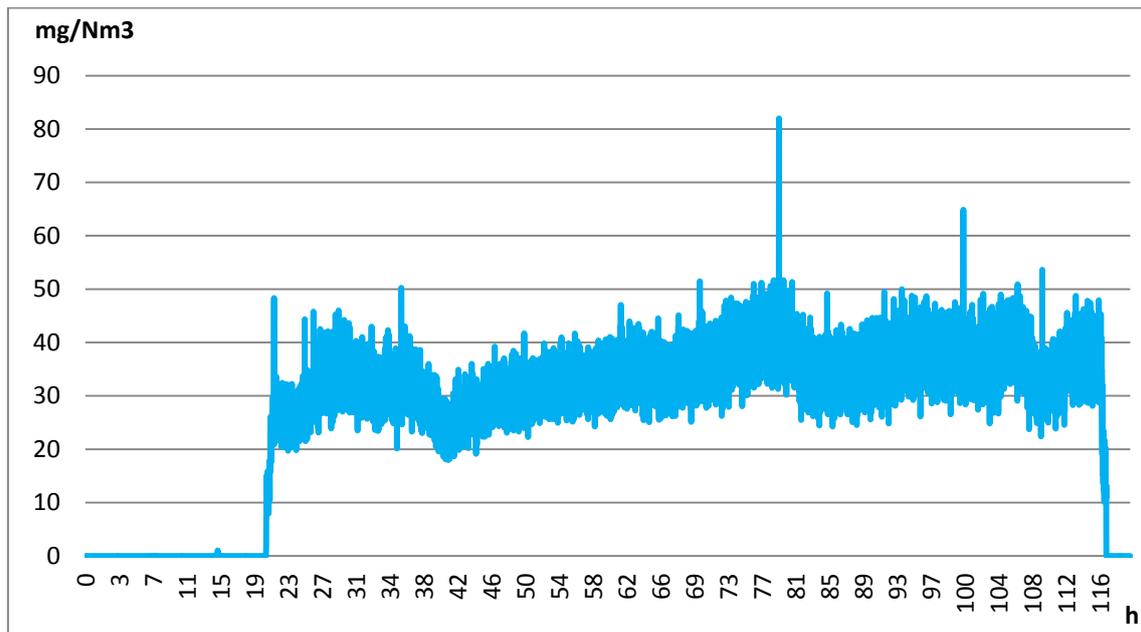


Figura 178. Perfil de la variable V05

Comentarios:

El perfil de la variable de partículas sólidas emitidas instantáneamente muestra una variación importante según los registros obtenidos.

Hipótesis afectación de esta variable con el resto de variables del sistema

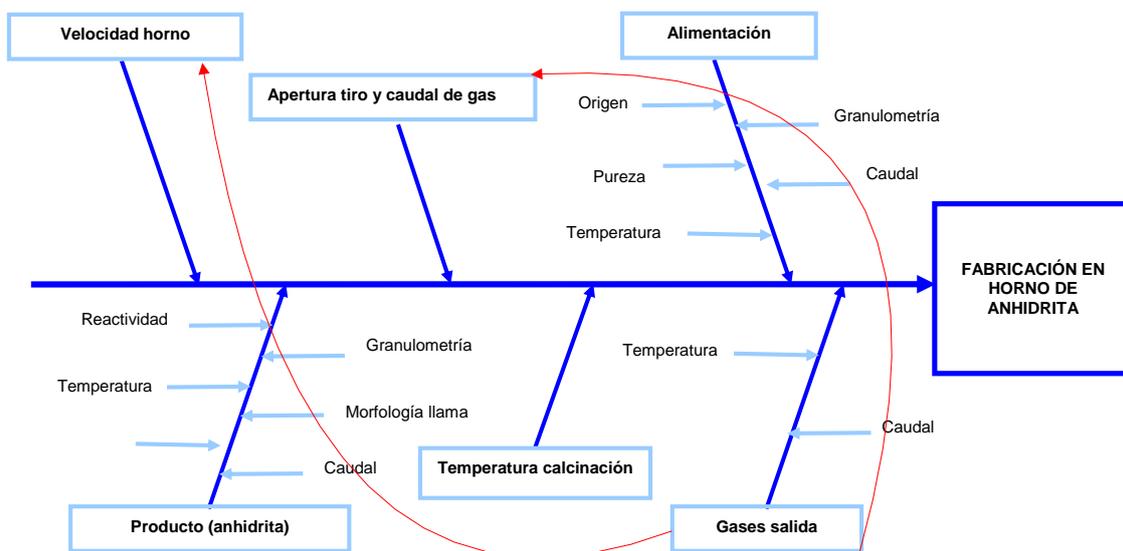


Figura 179. Diagrama causa-efecto de la variable V05

3.- Partículas sólidas emitidas en valor medio V07: Pm

Descripción

Partículas sólidas emitidas instantáneamente en el horno n°5

Tipo de medición

Instrumento: Auto-Scada

Toma de datos: Continuo

Fecha inicio toma de datos: 01/04/2010

Unidades: mg/Nm³

Resumen Estadístico de los resultados registrados

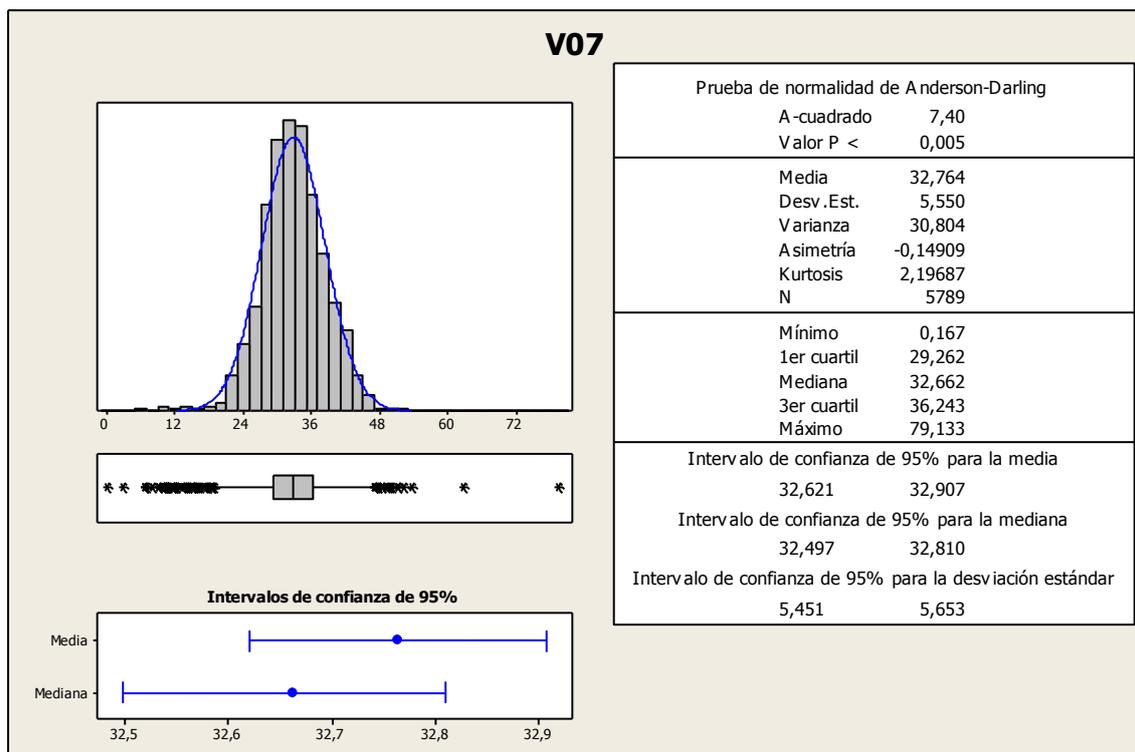


Figura 180. Estadísticas de la variable V07

Perfil de esta variable durante un proceso entero de calcinación

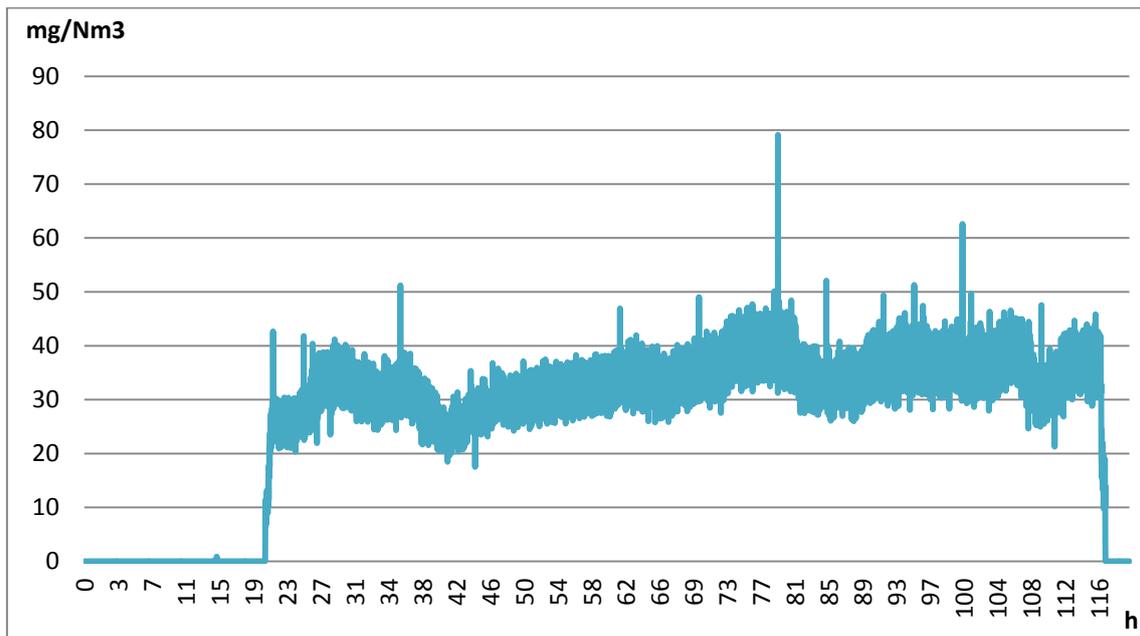


Figura 181. Perfil de la variable V07

Comentario:

El perfil de la variable de partículas sólidas emitidas media muestra una variación importante según los registros obtenidos.

Hipótesis afectación de esta variable con el resto de variables del sistema

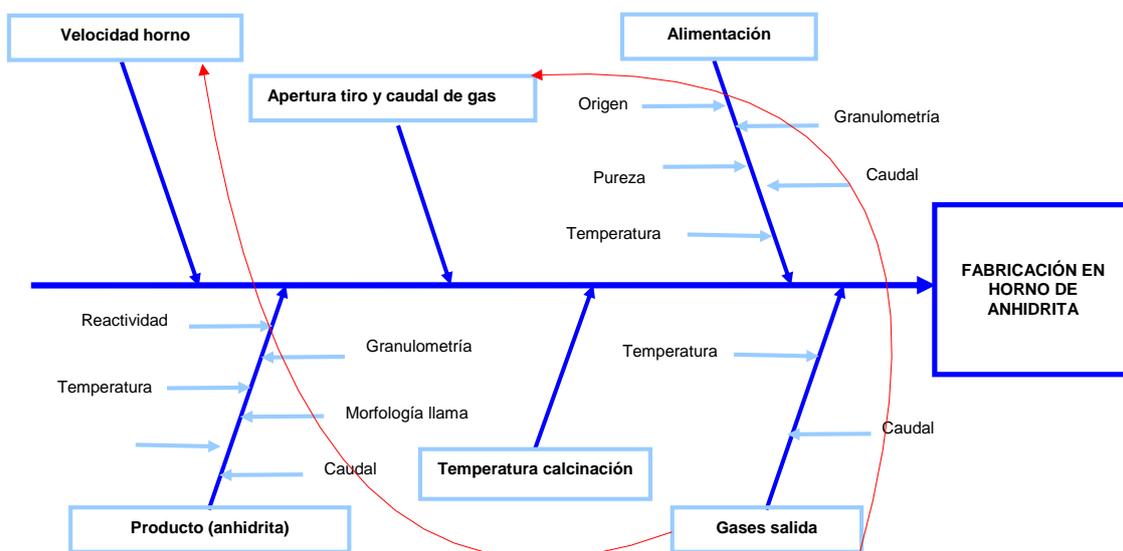


Figura 182. Diagrama causa-efecto de la variable V07

4.- Temperatura del refractario V09: Tr

Descripción

Temperatura del refractario S1 del horno nº5.

Tipo de medición

Instrumento: Auto-Scada

Toma de datos: Continuo

Fecha inicio toma de datos: 01/04/2010

Unidades: °C

Resumen Estadístico de los resultados registrados

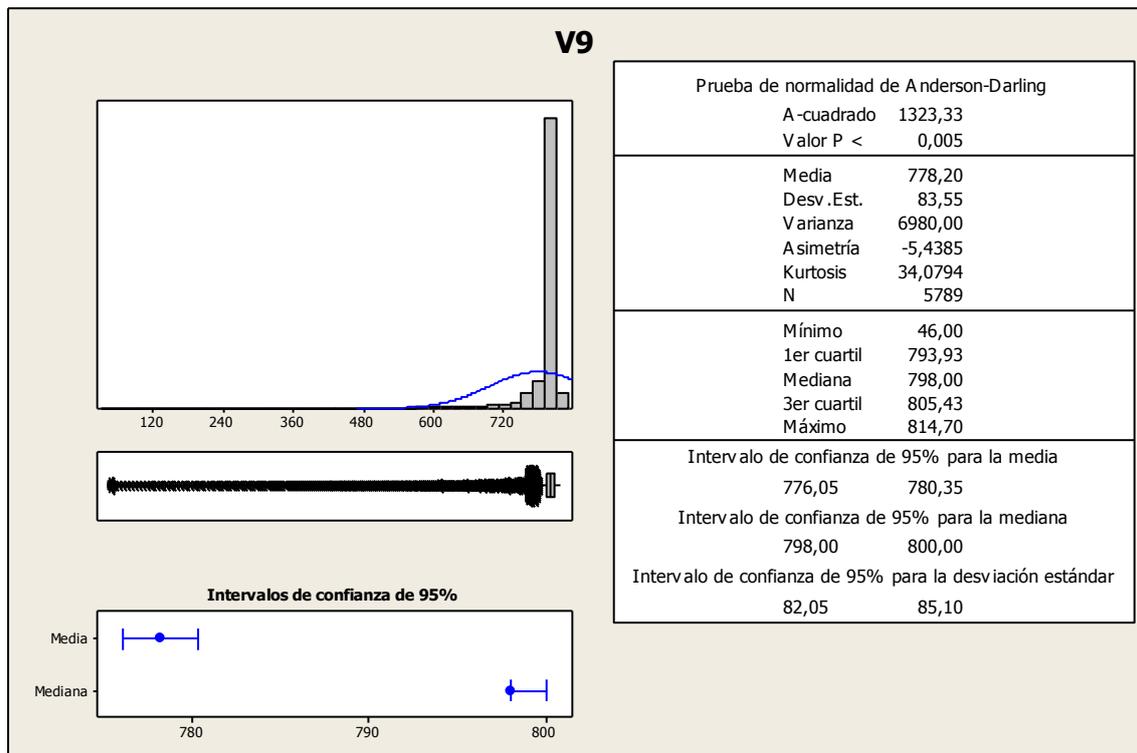


Figura 183. Estadísticas de la variable V09

Perfil de esta variable durante un proceso entero de calcinación

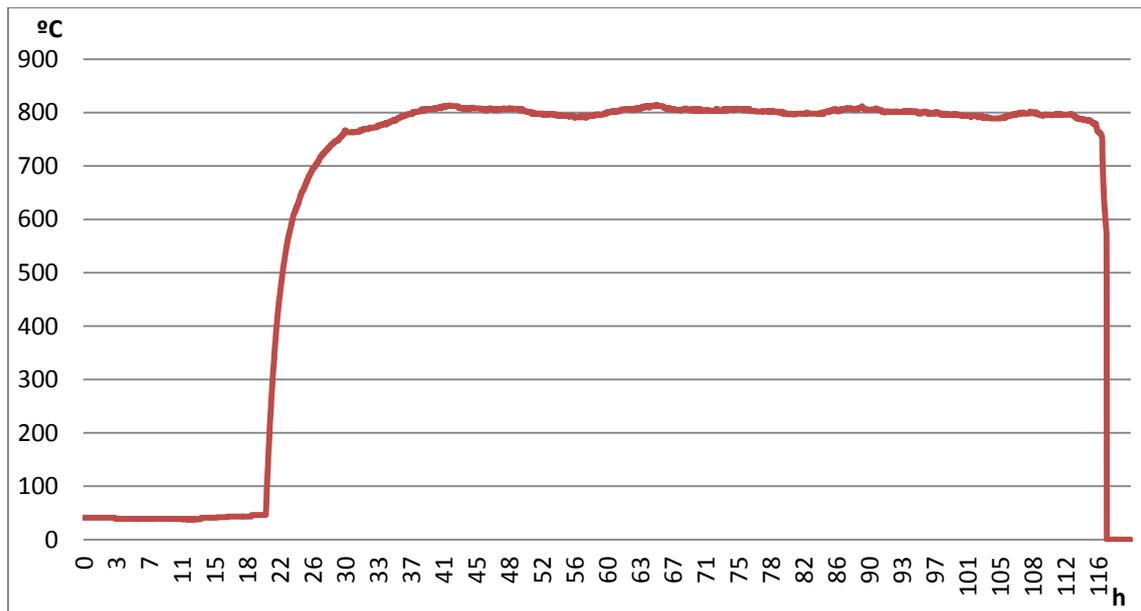


Figura 184. Perfil de la variable V09

Comentario

El perfil de la variable 9 de temperatura del refractario muestra unos registros muy lineales durante el periodo de funcionamiento del Horno 5. Se puede observar con detalle en el gráfico el incremento uniforme de temperatura entre el arranque del Horno 5 hasta la estabilización normal de temperaturas del refractario.

Hipótesis afectación de esta variable con el resto de variables del sistema

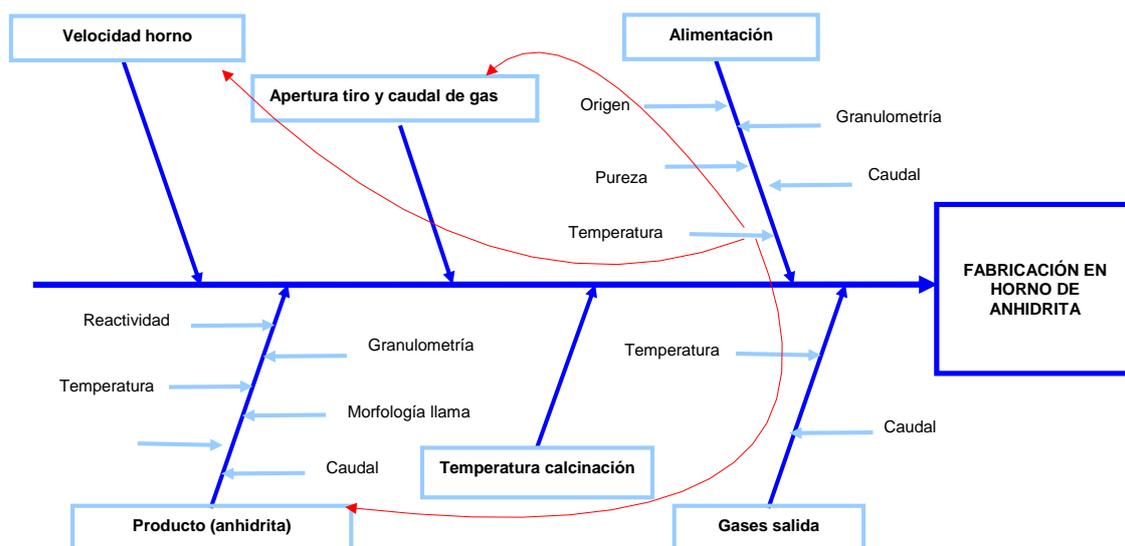


Figura 185. Diagrama causa-efecto de la variable V09

5.- Temperatura del refractario V11: Trman

Descripción

Temperatura del refractario S1 del horno nº5.

Tipo de medición

Instrumento: PT100, sonda digital.

Toma de datos: Cada 2 horas, manual por hornero.

Fecha inicio toma de datos 1/1/2006

Unidades: °C

Resumen Estadístico de los resultados registrados

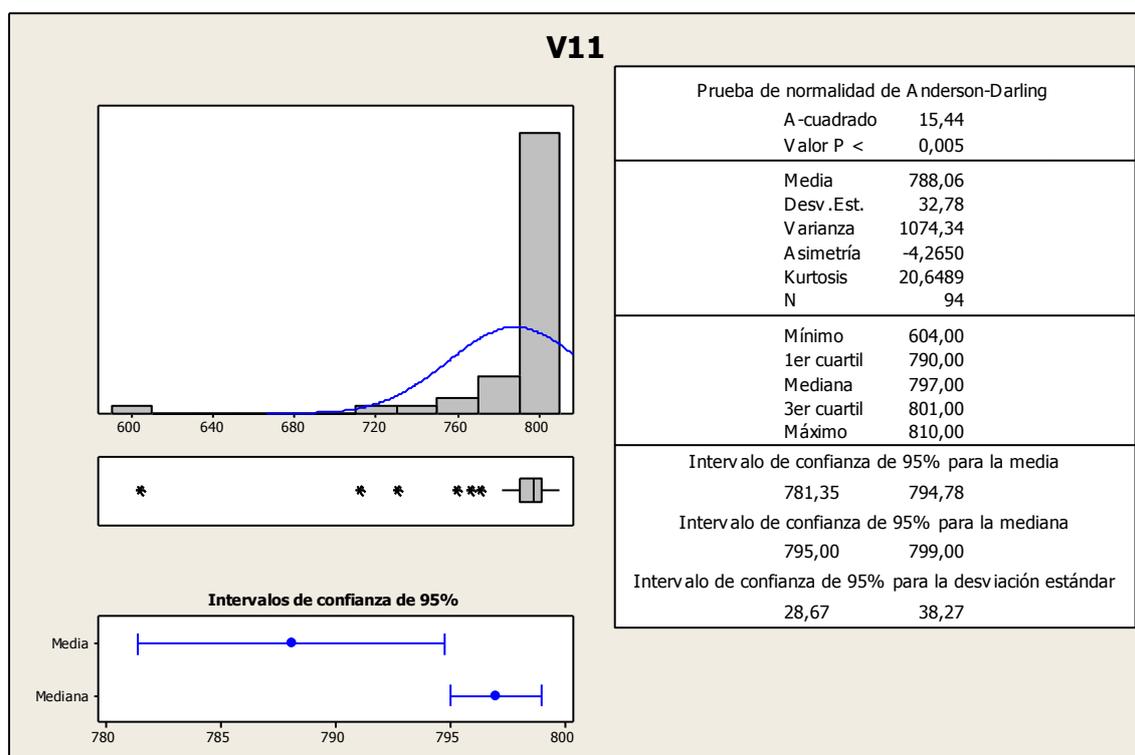


Figura 186. Estadísticas de la variable V11

Perfil de esta variable durante un proceso entero de calcinación

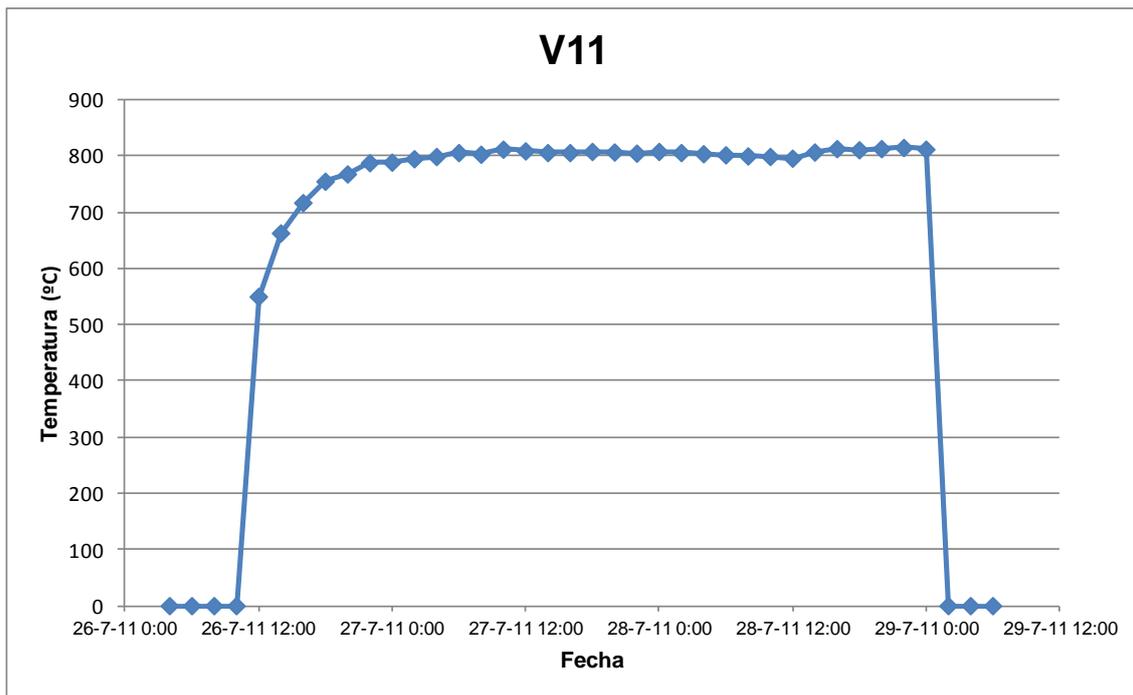


Figura 187. Perfil de la variable V11

Comentario

El perfil de la variable 11 de temperatura del refractario muestra unos registros muy lineales durante el periodo de funcionamiento del Horno 5. Se puede observar con detalle en el gráfico el incremento uniforme de temperatura entre el arranque del Horno 5 hasta la estabilización normal de temperaturas del refractario.

Hipótesis afectación de esta variable con el resto de variables del sistema

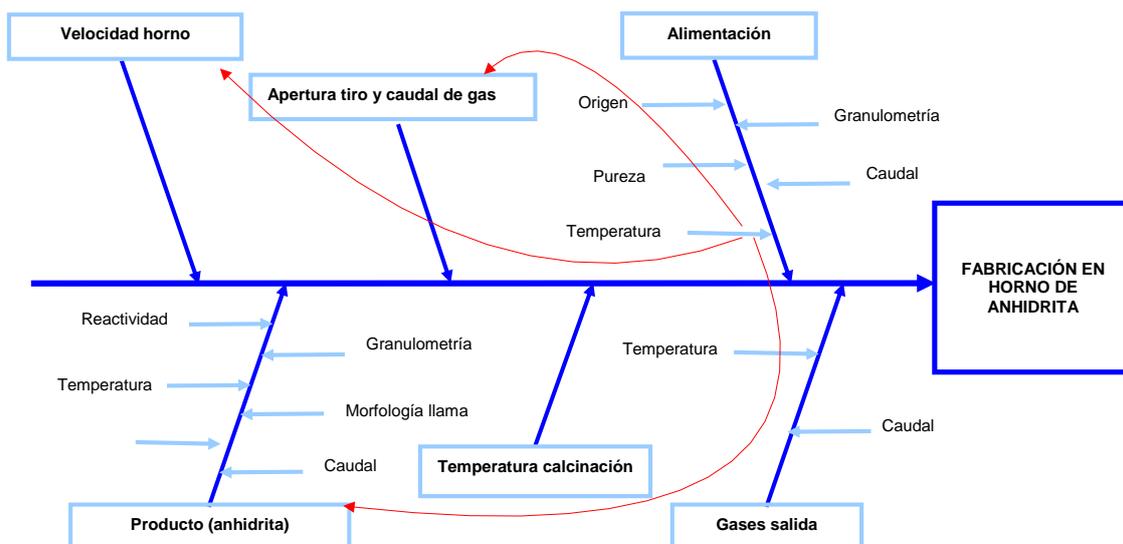


Figura 188. Diagrama causa-efecto de la variable V11

6.- Temperatura del Material V13: Tm

Descripción

Temperatura material S2 Horno 5

Tipo de medición

Instrumento: Auto-Scada

Toma de datos: Continuo

Fecha inicio toma de datos: 01/04/2010

Unidades: °C

Resumen Estadístico de los resultados registrados

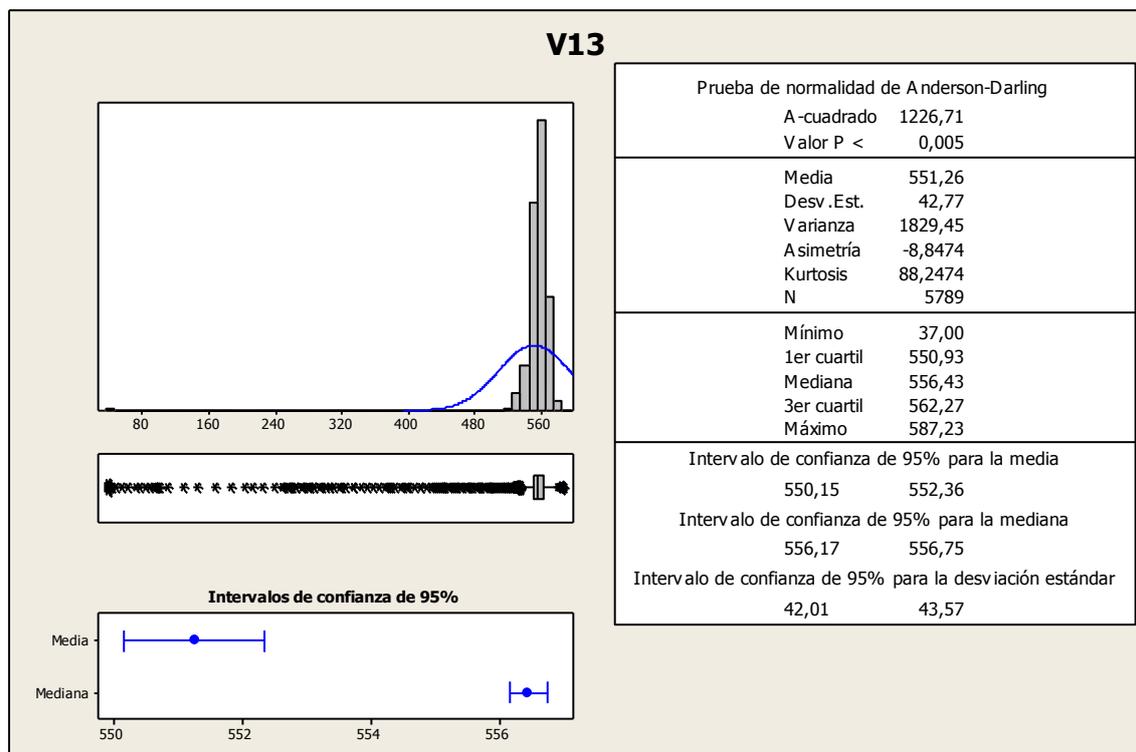


Figura 189. Estadísticas de la variable V13

Perfil de esta variable durante un proceso entero de calcinación

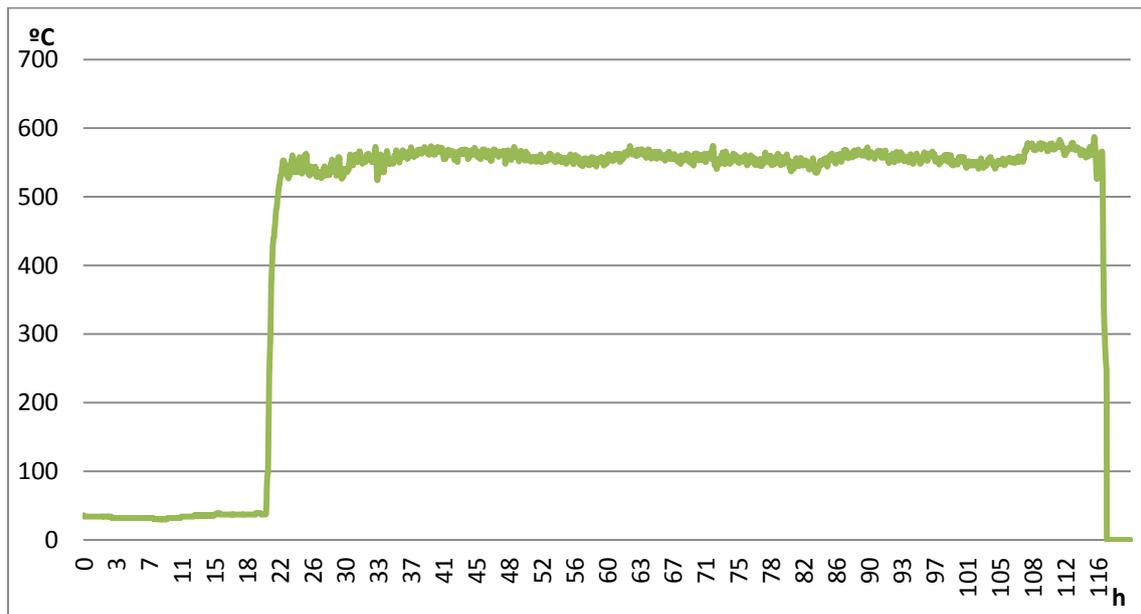


Figura 190. Perfil de la variable V13

Comentario

El perfil de la variable de temperatura del material muestra en el gráfico el proceso desde el arranque hasta la parada del Horno 5, mostrando una linealidad poco variable. Se trata de la variable de proceso más importante, ya que es consigna.

Hipótesis afectación de esta variable con el resto de variables del sistema

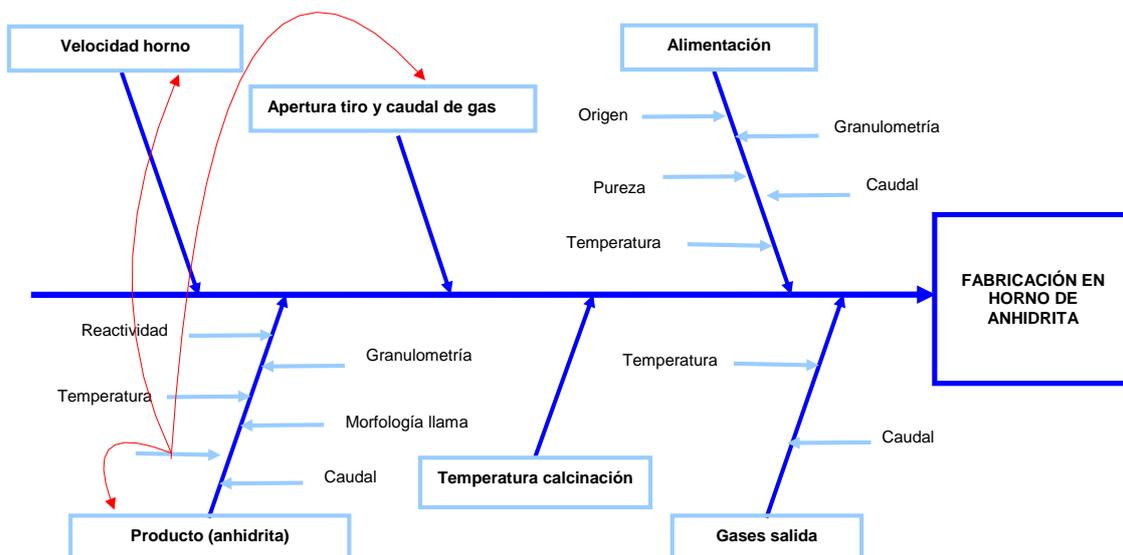


Figura 191. Diagrama causa-efecto de la variable V13

7.- Caudal de gas V17: Qg

Descripción

Consumo de gas instantáneo para el horno nº5

Tipo de medición

Instrumento: Auto-Scada

Toma de datos: Continuo

Fecha inicio toma de datos: 01/04/2010

Unidades: m³/h

Resumen Estadístico de los resultados registrados

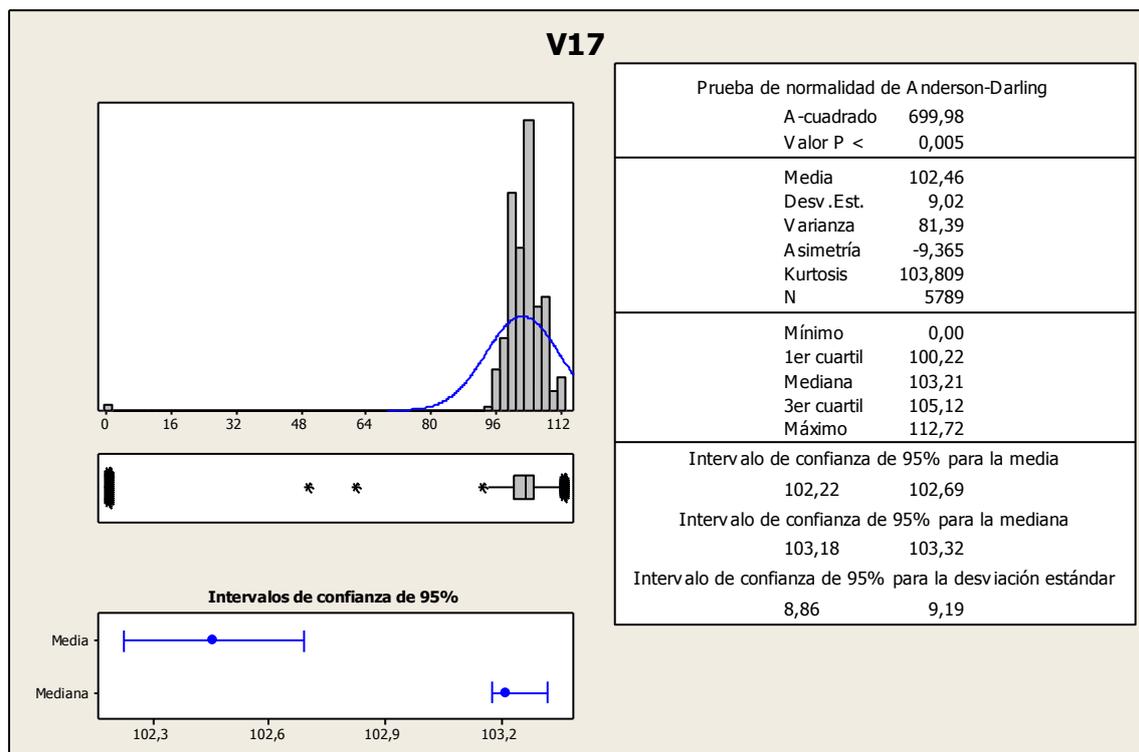


Figura 192. Estadísticas de la variable V17

Perfil de esta variable durante un proceso entero de calcinación

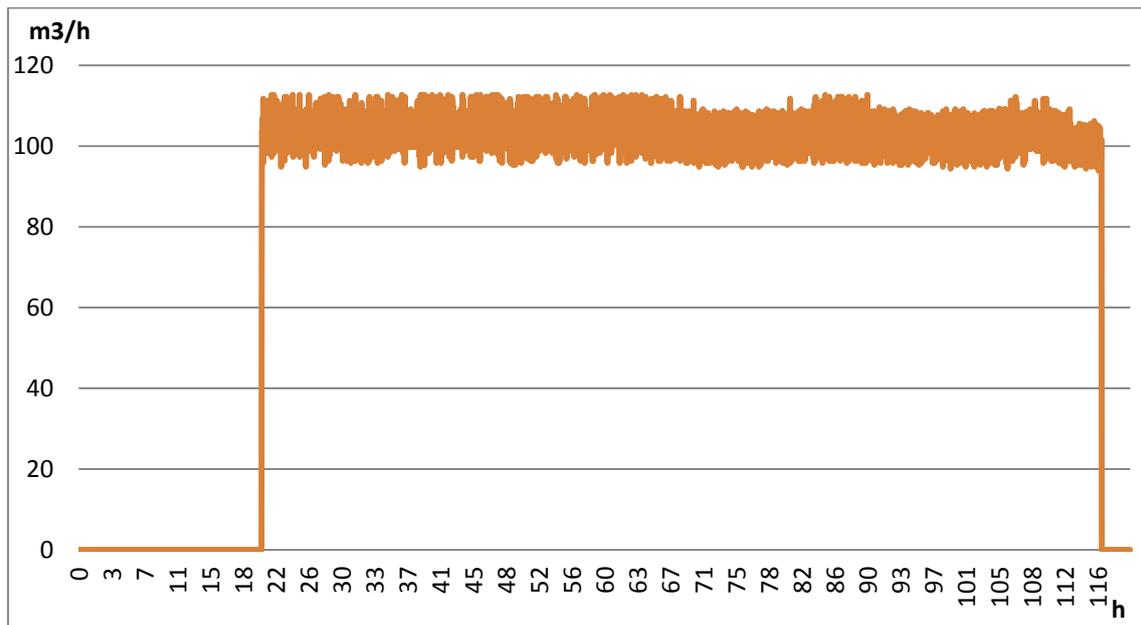


Figura 193. Perfil de la variable V17

Comentario:

El perfil de la variable registra el consumo de gas instantáneo del Horno 5. Se puede observar un consumo generalmente lineal, presentando valores mínimos de 96.3 m³/h y máximos de 105.1 m³/h

Hipótesis afectación de esta variable con el resto de variables del sistema

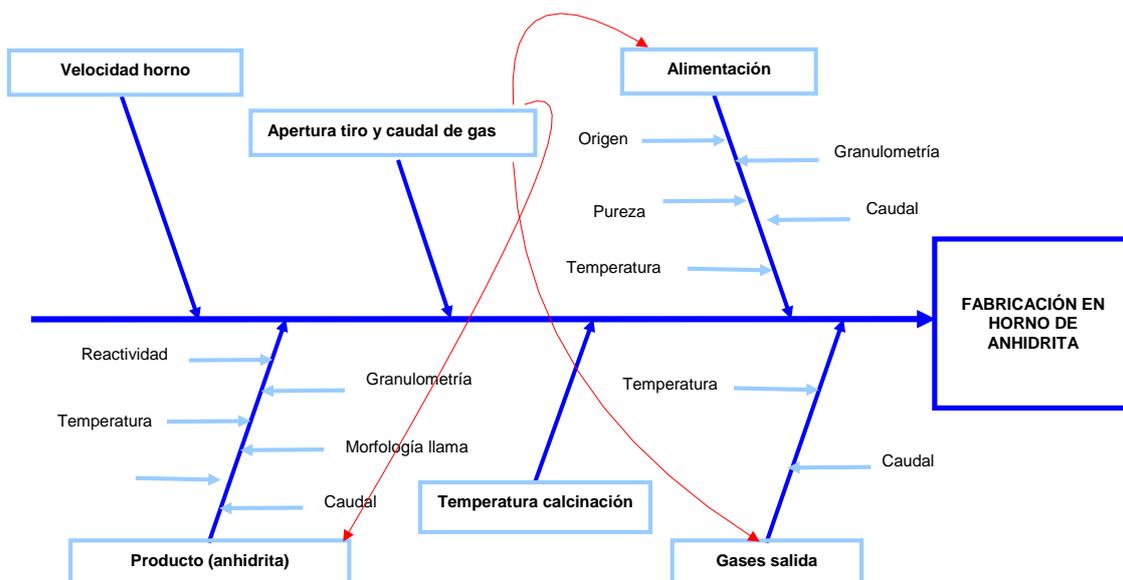


Figura 194. Diagrama causa-efecto de la variable V17

8.- Volumen de gas instantáneo V19: Vg

Descripción

Volumen de gas instantáneo acumulado para el horno nº5

Tipo de medición

Instrumento: Lectura contador

Toma de datos: Diario

Fecha inicio toma de datos 1/1/2006

Unidades: m³

Resumen Estadístico de los resultados registrados

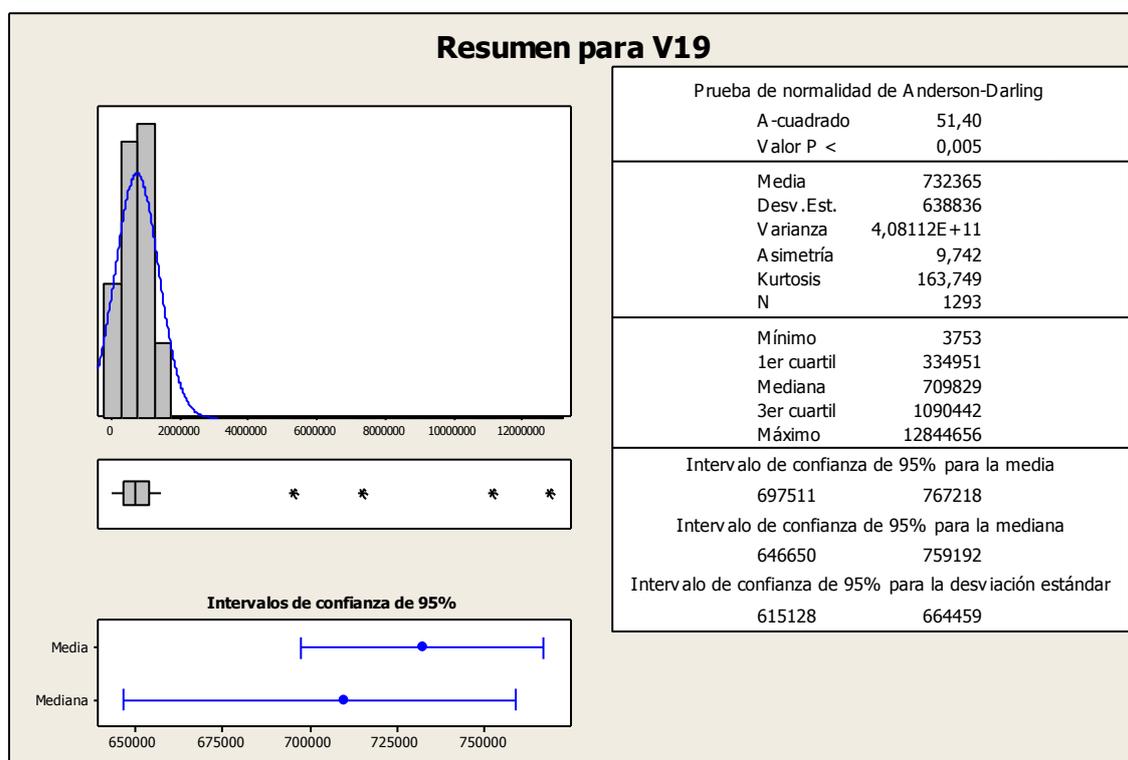


Figura 195. Estadísticas de la variable V19

Comentario

Al ser un registro acumulado no tiene sentido su representación gráfica.

Hipótesis afectación de esta variable con el resto de variables del sistema

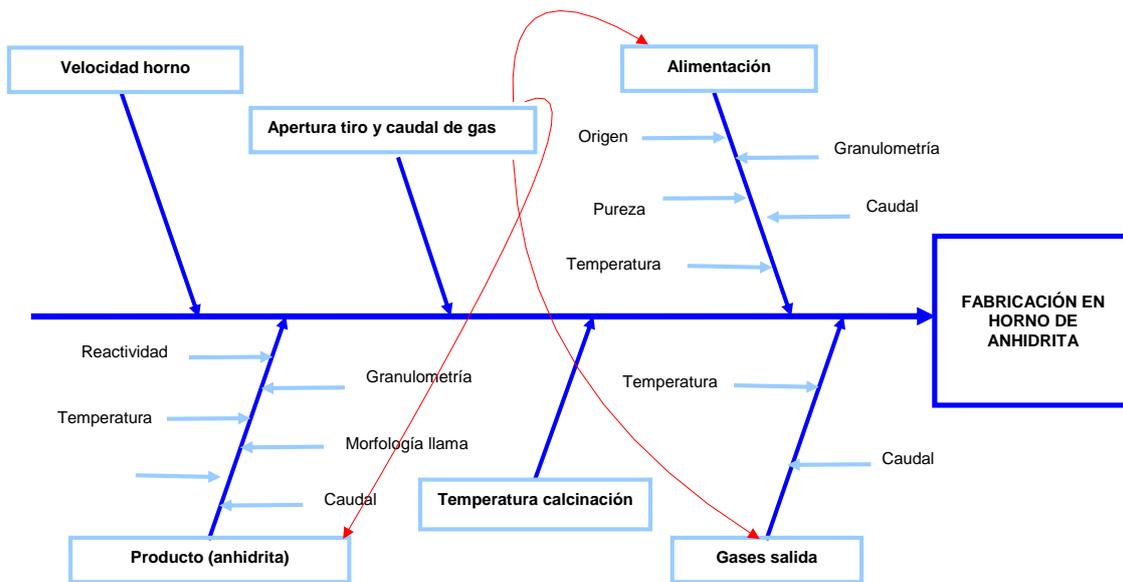


Figura 196. Diagrama causa-efecto de la variable V19

9.- Temperatura de salida del material V21: Ts

Descripción

Temperatura material calcinado S3 del horno n°5

Tipo de medición

Instrumento: Sonda manual

Toma de datos: Cada 2 horas

Fecha inicio toma de datos: 01/04/2010

Unidades: °C

Resumen Estadístico de los resultados registrados

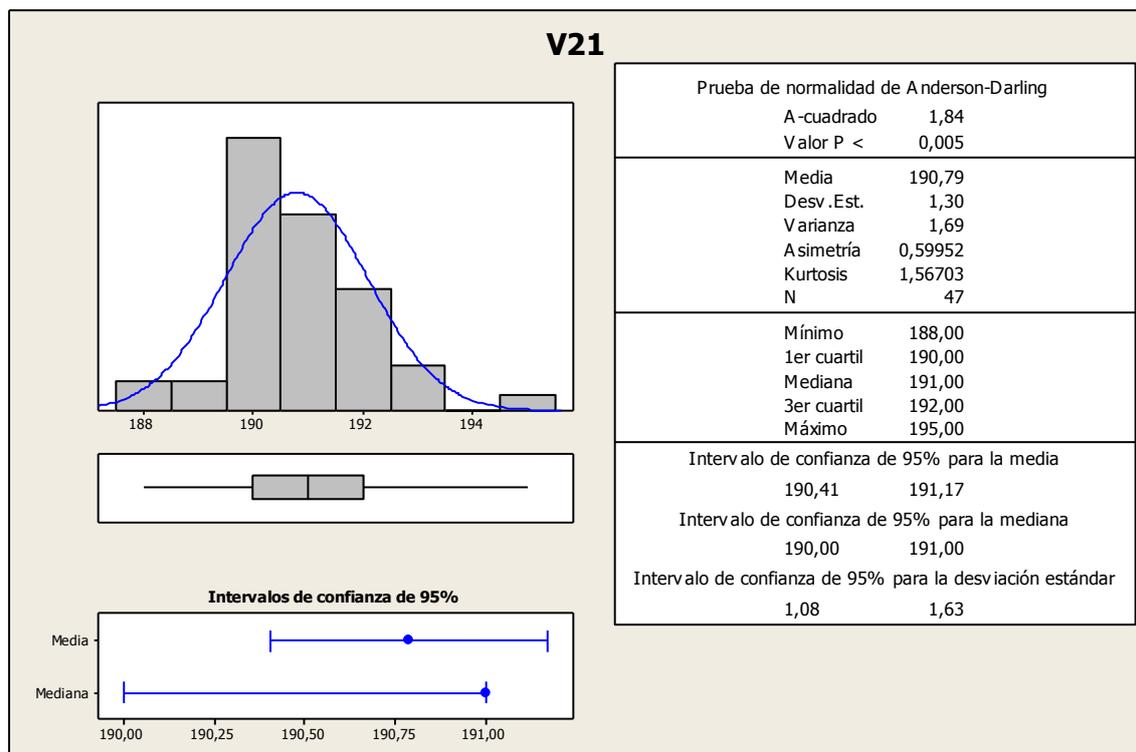


Figura 197. Estadísticas de la variable V21

Perfil de esta variable durante un proceso entero de calcinación

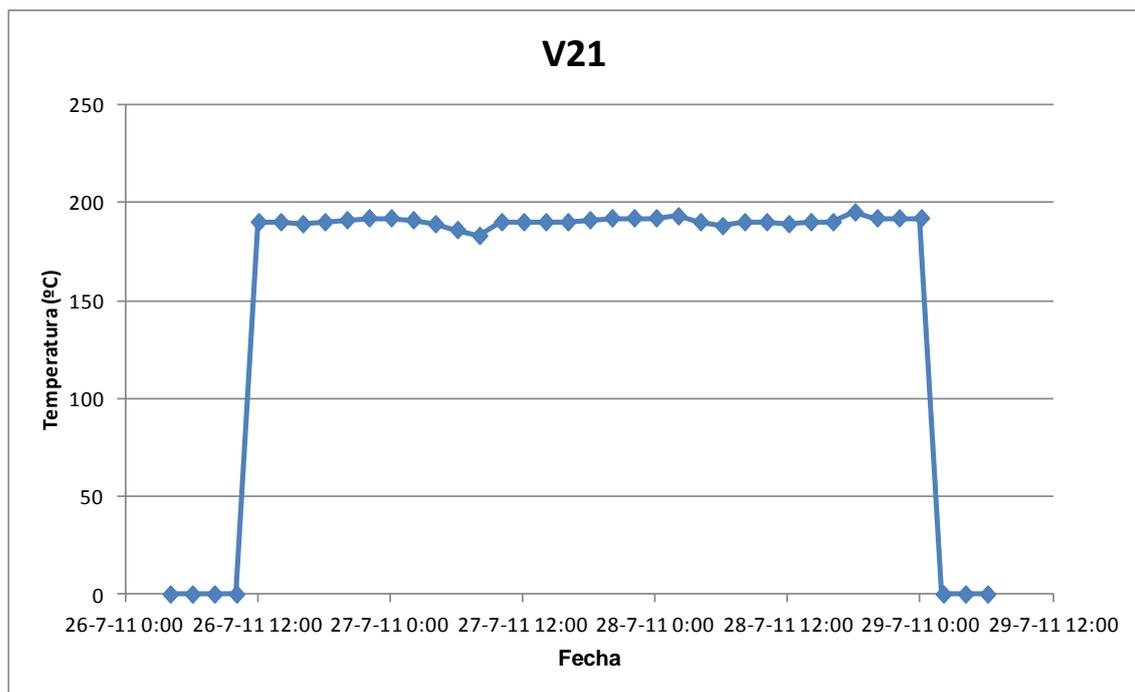


Figura 198. Perfil de la variable V21

Comentarios: El perfil de la variable V21 de temperatura del material calcinado a la salida del horno 5 muestra en el gráfico el proceso desde el arranque hasta la parada del mismo, registrándose así las temperaturas del material después de ser calcinado. Al final del proceso se pueden observar diferencias de temperaturas de 12°C (un intervalo con una temperatura mínima de 183°C y una temperatura máxima de 195°C)

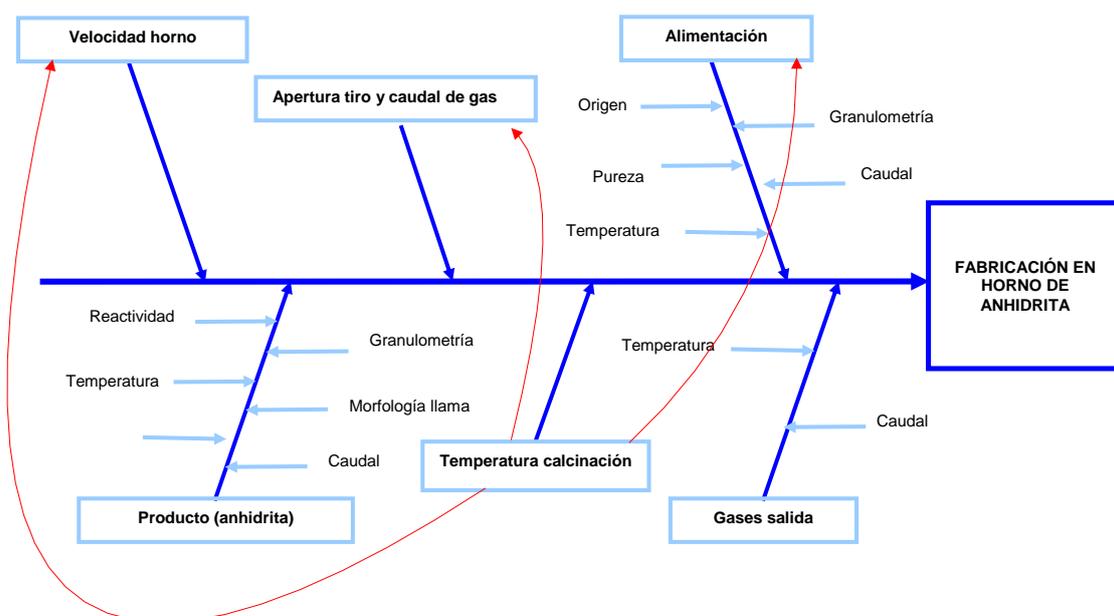


Figura 199. Diagrama causa-efecto de la variable V21

10.- Temperatura de emisión V23: Te

Descripción

Temperatura del filtro de mangas del horno nº5. Esta temperatura es indicador de la temperatura de salida de los humos de combustión del horno.

Tipo de medición

Instrumento: PT100, sonda digital.

Toma de datos: Cada 2 horas, manual por hornero.

Fecha inicio toma de datos 1/1/2006

Unidades: °C

Resumen Estadístico de los resultados registrados

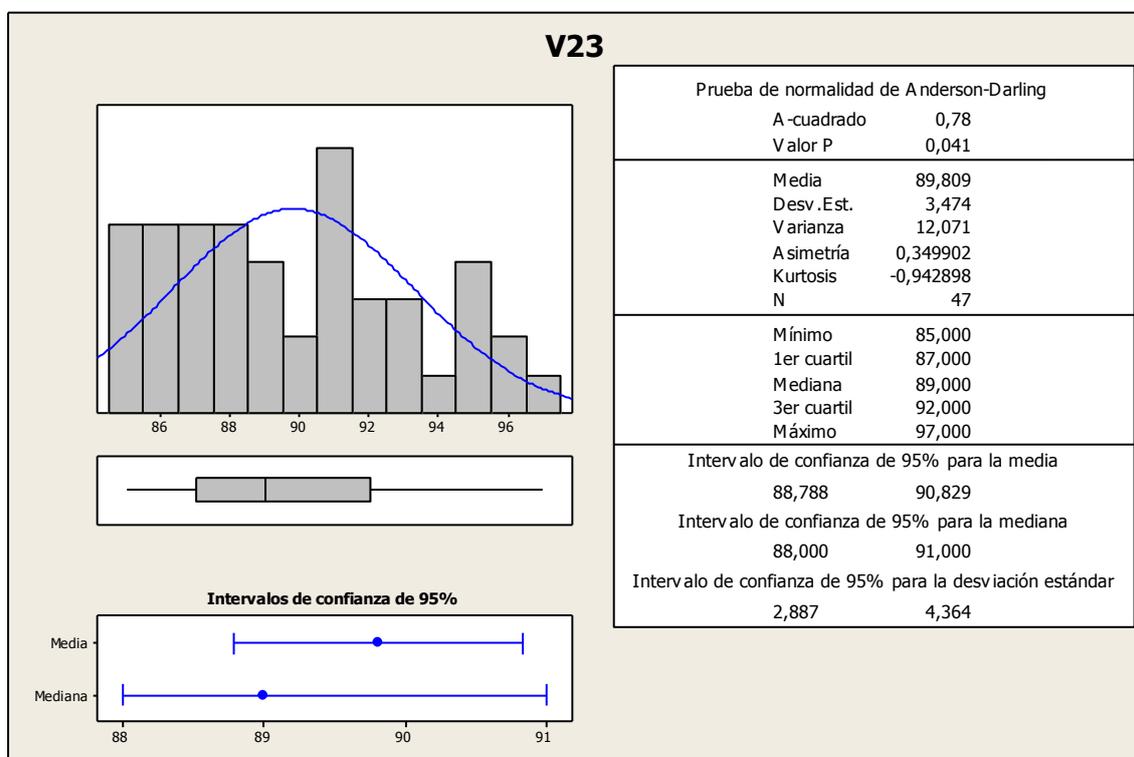


Figura 200. Estadísticas de la variable V23

Perfil de esta variable durante un proceso entero de calcinación

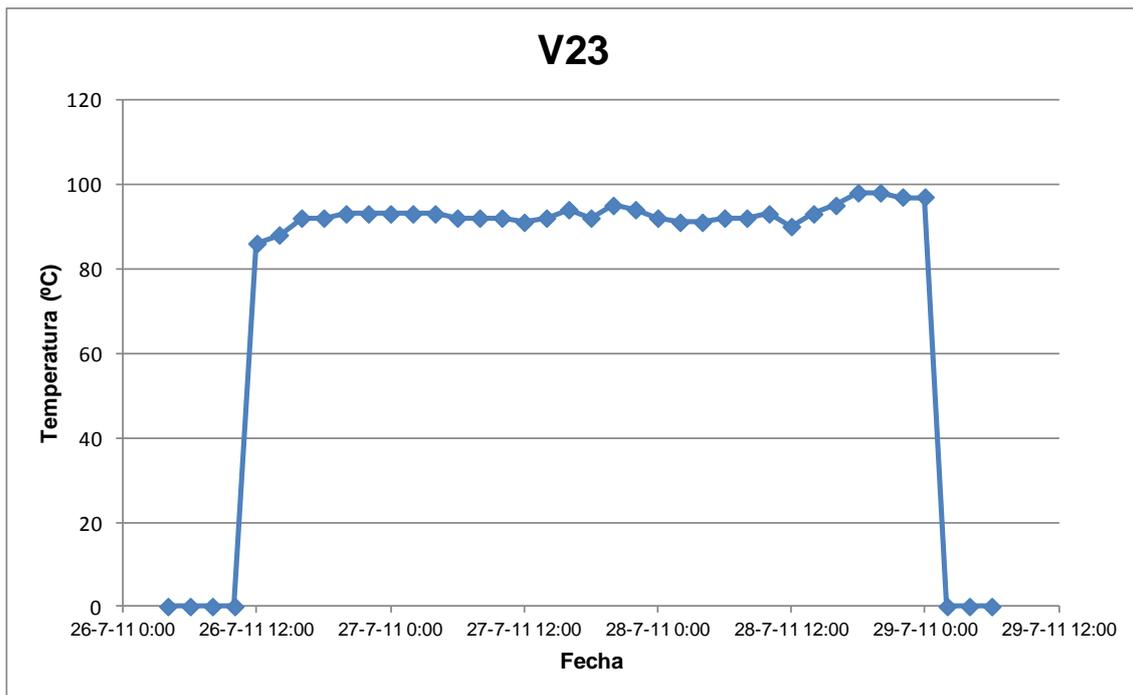


Figura 201. Perfil de la variable V23

Comentario

El perfil de la variable de temperatura del filtro de mangas muestra en el gráfico el proceso desde el arranque hasta la parada del mismo, registrándose así las temperaturas de salida de humos durante todo el proceso de calcinación. Durante este proceso se pueden observar diferencias de temperaturas de 12°C (un intervalo con una temperatura mínima de 86°C y una temperatura máxima de 98°C)

Hipótesis afectación de esta variable con el resto de variables del sistema

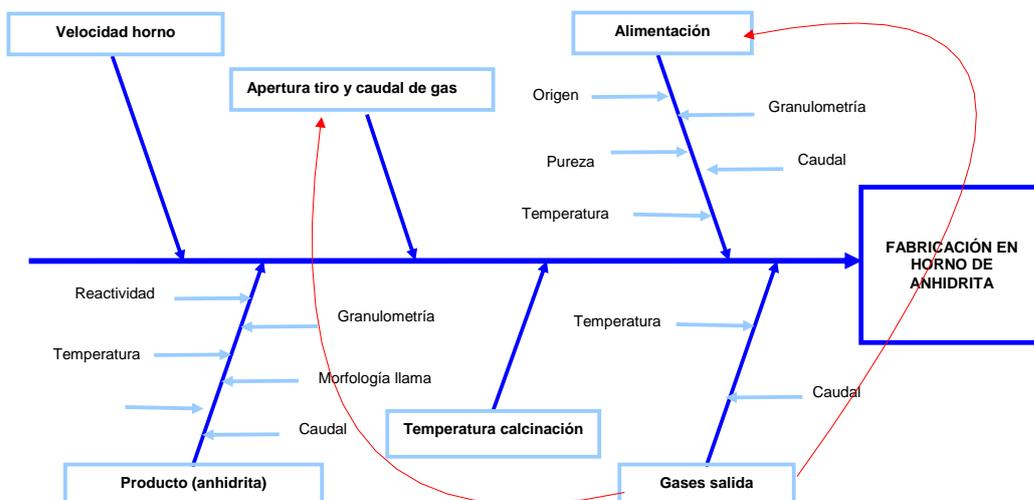


Figura 202. Diagrama causa-efecto de la variable V23

11.- Caudal de emisiones V31: Qe

Descripción

Se trata del caudal de emisión de gases del horno nº5.

Tipo de medición

Instrumento: Opacidad y análisis de las emisiones

Toma de datos: Anual

Fecha inicio toma de datos 1/1/2008

Unidades: Nm₃/h

Resumen Estadístico de los resultados registrados

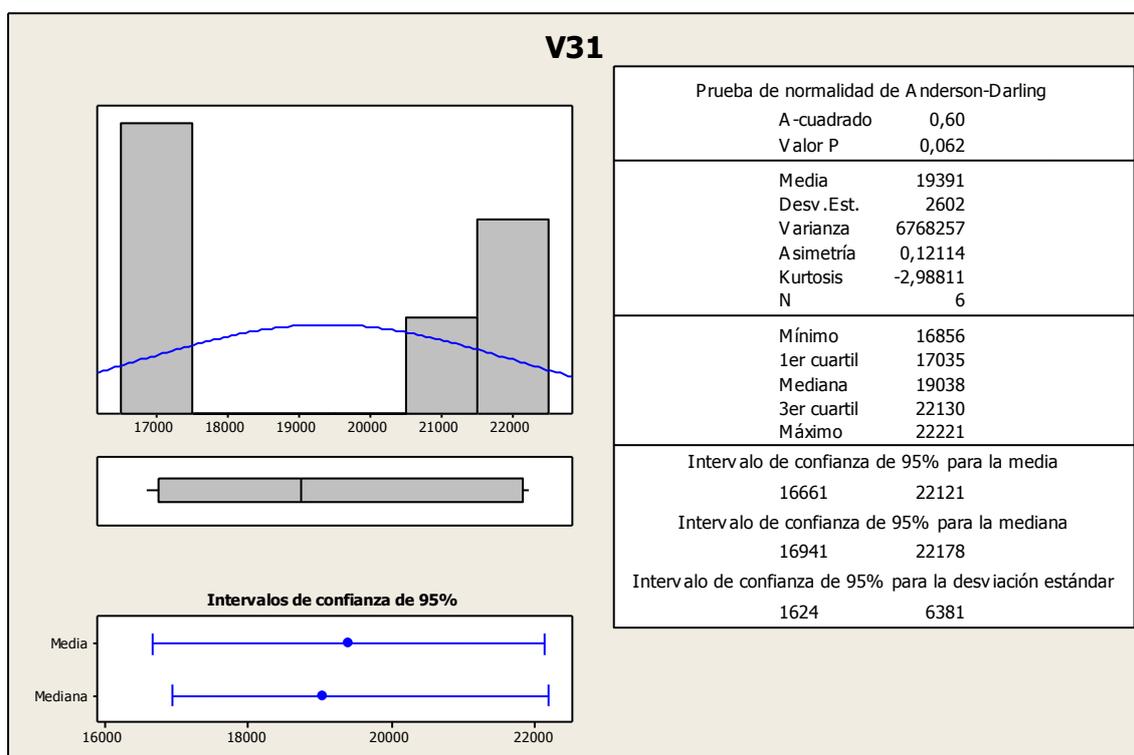


Figura 203. Estadísticas de la variable V31

Comentario

No tiene sentido realizar el perfil de la variable, ya que hasta el momento los datos registrados son muy distanciados en el tiempo.

Hipótesis afectación de esta variable con el resto de variables del sistema

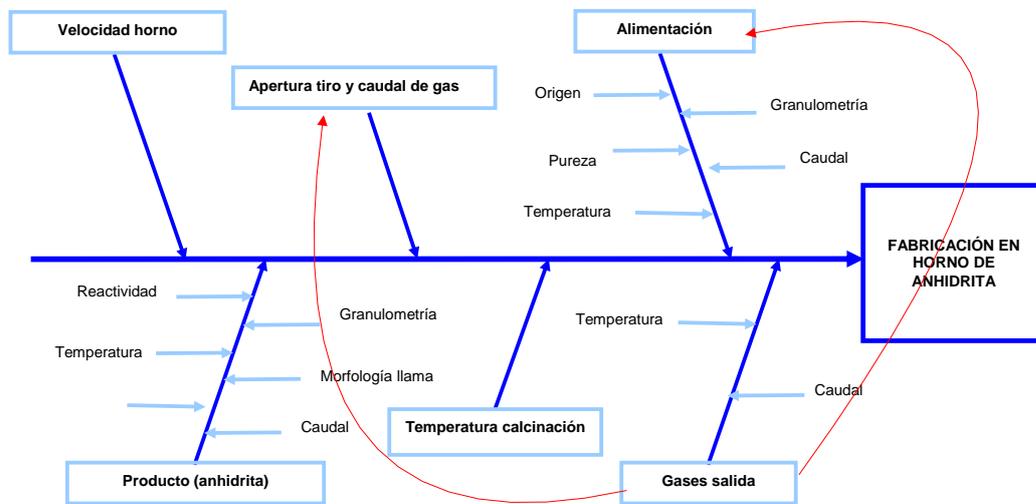


Figura 204. Diagrama causa-efecto de la variable V31

