

Notes sobre gestió de la producció

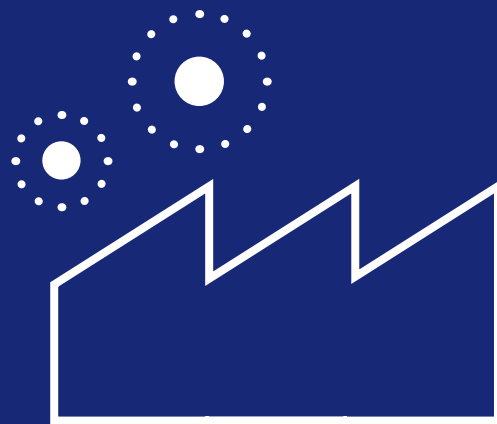
Martí Casadesús Fa

Josep Llach Pagès

Departament d'Organització,
Gestió Empresarial i Disseny del Producte

Frederic Marimon Viadiu

Facultat de Ciències Econòmiques i Socials
(Universitat Internacional de Catalunya)



Notes sobre gestió de la producció

Martí Casadesús Fa

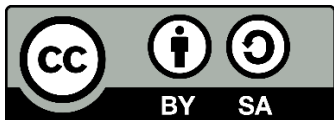
Josep Llach Pagès

Departament d'Organització,
Gestió Empresarial i Disseny del Producte

Frederic Marimon Viadiu

Facultat de Ciències Econòmiques i Socials
(Universitat Internacional de Catalunya)





Aquesta obra està subjecta a la llicència Reconeixement-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-SA 4.0). Sempre que se'n citi l'autoria podeu reproduir-la, distribuir-la, comunicar-la públicament i transformar-la o adaptar-la. Si la transformeu o adapteu l'obra resultant l'heu de difondre amb la mateixa llicència que l'obra original. La llicència completa es pot consultar a <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.ca>.

© **dels textos:** els autors corresponents

Edita: Universitat de Girona – Servei de Publicacions

ISBN: 978 84 8458 640 1

Girona, febrer de 2023

Índex

Presentació	5
Capítol 1: Gestió de la producció i estratègies de planificació i procés	7
Capítol 2: Anàlisi i disseny de processos de producció	13
Capítol 3: Previsió de la demanda de producció	21
Capítol 4: Pla agregat i pla mestre de producció	27
Capítol 5: Planificació de les necessitats de material	37
Capítol 6: Programació a curt termini	45
Capítol 7: Gestió d'estocs.....	51
Capítol 8: Just-in-time	65
Capítol 9: Sistemes de cues d'espera	71
Capítol 10: Gestió de la qualitat	83
Capítol 11: Gestió de projectes	89

Presentació

La publicació “Notes sobre gestió de la producció” és un text que recull, en 11 capítols, diferents temàtiques clau en la gestió dels sistemes productius. Iniciant-se en els aspectes estratègics d’aquesta gestió, i de forma seqüencial, el document acaba desenvolupant els temes de caire més operatiu. Així es tracten aspectes com el càlcul de la previsió de vendes, el pla mestre de producció, la gestió de les necessitats de materials o MRP, la gestió d’estocs, la gestió de projectes, la gestió de la qualitat, la gestió de cues, el just-in-time, etc.

Ara bé, aquest no és un text extens i detallat al respecte, com la majoria dels manuals en la matèria, sinó justament el contrari. Es tracta d’un text molt concís i sintètic, que té com a únic objectiu orientar als lectors al respecte de cada temàtica. És per aquest fet que s’ha titulat el document específicament com a “notes”.

Així doncs, aquest és un text inicial o complementari per aquells estudiants que cursen matèries vinculades a la “Gestió de la producció” i que sens dubte caldrà que complementin amb d’altres recursos com son les pròpies classes de la matèria, llibres amb problemes resolts, manuals específics per a cada temàtica, etc.

Capítol 1: Producció i estratègies de producció i procés

Objectiu: Entendre l'objectiu de la gestió de la producció i les principals estratègies de planificació i de procés productiu.

Resultats d'aprenentatge:

Comprendre els objectius i reptes de la gestió de la producció.

Estratègies de planificació de la producció.

Estratègies de planificació del procés productiu.

1. Què és la gestió de la producció?

El terme *gestió de la producció* o *direcció d'operacions* fa referència a la utilització de mètodes i tècniques per tal que les matèries primeres s'acabin convertint en productes acabats. Aquest procés es fonamenta en un conjunt d'activitats en què prenen part matèries primeres, components, productes acabats, recursos humans, centres de treball, màquines, etc., amb l'objectiu de lliurar un producte final en la quantitat i qualitat desitjats.

L'adequada gestió de la producció ha de permetre una planificació ideal, una organització adequada i un control final de totes les etapes implicades en l'elaboració i lliurament del producte final. Tot això amb l'objectiu d'obtenir la màxima productivitat. Amb aquests objectius, les principals funcions de la gestió de la producció són:

- **Definició dels processos de producció:**
Escollir el procés de producció més adequat, decidint sobre el tipus de tecnologia, les màquines, els sistemes de manipulació de materials, etc. En aquest procés cal determinar també la capacitat de producció adequada per tal de satisfer la demanda del producte, de forma que s'obtingui la màxima productivitat possible.
- **Planificació de la producció:**
Planificar la capacitat de producció, tant a llarg, com a mitjà i curt termini. A tal efecte, caldrà preveure quina és la demanda prevista de cada producte, o família de productes, i a partir d'aquí, planificar la producció a portar a terme.

L'objectiu serà trobar la millor i més econòmica opció a seguir en el procés de fabricació, determinant quan comença i quan acaba cadascuna de les operacions productives, assegurant un flux de treball sense problemes que compleixi la demanda dels clients.

- **Control dels processos productius:**
El control de processos s'estableix per, en primer lloc, garantir que les operacions es realitzen d'acord amb el pla, i en segon lloc, supervisar i avaluar contínuament el pla de

producció per tal de veure si s'hi poden introduir modificacions i complir millor els objectius de cost, qualitat, lliurament, flexibilitat, etc.

- Control i gestió de la qualitat dels productes:
Assegurar que els productes s'ajusten a la qualitat sol·licitada pels clients, als costos de producció més baixos possibles. Per tal de satisfer la demanda, la gestió de la qualitat ha de millorar constantment la qualitat dels productes.
- Gestió dels estocs:
Cal optimitzar i controlar el nivell dels estocs de tots els productes, de manera que es minimitzin al màxim els costos deguts als principals problemes que poden haver-hi: mantenir un estoc excessiu al magatzem, que provoca costos innecessaris d'emmagatzematge, o tenir un estoc excessivament reduït per a la demanda existent, que provoca pèrdues o retards de vendes.
- Gestió del manteniment de les màquines:
Cal assegurar el manteniment adequat i la substitució de les màquines i equips quan sigui necessari. Per tant, cal elaborar plans de gestió del manteniment que evitin avaries a les màquines i la consegüent aturada de la producció.

D'aquesta manera, una adequada implementació d'un procés de gestió de la producció pot aportar múltiples beneficis:

- Millorar la coordinació integral de tots els processos productius.
- Disposar d'una informació fiable i actualitzada de la planta productiva per a la presa de decisions.
- Aconseguir una major eficàcia i productivitat, amb un estalvi de costos i temps de producció.
- Desenvolupar plans alternatius per a fer front a qualsevol emergència o imprevist en la planificació de la producció.

Si bé, des dels seus inicis, la gestió de la producció ha estat orientada a la gestió de béns físics, també és aplicable a serveis. I de fet, ho és cada cop més tenint present l'orientació que pren la indústria cap al futur. Cal tenir present, però, el que diferencia la gestió d'un bé físic de la d'un servei, que pot resumir-se en:

- El servei és intangible.
- La prestació del servei és heterogènia. Dos proveïdors d'un mateix servei prestaran serveis diferents; fins i tot el mateix proveïdor no és capaç de proveir sempre el servei amb els mateixos estàndards.
- El servei es produeix i consumeix alhora. D'aquest fet es desprenen dues conseqüències: no es pot emmagatzemar i cal fer-ho bé a la primera, no hi ha segona oportunitat.
- El servei permet una alta interacció amb el client durant el procés.
- El servei sovint està basat en el coneixement.
- La manera d'avaluar la qualitat és més complexa en els serveis.
- La qualitat dels serveis depèn molt de les persones (motivació dels empleats).

2. Estratègies de planificació de la producció

De forma general, en la planificació de la producció es poden establir dues estratègies principals que poden seguir les empreses. L'estratègia escollida dependrà de si es comença a produir una vegada ja s'ha rebut una determinada comanda, o de si el sistema produeix constantment, amb independència de les comandes rebudes. Concretament, són les següents:

- **MTO (*make-to-order*)**. Estratègia de producció contra demanda.
Aquesta estratègia es correspon a la de producció contra demanda en la qual l'empresa únicament disposa d'estoc de matèries primeres i produeix cada article a mesura que rep les comandes. Es pot dir que és l'estratègia de produir per encàrrec. Així, només es comença la producció d'una unitat quan es rep una comanda. Per tant, es produeix justament per atendre aquesta comanda. D'aquesta manera es permet la personalització i atendre els requisits específics del client. En aquest cas no hi ha mai estoc de producte acabat. Té l'inconvenient que el client ha d'esperar des que fa la comanda fins que se li lliura el producte: és el temps que cal per a la fabricació del producte o per completar el servei. Generalment es porta a terme quan es permet un alt grau de personalització dels articles per part del client, malgrat que augmenti considerablement el temps de lliurament del producte.
- **MTS (*make-to-stock*)**. Estratègia de producció contra estoc.
És just al contrari de l'anterior estratègia, atès que la producció del bé es realitza abans que hi hagi una comanda concreta. És a dir, es produeix i el producte acabat s'emmagatzema, cosa que assegura que el producte final es pugui lliurar al client en el moment de la seva comanda. A tal efecte, cal que el producte sigui totalment estandarditzat, atès que en el moment en què es fabrica una unitat concreta encara no se sap quin client ho rebrà. Les comandes se serviran des de l'inventari de producte acabat, ja que, de fet, l'empresa disposarà de tot tipus d'estoc: matèries primeres, components, semiacabats i productes finals. El client no té cap intervenció en el disseny del producte. El producte és sempre el mateix, per a tots els clients. Generalment, la producció es planifica en grans lots, per tal de minimitzar els costos de fabricació. Requereix una gran inversió en equipament per augmentar l'eficiència i reduir els costos de fabricació.

Evidentment, a la pràctica, entre els dos extrems existeixen altres estratègies a mig camí, en les quals una part del procés pot ser contra estoc i una altra part es planifica contra demanda. De fet, es defineixen dues estratègies addicionals de producció:

- **ATO (*assembly-to-order*)**: Es disposa d'estoc de productes semiacabats, i una vegada rebuda la comanda personalitzada de cada client es procedeix al muntatge. Així, es fan servir components o subsistemes estandarditzats per fer productes personalitzats. Es pot considerar que la primera part del procés és contra estoc, per tal de fabricar alguns components estandarditzats que s'utilitzen per fabricar el producte final, i la segona, en què es personalitza el producte, contra comanda. És una estratègia de producció també anomenada "modular".
- **ETO (*engineering-to-order*)**: L'estratègia ETO s'aplica quan cada producte requereix un disseny nou i, per tant, no té sentit ni tenir estoc de matèries primeres. Forma també

part de la comanda decidir el disseny del producte. Seria el cas, per exemple, de la fabricació d'un iot, en la qual el client inicia la compra amb el disseny mateix.

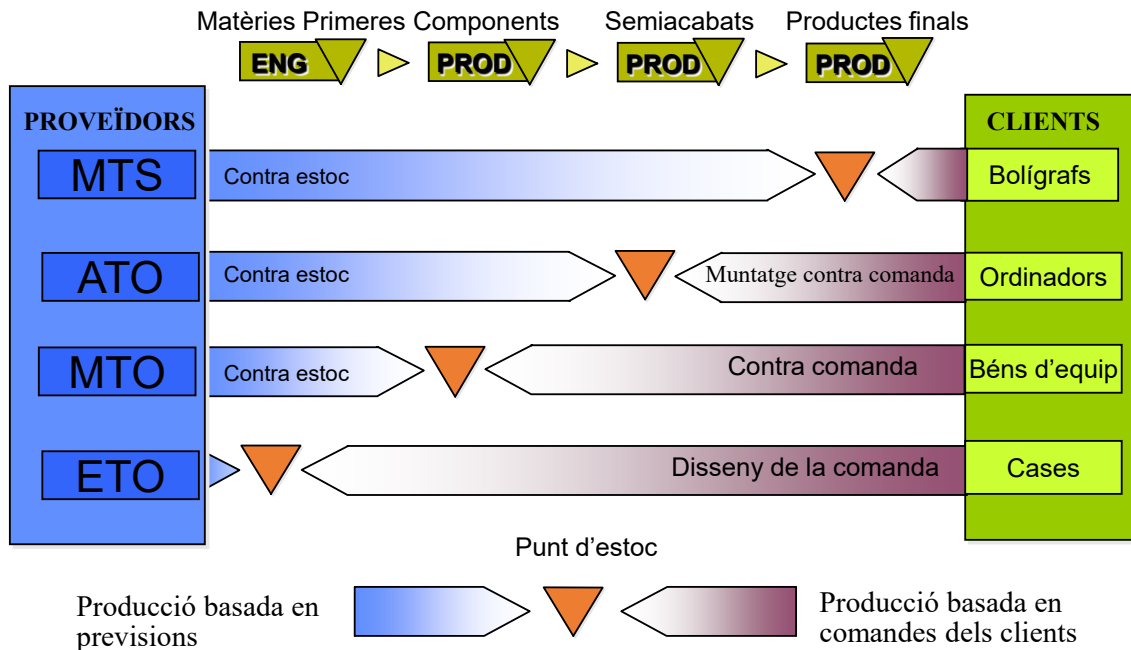


Figura: Estratègies de producció.

Per tal d'analitzar les implicacions de cada estratègia, cal tenir presents aspectes com ara:

- La participació del client en el procés de disseny: l'adaptació a les necessitats o requisits particulars del client és més alta en estratègies ETO i MTO.
- Qualitat: l'ajust entre les especificacions exigides pels clients i el producte lliurat és més gran en les estratègies ETO i MTO.
- Temps d'espera: En la producció contra estoc és zero, ja que el lliurament és immediat.
- Estoc: En MTS hi ha una acumulació de producte al final del procés.
- Eficiència: L'estratègia MTS és més eficient, en termes de costos unitaris, ja que s'utilitza equipament i eines especialitzats que redueixen els costos de producció.
- Inversió en equipaments: És més alta en MTS, ja que es busca abaixar el cost unitari de producció, i per tant l'equipament és molt especialitzat i únic, per tal de guanyar eficiència en el procés i abaixar costos de producció. En canvi, en les estratègies MTO i ETO es necessiten eines i equipaments generalistes que requereixen menys inversió.
- Nivell d'habilitat del treballador: ETO i MTO necessiten, generalment, una mà d'obra més qualificada. L'empleat ha d'enfrontar-se a diferents comandes, atès que totes són diferents, i per tant cal que tingui una àmplia gamma d'habilitats.
- Gamma de productes: Hi ha més gamma en MTO, atès que el client pot personalitzar cada producte, fet que no és possible quan es fabrica segons MTS, sense conèixer el client particular de cada comanda.

3. Estratègies de procés

Respecte al procés productiu, es poden definir també quatre tipologies diferents de processos per a la producció. Cal emfatitzar que s'analitza el procés en si mateix i no l'estratègia de com planificar la producció. Així, hi ha diferents tipologies de processos segons l'enfocament adoptat.

- **Enfocament a procés:** la gran majoria de la producció mundial es dedica a fabricar productes de gran varietat i de baix volum en llocs anomenats *job shops* o tallers. Aquestes instal·lacions s'organitzen al voltant d'activitats o processos específics. En una fàbrica, aquests processos poden ser departaments dedicats a la soldadura, a la pintura, o a qualsevol altra activitat. En una oficina, els processos poden ser comptes a pagar, vendes, nòmines, etc.
- **Enfocament a procés repetitiu (modular):** el procés repetitiu és la línia de muntatge clàssica. És molt utilitzat en el muntatge d'automòbils i electrodomèstics. Està més estructurat que una instal·lació centrada en processos, i per tant és menys flexible.
- **Enfocament a producte:** els processos de gran volum i poca varietat se centren en el producte. Les instal·lacions s'organitzen al voltant del producte que es fabrica. També s'anomenen processos continus, perquè tenen lots de producció molt llargs i continus. Productes com ara el vidre, el paper, les làmines de metall, les bombetes, la cervesa i les patates fregides es fabriquen mitjançant un procés continu. Els equipaments són molt especialitzats per tal d'augmentar l'eficiència i disminuir els costos de producció per unitat. Per tant, són equipaments de gran inversió.
- **Personalització massiva:** és la producció ràpida i de baix cost de béns i serveis que compleixen els desitjos dels clients cada cop més únics. Es tracta de fer precisament allò que el client vol, quan el client ho vol, i fer-ho econòmicament. Es pot donar en la fabricació d'ordinadors o d'alguns electrodomèstics, en què els components es fabriquen en enfocament a procés repetitiu, i en l'última fase d'assemblatge es personalitza el producte.

Aquesta taula explicita les característiques de cada una de les tipologies en funció de diferents aspectes analitzats.

Enfocament a procés (baix volum, alta varietat)	Enfocament repetitiu (modular)	Enfocament a producte (volum gran, varietat baixa)	Personalització massiva (volum gran, varietat alta)
Tallers de treball	Línia de muntatge	Procés continu	Subcomponents normalitzats, i el muntatge final es realitza per encàrrec
1. Petita quantitat i gran varietat de productes	1. Tirades llargues, un producte estandarditzat a partir de mòduls	1. Gran quantitat i petita varietat de productes	1. Gran quantitat i gran varietat de productes

2. Operaris àmpliament qualificats	2. Empleats amb formació moderada	2. Operaris menys qualificats	2. Treballadors flexibles
3. Instruccions per a cada treball	3. Pocs canvis en les instruccions de treball	3. Instruccions de treball normalitzades	3. Comandes personalitzades que requereixen moltes instruccions de treball
4. Inventari alt	4. Inventari baix	4. Inventari baix	4. Inventari baix en relació amb el valor del producte
5. Els productes acabats es fabriquen per encàrrec i no s'emmagatzemen	5. Els productes acabats es fan segons previsions freqüents	5. Els productes acabats es fan segons una previsió i s'emmagatzemen	5. Els productes acabats es fabriquen sota demanda
6. La programació és complexa	6. La programació és una rutina	6. La programació és una rutina	6. La programació sofisticada s'adapta a comandes personalitzades
7. Els costos fixos són baixos i els costos variables elevats	7. Els costos fixos depenen de la flexibilitat de la instal·lació	7. Els costos fixos són elevats i els costos variables baixos	7. Els costos fixos solen ser elevats i els costos variables baixos

Taula. Comparació de les característiques dels quatre tipus de processos de producció.

Font: Jay Heizer, Barry Render, Chuck Munson (2020). *Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management* (13a ed.) GE. Pearson Education.

Capítol 2: Anàlisi i disseny de processos de producció

Objectiu: Entendre els principals conceptes, i les mètriques associades, per analitzar processos i prendre decisions per tal d'optimitzar-los.

Resultats d'aprenentatge:

Definició de processos productius.

Variables de mesura i anàlisi d'un procés i lleis que relacionen aquestes variables.

Programació de processos per a optimitzar-ne el rendiment.

1. Què és un procés?

Un procés transforma unes entrades o *inputs* en sortides (*outputs*). Els inputs són elements com ara matèries primeres, mà d'obra, equipament, informació i altres recursos varis necessaris per produir l'*output*. El resultat pot ser tant un producte físic com un servei. També és important analitzar el nivell de satisfacció del client o usuari d'aquest *output*.

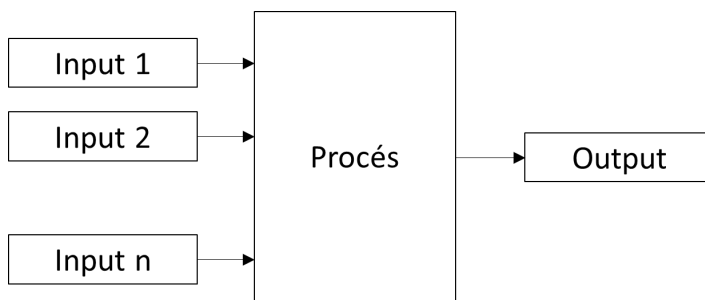


Figura: Flux d'un procés.

Així, un procés és un conjunt d'activitats realitzades per una organització que pren uns *inputs* i els transforma en un producte o servei. Per tal que el procés sigui d'utilitat, el resultat o *output* ha de tenir un valor per al client que sigui més gran que la suma dels *inputs*. El valor afegit ha de ser tal que algú (client) estigui disposat a pagar un preu superior pel producte que el total de recursos invertits en el procés.

Productivitat: relació dels *outputs* (béns i serveis) i *inputs* utilitzats (recursos, com ara mà d'obra i capital). El coeficient entre la sortida i l'entrada. Per tant, és sempre una mesura relacional.

- Productivitat = Output / Input

Per tant, la productivitat mesura la quantitat d'*output* que es pot obtenir per cada unitat d'*input* que es considera.

- Productivitat d'un factor: la relació entre l'*output* i un factor o recurs analitzat. L'ús d'un sol *input* per mesurar la productivitat es coneix com a productivitat d'un sol factor.
- Productivitat total (o productivitat multifactorial): la relació entre l'*output* i el valor de tots els recursos (factors o *inputs*) utilitzats. Per tal de poder sumar tots els *inputs* cal que estiguin expressats en la mateixa unitat (sovint és la unitat monetària).

Si la unitat en què s'agreguen els diferents *inputs* és la unitat monetària, i també s'utilitza la unitat monetària per mesurar l'*output*, la productivitat total queda expressada de manera adimensional. Es pot llegir que és la quantitat d'euros (o la unitat monetària que sigui) que el sistema obté del mercat per cada euro que entra en el sistema a través dels *inputs* considerats. Serà, per tant, el rendiment. Indica els euros obtinguts per cada euro que entra en el sistema.

Algunes observacions que cal fer relacionades amb la mesura de la productivitat:

- La qualitat pot canviar, mentre que la quantitat d'entrades i sortides es mantenen constants.
- Hi ha elements externs que poden afectar la productivitat. Són variacions que no es poden atribuir a la gestió del procés. El responsable del procés no hi té cap control.
- És possible que en algun cas no es trobin les unitats de mesura adequades.
- La mesura de la productivitat és especialment difícil en el sector serveis, on el producte final pot ser difícil de definir.

Tradicionalment s'han considerat tres factors clau per analitzar processos: treball, capital i gestió. Ara bé, segons el tipus de procés que analitzem, podem trobar altres *inputs* crítics, com ara l'energia, la tecnologia, la informació...

2. Mesura dels processos

El primer que cal saber és quina és la "unitat de flux". Fa referència al producte o servei que es fabrica o produeix. Pot ser un cotxe, una ampolla d'aigua, un servei de perruqueria, un telèfon intel·ligent... qualsevol cosa que sigui l'*output* del sistema o procés. Per tant, en l'entorn de manufactura serà el bé físic produït. Generalment queda emmagatzemat com a producte final per anar directament al mercat. En l'entorn de serveis l'*output* és el servei prestat: la visita del metge, l'informe de consultoria que rep una empresa, una gestió financera que rep un client del seu banc...

En segon lloc cal entendre el procés. Un diagrama de flux ajuda a comprendre el procés. Està compost per activitats (que consumeixen temps i recursos), estocs (matèries primeres, treballs en procés i productes acabats), decisions, fluxos...

Per tant, els elements principals i bàsics d'un diagrama de flux són:

- Rectangle per representar activitats (consumeixen temps i recursos)
- Triangle invertit per representar un estoc. S'han de considerar tres tipus: matèria primera, treball en procés (en anglès, *work in process* – WIP) i productes acabats
- Fletxes per a un flux (pot ser de material o d'informació)
- Rombe-diamant per a una decisió

Un cop fet això, cal mesurar diferents paràmetres per analitzar i conèixer el procés en qüestió. Alguns d'ells tenen algun tipus de relació.

2.1. Temps de processament

El temps de processament és el temps que triga una activitat a processar una unitat de flux.

- Temps de processament = p (en l'entorn de fabricació)
- Temps de processament (o temps de servei) = s (en l'entorn de servei)

També es pot considerar per a tot el procés o sistema (temps de processament del sistema). En aquest cas, aquest concepte també s'anomena *lead time* del sistema.

2.2. Lead time

El *lead time* és el temps que triga una unitat de flux a passar per tot el procés. És a dir, el temps transcorregut entre el moment en què una unitat entra en el procés (sistema) fins que en surt.

2.3. Capacitat

La capacitat d'un recurs/activitat és el nombre màxim d'unitats de flux que una activitat (o recurs) pot processar per unitat de temps. Per tant, quan es mesura una "capacitat", sempre es troba una unitat de temps en el denominador. La capacitat del recurs (o activitat) és la inversa del temps de processament:

- Capacitat del recurs (o activitat) = $1/p$

Si una operació triga 15 minuts per realitzar una operació ($p = 15$ minuts), vol dir que la seva capacitat és de 4 unitats/hora.

Si hi ha m recursos, aleshores:

- Capacitat de recursos (o activitat) = m/p

La capacitat del procés és el nombre màxim d'unitats de flux que pot completar tot el procés per unitat de temps. L'activitat amb la menor capacitat s'anomena coll d'ampolla. El coll d'ampolla limita el flux total del sistema.

- Capacitat del procés = capacitat del coll d'ampolla

Per això és tan important analitzar bé el coll d'ampolla.

2.4. Taxa de producció

La taxa de producció del sistema també s'anomena *flow rate* i també *throughput*. També moltes vegades en diem simplement *producció*. Són les unitats de flux produïdes per unitat de temps. Es mesura igual que la capacitat, però el concepte és diferent. La taxa de flux mesura la producció real en algun moment. La capacitat fa referència a una propietat del sistema.

Quan s'està parlant d'una taxa o *rate* de qualsevol cosa, es fa referència a una mesura en què el numerador és una unitat determinada, i en el denominador sempre hi ha una unitat de temps.

La taxa de producció real depèn no només de la capacitat del procés, sinó de decisions a curt termini, basades en coses com ara la disponibilitat d'*inputs*, o en la taxa de demanda real.

Per tant, la taxa de producció màxima és la capacitat del procés.

2.5. Utilització o rendiment

La utilització del procés és el percentatge de la capacitat del procés utilitzat en un moment determinat. Aquest percentatge també es coneix com el rendiment del procés.

- Ús del procés = Taxa de producció real / Capacitat del procés

De manera anàloga,

- Ús de recurs = Taxa d'ús del recurs / Capacitat de recurs
- Ús de l'activitat = Taxa d'ús de l'activitat / Capacitat de l'activitat

La utilització de l'activitat també es pot avaluar com el percentatge del seu temps de procés (p) relacionat amb el temps de cicle del sistema.

- Ús de l'activitat = Temps de procés d'aquesta activitat / Temps de cicle del sistema

2.6. Temps de cicle

El temps de cicle és la freqüència amb què el procés està "processant" o creant/fabricant una unitat de sortida o de flux. Es mesura com el temps transcorregut entre dues sortides consecutives del procés o sistema. Es comprova que:

- Temps de cicle = $1 / \text{Flow rate}$

2.7. Work in process (WIP)

Work in process (WIP) és el nombre d'unitats de flux que estan en procés en un moment concret. No és estoc de matèries primeres, perquè en el WIP ja hi ha hagut alguna operació efectuada sobre aquesta matèria primera (ja s'hi ha afegit valor), però el producte encara no està acabat per anar al mercat.

2.8. Productivitat

Un punt important en analitzar un procés és la productivitat. És un dels paràmetres més importants en analitzar un procés.

Productivitat és la relació entre la sortida i l'entrada (mesura relacional). En cas que es prengui una unitat de temps en el denominador, la productivitat i el *flow rate* són el mateix. Cal determinar bé quines són les unitats que es prenen en el numerador (l'*output* principal a analitzar) i quins són els *inputs* a tenir en compte.

2.9. Inventaris o estocs

En qualsevol procés s'identifiquen tres tipus d'inventaris:

- Matèria primera (procedent de proveïdors)
- Treball en procés WIP (s'hi ha afegit algun valor, però encara no està preparat per lliurar-lo al client)
- Productes acabats (preparats per a l'enviament)

2.10. Coll d'ampolla

Com s'ha esmentat, el coll d'ampolla és el factor limitant o restricció en un sistema. Restringeix el rendiment del sistema. És l'operació amb menor capacitat. Per tant, si el factor limitant és una activitat, és l'operació amb el temps de cicle més llarg.

Per detectar el coll d'ampolla, cal expressar totes les capacitats de les activitats o operacions en les mateixes unitats, per poder-les comparar. Així, en la figura següent, la capacitat més curta és l'operació B, amb una capacitat de 4 unitats per hora. En altres paraules, B té el temps de cicle més gran (15 minuts). Per tant, el coll d'ampolla és B. La capacitat de tot el procés és de 4 unitats/hora.

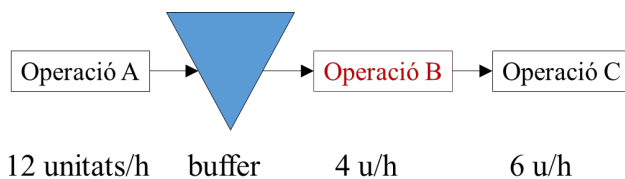


Figura. Exemple de procés, en el qual s'insereix un *buffer* per tal de protegir el coll d'ampolla.

2.11. Buffer

Un *buffer* és un inventari: nombre d'unitats emmagatzemades. Un *buffer* abans del coll d'ampolla protegeix el flux en cas d'una interrupció del flux des d'aigües amunt.

De quina mida hauria de ser aquest *buffer*? Depèn de la durada esperada de la interrupció del flux. En el cas anterior, si es preveu que, en el pitjor dels casos, una avaria d'A (interrupció del flux des d'A al coll d'ampolla) serà d'una hora, n'hi haurà prou amb un *buffer* de 4 unitats. Permetrà que B treballi durant aquesta hora (alimentat des d'aquest *buffer*) i el sistema no perdrà productivitat. Després d'una hora, quan A torni a treballar amb normalitat, es tornarà a establir el cabal des d'A.

3. Planificació d'un procés lineal

Si el propòsit d'un procés és aconseguir el màxim *throughput* (és a dir, treballar a plena capacitat), el coll d'ampolla ha de funcionar al 100 %. Aquest és un objectiu molt comú, però hi pot haver situacions en què es busqui optimitzar algun altre paràmetre.

Moltes vegades es pot obtenir un flux més gran només redissenyant el procés (utilitzant els mateixos recursos). Cal tenir present que com més gran sigui el *flow rate* menor serà el temps de cicle. Un és l'invers de l'altre.

Algunes possibilitats de reduir els temps de cicle mitjançant el redisseny de processos:

- Eliminar activitats. Fent una bona anàlisi, de vegades es troben activitats que no aporten valor i es poden suprimir.
- Reduir el temps d'espera entre activitats.
- Eliminar la reelaboració. Això vol dir fer les coses bé a la primera.
- Realitzar activitats paral·lelament.
- Ajornar algunes activitats per tal d'optimitzar la utilització d'alguns recursos.
- Reduir els temps de configuració (*set up*), cosa que facilita la reducció de la mida del lot.

Quan el *flow rate* es defineix com a unitats de sortida per unitat de temps, llavors és equivalent a la productivitat. Per tant, augmentar la productivitat significa augmentar el *flow rate*. En altres paraules, augmentar el *flow rate* (*throughput*) és el mateix que reduir el temps de cicle ($Flow\ rate = 1 / \text{Temps de cicle}$).

Tanmateix, en la majoria dels casos, l'inconvenient d'augmentar el *throughput* és que, al mateix temps, augmenta el *lead time*. Si augmenta el *lead time* vol dir que el WIP també augmenta en la mateixa proporció (això és una conseqüència de la llei Little, desenvolupada a la subsecció següent).

Per tant, hi ha *trade-off* o compromís entre aquests paràmetres: millorar el *flow rate* (productivitat), que és el mateix que reduir el temps de cicle, implica moltes vegades un augment del *lead time*, i per tant del WIP. Aquí cal veure fins on compensa escurçar el temps de cicle. El "preu" de millorar el temps de cicle és un WIP més gran.

El procés més senzill és un procés lineal. És el cas en què les activitats es realitzen de manera seqüencial: quan s'ha realitzat una operació, la unitat de flux entra a l'estació següent. La programació d'aquest tipus de processos, per tal d'aconseguir la màxima productivitat en termes d'unitats de flux per unitat de temps, requereix aquests passos:

- Trobar el coll d'ampolla.
- Planificar el coll d'ampolla perquè treballi al 100 %.
- Planificar les operacions prèvies (al coll d'ampolla) per alimentar de material el coll d'ampolla al ritme a què aquest pot treballar.
- Per a les operacions "aigües avall", les que venen després del coll d'ampolla, només cal deixar fluir el material.

Algunes idees sobre la gestió del coll d'ampolla:

- Cal donar ordres de treball (de producció) al sistema al ritme marcat per la capacitat del coll d'ampolla.
- El temps perdut al coll d'ampolla representa la pèrdua de producció per a tot el sistema.
- Augmentar la capacitat d'una activitat que no és coll d'ampolla no serveix per a res.
- Augmentar la capacitat del coll d'ampolla augmenta la capacitat de tot el sistema.

4. Llei de Little

La llei de Little estableix que, a llarg termini, el flux (*throughput*) d'un procés és el coeficient entre el WIP i el *lead time*.

- Flow rate = WIP / lead time

La llei mostra una implicació important en el cas que el *flow rate* o *throughput* sigui un paràmetre constant. Moltes vegades és així, ja que és un paràmetre determinat per la demanda. En aquest sentit, es pot afirmar que és extern al sistema. En aquest cas, reduir el *lead time* impacta proporcionalment en la reducció del WIP.

Cal tenir present que reduir el WIP és important, no només per reduir els costos d'inventari. També és important per simplificar la visualització del flux i que tot sigui més senzill. Al final s'ha demostrat que també impacta en la qualitat del producte. Així, es conclou que és important reduir el *lead time*. Com que el *lead time* està format per diverses activitats, analitzant cada una d'aquestes activitats es podria trobar que algunes es poden escurçar sense perdre valor afegit, o fins i tot eliminar-les.

La figura següent mostra les entrades i sortides acumulades en un sistema. A llarg termini, ambdós pendents han de ser iguals. El ritme d'entrada ha de ser igual al de sortida. Si el *rate* d'entrada fos més gran que el de sortida, el WIP augmentaria sense control (i el *lead time* en la mateixa mesura) i el sistema es col·lapsaria.

La figura demostra aquesta mateixa llei de Little des del punt de vista de la geometria descriptiva. El pendent de les entrades acumulades és la relació entre el WIP (en vertical) i el *lead time* (en horitzontal).

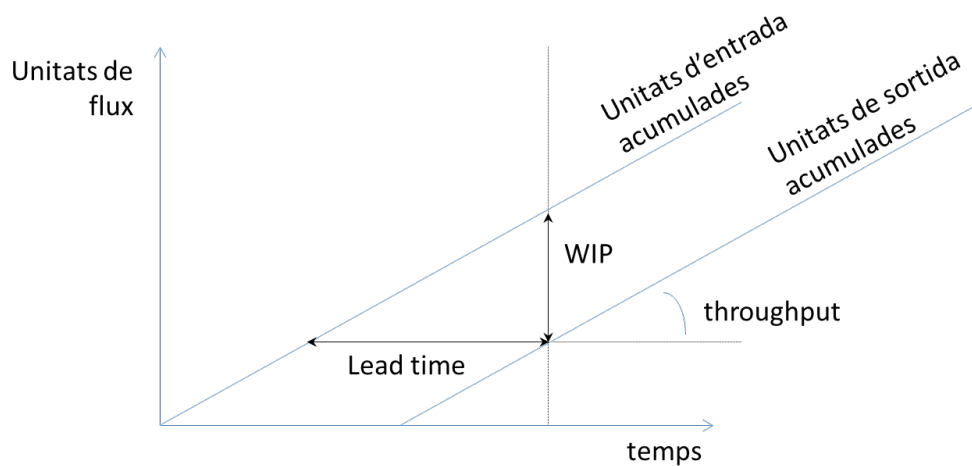


Figura. Diagrama d'entrada-sortida, útil per expressar la llei de Little.

Capítol 3: Previsió de la demanda

Objectiu: Entendre la necessitat d'estimar la demanda prevista, per tal de planificar posteriorment la producció, i comprendre els principals aspectes i tècniques a considerar per a realitzar aquesta previsió.

Resultats d'aprenentatge:

Utilització de la previsió de la demanda.

Tipologies de càlcul per a la previsió de la demanda.

Mètodes per a l'anàlisi de sèries temporals:

Mitjanes mòbils

Mitjanes mòbils ponderades

Allisatge exponencial

Regressions lineals amb coeficients d'estacionalitat

1. Per què cal preveure la demanda?

La previsió de la demanda consisteix a calcular, amb la màxima exactitud possible, el volum de vendes de cada producte durant un període futur de temps predeterminat. Aquest càlcul, que pot realitzar-se amb més o menys exactitud, i amb més o menys risc d'ajustar-se a la realitat propera, és fonamental per determinar posteriorment la quantitat de productes a realitzar en cada període.

Una previsió correcta de la demanda permet a l'empresa millorar la posterior planificació de la producció, amb la consegüent reducció de costos de producció. Si el pronòstic de la demanda és incorrecte, l'empresa s'arrisca a prendre males decisions sobre els productes i el mercat objectiu.

Preveure la demanda significa, de fet, preveure el nivell d'activitat a partir del qual es defineixen bona part de la resta de paràmetres de l'empresa: costos fixos, costos variables, plans d'inversió, etc. A més, una previsió adequada permet:

- Anticipar-se a la demanda, coneixent quan cal augmentar o disminuir el personal i d'altres recursos per tal de mantenir el bon funcionament de les operacions.
- Optimitzar els nivells d'estoc de productes i components, augmentant els índexs de rotació i reduint els costos d'emmagatzematge.
- Proporcionar una visió del pròxim flux de caixa, cosa que permet pressupostar amb més precisió per tal de pagar proveïdors i d'altres costos operatius.

La previsió de la demanda depèn de molts factors que fan que variï. En general, cal tenir en compte els següents:

- Època de l'any: Si es treballa amb productes estacionals, hi ha períodes de l'any en què tenen més demanda que en d'altres.
- Evolució de les vendes: Els productes poden anar creixent o decreixent en vendes de forma continuada.
- Estratègia de l'empresa: El fet d'obrir nous mercats, o la introducció de nous productes, afectarà les vendes, de manera que serà més difícil preveure-les a partir de dades històriques.
- Evolució del mercat: L'aparició de nous competidors, l'evolució econòmica o canvis en la regulació afectaran també la previsió que es pugui fer de comandes d'un producte.

En qualsevol cas, tenint present que per a vendre un producte avui cal haver-lo produït en un període de temps anterior, és imprescindible que se n'hagi previst la demanda i, consegüentment, la producció. Per tant, sempre es produeix per a cobrir una demanda prevista que ha estat calculada d'una manera o altra.

2. Tipologies de càlcul de la previsió de la demanda

Per tal de portar a terme una previsió de la demanda, es poden utilitzar diferents metodologies, de forma general:

- Sèries temporals: Aquest tipus de càlcul es basa en els històrics de vendes d'un producte determinat i, per tant, es podran utilitzar quan, en general, no són esperables grans canvis en el mercat.
- Mètodes qualitius: Es fonamenten en la realització d'enquestes als consumidors o potencials clients sobre l'opinió que tenen de diferents productes o bé en la predicció dels experts en un determinat sector. S'utilitza, en especial, per al llançament de nous productes al mercat.
- Extrapolació de resultats: Per a la introducció de nous productes al mercat, també es poden realitzar proves pilot (en un determinat mercat o sector) o partir de les vendes obtingudes en un mercat madur, i a partir d'aquí extrapolar els resultats al mercat que es consideri.

En qualsevol dels casos, cal tenir ben presents 4 conceptes fonamentals en qualsevol tipus de previsió de la demanda, tal com es mostra a la figura següent.

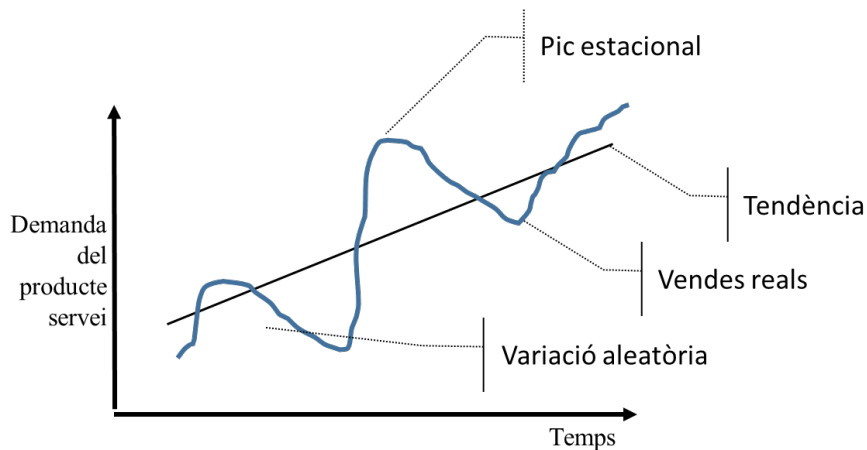


Figura. Conceptes a considerar en la previsió de la demanda

Concretament, es tracta dels conceptes següents:

- **Cicle econòmic:** Ve determinat pels alts i baixos de les activitats, i marca un patró que es repeteix cada certa quantitat d'anys. És molt difícil d'associar mitjançant el càlcul de sèries temporals.
- **Tendència:** Patró que representa un increment o decrement de la demanda al llarg del temps. Es pot explicar per un cicle econòmic, pel cicle de vida d'un producte... Generalment dura uns quants anys.
- **Estacionalitat:** Patró que es repeteix cada període temps, com per exemple: hores dins un dia, dies dins d'una setmana, mesos en un any, etc. Es deu a canvis pel clima, costums socials, festes, etc.
- **Aleatorietat:** Són les variacions inexplicables de la demanda. Poden ser degudes a casualitats o a situacions inusuals no incloses en els models utilitzats. No representen cap tipus de patró, altrament es podrien utilitzar per a la realització de previsions. Els seus efectes no són repetitius. En un entorn "ideal" no existirien.

3. Metodologies per al càlcul de la demanda a partir de les vendes i dades històriques

Per tal de portar a terme una previsió de la demanda es poden utilitzar diferents metodologies. Degut a la gran aleatorietat que pot tenir la demanda a preveure, sovint no cal utilitzar mètodes de càlcul de gran complexitat, atès que la probabilitat de cometre errors en la previsió és molt més gran que no la precisió del model matemàtic que s'utilitzi. És per aquesta raó que sovint s'utilitzen mètodes molt simples, i força intuïtius, que permeten tenir una previsió aproximada d'una forma molt ràpida.

D'entre els mètodes més senzills i intuïtius, en destaquen els següents:

3.1 Mitjanes mòbils o *moving average* (MA)

És un mètode que es basa únicament en l'aplicació de mitjanes aritmètiques entre les darreres vendes reals, per tal d'establir quina és la previsió per a la venda del proper període. Es descriu així:

$$F_{t+1} = MA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_t, \quad t > n$$

On:

$$F_{t+1} = \text{Pronòstic de demanda per al període } t + 1$$

$t =$ subíndex que identifica els períodes

$X_t =$ Demanda en el període t

$n =$ Nombre de períodes que es consideren en el càlcul

S'anomena la mitjana mòbil en funció del nombre de períodes, n , que s'utilitzin per al càlcul. Així, MA(3) indicarà la mitjana mòbil utilitzant els 3 períodes anteriors per al càlcul.

En la seva versió més simple es recomana quan la tendència en les vendes és pràcticament inexistent. De fet, en aquest mètode s'utilitzen períodes llargs (n elevada) si es considera que les demandes són molt estables, i períodes curts si no ho són. El mètode obté bones previsions robustes davant d'efectes aleatoris no deguts a la tendència.

3.2 Mitjanes mòbils ponderades o *weight moving average* (WMA)

Una alternativa a resoldre el problema de la tendència és utilitzar sèries ponderades. És a dir, a utilitzar diferents pesos a les observacions, donant més rellevància a les dades més recents. D'aquesta manera, les ponderacions poden tenir present l'estacionalitat. Aquesta ponderació cal determinar-la a partir de l'experiència, la intuïció, els històrics... Es descriu matemàticament d'aquesta manera:

$$F_{t+1} = WMA_t = \sum_{i=0}^n w_i X_t, \quad t > n$$

$$\sum_{i=0}^n w_i = 1$$

On:

$$F_{t+1} = \text{Pronòstic de demanda per al període } t + 1$$

$t =$ subíndex que identifica els períodes

$X_t =$ Demanda en el període t

$n =$ Nombre de períodes que es consideren en el càlcul

$w_t =$ Ponderació de l' i -èsim període

S'anomena la mitjana mòbil ponderada en funció del nombre de períodes, n , que s'utilitzin per al càlcul. Així, WMA(3) indicarà la mitjana mòbil utilitzant els 3 períodes anteriors, amb diferents ponderacions, per al càlcul.

El mètode ponderat dona millors resultats que sense ponderació, quan es considera que la demanda no és tan estable i, per tant, per a la previsió de la demanda dels pròxims períodes hi afectaran moltíssim les darreres vendes que hagi tingut l'empresa.

3.2 Allisatge exponencial

A diferència dels mètodes anteriors, aquest no requereix un gran volum de dades històriques de la demanda, ja que són les mateixes previsions calculades amb anterioritat les que es fan servir per a calcular la propera. De fet, la formulació és ben senzilla, ja que únicament requereix la previsió anterior, la demanda real en el període de la previsió i la constant de suavització.

Concretament la formulació de l'allisatge exponencial és la següent:

$$F_t = F_{t-1} + \alpha (A_{t-1} - F_{t-1})$$

On:

$$F_t = \text{Pronòstic de demanda per al període } t$$

$$F_{t-1} = \text{Pronòstic de demanda del període anterior } (t - 1)$$

$$\alpha = \text{constant de suavització}$$

$$A_{t-1} = \text{Demanda real en el període anterior } (t - 1)$$

El mètode d'allisatge exponencial utilitza una constant de suavització alfa (α) amb un valor entre 0 i 1; malgrat que en l'aplicació real sol estar entre 0,05 i 0,5. La constant funciona com un factor de ponderació, com a la mitjana mòbil ponderada, i la seva variació es fa d'acord amb la necessitat de donar més pes a dades recents (α més elevada) o dades anteriors (α menor). En conseqüència, si $\alpha = 1$, el pronòstic de la demanda per al proper període seria exactament igual al període actual.

Aquest és un model que permet donar més rellevància a la demanda més recent o a la més antiga. Ara bé, el seu desavantatge, igual que els mètodes de mitjana mòbil, és la seva resposta a la tendència: no dona bons resultats en productes amb una elevada tendència.

3.3 Estacionalitat additiva i multiplicativa

Un mètode més complex que els anteriors, però també prou senzill, és la utilització de regressions lineals i coeficients que permetin preveure l'estacionalitat que les regressions no detecten. Aquest mètode es pot utilitzar quan clarament existeix una tendència en les vendes, creixent o decreixent, i a més es detecten estacionalitats. És a dir, períodes concrets de temps en què hi ha més o menys vendes que les establertes segons la tendència.

Aquest mètode se centra en l'obtenció dels paràmetres de la recta de regressió que indica la tendència de les vendes, i uns coeficients d'estacionalitat que indiquen en quantes unitats de

producte (o quin percentatge d'aquestes) augmenten o disminueixen les vendes respecte a la tendència. Quan els coeficients d'estacionalitat indiquen unitats de producte a augmentar o disminuir les vendes respecte a la tendència, es tracta del mètode de l'estacionalitat additiva. Quan fan referència a percentatges, es tracta del mètode de l'estacionalitat multiplicativa.

És un cas habitual analitzar les dades per períodes anuals, i disposar de 12 coeficients d'estacionalitat: un per cada mes. Així, el coeficient d'estacionalitat del mes de gener ens indicarà quantes unitats es venen de més o de menys (o en quin percentatge) respecte al que indica la tendència.

Per a calcular la recta de tendència i els coeficients d'estacionalitat, caldrà portar a terme un procés iteratiu.

Capítol 4: Pla agregat i pla mestre de producció

Objectiu: Entendre les diferents estratègies i tècniques existents per a planificació de plans agregats i plans mestres de producció, a partir de les vendes o de les previsions d'aquestes.

Resultats d'aprenentatge:

Entendre l'objectiu de l'elaboració de plans de producció, a partir dels *inputs* requerits, i *outputs* del procés.

Pla agregat de producció.

Procés de planificació de vendes i operacions (en anglès, *sales and operations planning*, S&OP).

Decisions, de capacitat o demanda, a prendre en el disseny d'un pla de producció.

Metodologies i estratègies per a la realització de plans mestres de producció.

1. Quin és el procés de planificació de la producció?

Els directius defineixen i despleguen l'estratègia per a cada empresa. Prenen decisions sobre mercats, llançament de nous productes, incorporació de tecnologies, on localitzar fàbriques, quines inversions cal fer per variar la capacitat, etc. Totes aquestes decisions afecten el llarg termini.

Hi ha altres decisions o polítiques que afecten el mitjà termini, que normalment és un any, però depenent de la naturalesa de l'empresa, podria estar entre 3 i 18 mesos. En aquest mitjà termini es prenen decisions que afecten la capacitat de produir i la demanda.

Un exemple de decisió a mitjà termini que afecta la capacitat és la disjuntiva entre produir en hores extres o bé subcontractar davant un pic de demanda. Un altre exemple d'aquest tipus és l'opció entre contractar operaris durant els mesos d'alta demanda i acomiadar-los en la temporada baixa, o bé intentar fer un programa de torns de vacances dels treballadors per mantenir estable el nivell d'ocupació. Aquests dos exemples impacten en la capacitat de producció.

També en el mitjà termini, es poden prendre decisions per modificar la demanda. Es pot negociar amb els clients un preu especial per lliurar una comanda amb una certa demora. En anglès, aquesta acció s'anomena *back ordering*. És una decisió que afecta la programació de les vendes en el mitjà termini i el lliurament de les comandes. Són decisions d'una naturalesa ben diferent de les dues descrites en el paràgraf anterior.

En efecte, les opcions de capacitat són de caràcter intern a l'organització. No cal negociar-les amb ningú de fora. En canvi, les opcions de demanda són més proactives i impacten en el perfil de la demanda. Les primeres són pròpies de departaments d'operacions de l'empresa; les segones són de caràcter comercial i logístic.

Per tant, per satisfer la demanda es prenen decisions que modifiquen el ritme de producció i decisions que afecten el ritme de vendes. És per això que quan es planifica el que cal produir a mitjà termini es parla de planificació de vendes i operacions (*sales and operations planning*, S&OP). Cal decidir tant el ritme de producció com el ritme dels lliuraments. El S&OP ha de donar resposta als dos aspectes. El resultat del procés S&OP és el pla agregat de producció. A la figura següent es manté la notació en anglès de la planificació de vendes i operacions (S&OP).



Figura. Procés de planificació de vendes i operacions (S&OP).

Així, el S&OP és el procés de programació a mitjà termini. Com queda dit, el resultat d'aquesta programació, el pla agregat de producció, ha de satisfer les previsions de vendes en l'horitzó temporal de mitjà termini.

Cal tenir present que les necessitats de producció són generalment les previsions de vendes. Ara bé, hi ha un matís conceptual entre els dos termes. En realitat, les *necessitats de producció* són les previsions corregides per alguna decisió estratègica. Les previsions de vendes es calculen en funció del passat, de la història, i poden establir una tendència. Ara bé, una aposta estratègica pot modificar aquestes previsions i transformar-les en les *necessitats de producció*. És per això que alguns autors prefereixen parlar de *necessitats de producció* i no pas de previsions.

Aquest pla agregat de producció és l'*input* del procés de la programació a més curt termini. Aquesta programació a curt termini necessita més concreció. El procés de desglossar el pla agregat amb més detall s'anomena desagregació, atès que el S&OP fa servir la *unitat agregada* i no el producte final que va al mercat. La unitat agregada permet tenir una estimació de la quantitat de producte a fabricar, sense especificar detalls de quins productes concrets. La desagregació, tal com es mostra a la figura, dona lloc a un *pla mestre de producció* (MPS, *master production schedule*), una vegada es tenen en compte tots els productes que formen part del pla mestre agregat de producció. L'MPS treballa en un període curt (un mes o sis setmanes). Aquest MPS proporciona informació per fer la planificació de necessitats de materials (*material requirement planning*, MRP).



Figura. Procés de desagregació del pla agregat de producció.

2. Planificació agregada de la producció

Per tant, les *necessitats de producció* a mitjà termini són les previsions de vendes, modificades per tenir en compte decisions estratègiques que afecten el llarg termini. Aquestes *necessitats de producció* són un dels *inputs* del procés S&OP. L'altre *input* són decisions que afecten el mitjà termini. L'*output* del S&OP és el pla de producció agregada, que determina la quantitat i el moment en què cal produir durant aquest període (mitjà termini).

El S&OP utilitza informació de producte en una unitat agregada, també anomenada unitat lògica. Cada empresa ha d'establir com les diferents famílies de productes es "tradueixen" a aquesta unitat lògica. Per tant, el pla agregat s'expressa també en la mateixa unitat agregada o lògica. Per a un fabricant d'automòbils, seran "cotxes", sense cap referència als diferents models. Així, un cotxe de gamma alta i moltes prestacions pot ser un equivalent a dos "cotxes estàndard", per exemple. Qualsevol model que fabriqui s'expressa en relació amb el "cotxe estàndard". Un productor de llet utilitzarà "litres de llet" processats, sense cap referència a diferents productes finals. A la mateixa fàbrica, es produiran diferents famílies de productes (llet sencera, llet desnatada, iogurts de diferents gustos, batut de xocolata o de maduixa...) i cada família es presenta en diferents envasos i mides. Tanmateix, al nivell d'agregat, només es tindran en compte "litres de llet". Tot s'ha de mesurar en "litres de llet", que és en aquest cas la unitat agregada de planificació.

Per tal de proporcionar un pla agregat factible i òptim, també cal conèixer els costos associats al procés productiu (costos d'inventariar, costos laborals, costos de subcontractar, etc.). Així, quan es decideix si és millor produir en hores extres o bé comprar el producte a algun altre productor o competidor el producte ja fet, cal saber el cost de l'hora extra i el preu del producte que s'haurà de pagar a aquest competidor.

Finalment, cal trobar una funció que tingui en compte tots els costos de producció i logístics que permeti buscar la planificació òptima en termes de costos.

En resum, per fer la planificació de vendes i operacions (S&OP) cal tenir clars els següents punts:

- Una unitat lògica per mesurar les vendes i la producció: la *unitat agregada*.
- Una previsió de la demanda en unitats agregades.
- Els principals costos i altres paràmetres que afecten la producció i distribució (cost d'inventariar, cost de retardar una entrega, cost de contractar un treballador, cost de subcontractar, etc.).

- Un model analític que permeti estimar i minimitzar els costos totals.

Amb tot això, caldrà fer una proposta sobre la quantitat d'unitats agregades a fabricar i quan cal servir-les durant el mitjà termini (el pla agregat de producció). Si el mitjà termini és un any, serà raonable que el pla indiqui la quantitat a fabricar i lliurar mensualment.

3. Estratègies de planificació agregada

En el moment de generar un pla agregat de producció sorgeixen algunes preguntes:

- S'utilitzaran existències acumulades per absorbir els canvis en la demanda? En concret, caldrà fabricar amb antelació el que es lliurarà durant períodes d'alta demanda? El pla agregat dependrà del cost de mantenir les existències des que es fabriquen fins que es lliuren?
- És millor produir en hores extres durant un període de forta demanda, o és preferible subcontractar a l'estranger? En aquest cas, cal tenir en compte la legislació laboral de cada país.
- Es pot anar variant amb freqüència el nombre de treballadors, és a dir, contractar o acomiadar treballadors periòdicament? En cas afirmatiu, és factible donar formació en poc temps perquè els nous treballadors siguin operatius de seguida? Cal veure també quines implicacions té en termes de clima laboral. Hi ha sectors on no hi ha més remei que fer-ho.
- Es pot pensar a canviar la corba de demanda, oferint descomptes o preus especials durant els períodes de baixa demanda? Aquesta decisió impacta en el comportament del mercat. És una mesura de naturalesa diferent que les anteriors, ja que no afecta la capacitat de produir, sinó la demanda.

3.1. Opcions per al procés de planificació agregada

Per tant, les decisions (opcions) que s'han de prendre es poden classificar en les que afecten la capacitat i les que afecten la demanda. Les de capacitat no pretenen modificar la demanda, sinó absorbir les fluctuacions de la demanda fent canvis en el ritme de producció. Per altra banda, les *opcions de demanda* intenten suavitzar les fluctuacions de la demanda, i per tant el seu objectiu és estabilitzar la força laboral.

Opcions de capacitat:

- Canvi dels nivells d'inventari. En aquest cas, cal tenir en compte els costos associats a l'inventari. Cal saber quant costa tenir una unitat de producte emmagatzemada durant un mes. Per exemple, no és el mateix guardar en estoc productes d'alimentació o productes de ferreteria.
- Canvi en la quantitat de treballadors durant els diferents mesos, fent contractacions o acomiadaments periòdics. Implica el cost directe de contractació o acomiadament, però també aspectes relacionats amb la formació de nous treballadors, l'impacte en el clima laboral, l'impacte en el coneixement que es pot perdre amb els treballadors que deixen l'empresa...

- Subcontractació. De nou cal tenir en compte que, a part del cost directe de la compra del producte a algun proveïdor, hi ha altres efectes a analitzar. La subcontractació implica alguns riscos: en el futur els clients poden “migrar” i connectar directament amb al proveïdor alternatiu. També cal tenir en compte que l’empresa perd el control de la qualitat del producte.
- Utilitzar els mateixos treballadors fent hores extres. Cal tenir en compte que aquestes hores són més cares que les normals o regulars. També cal veure quins topalls estableix la legislació laboral.

Opcions de demanda:

- Canviar la demanda oferint descomptes, fent publicitat o campanyes especials, amb productes complementaris, etc.
- Retardar lliuraments (*back-ordering*) que s’haurien de servir durant els mesos d’alta demanda.

3.2. Estratègies per al procés de planificació agregada

Bàsicament, per trobar el pla agregat òptim, hi ha dues estratègies principals: anivellar la taxa de producció i perseguir la demanda. Entre ambdues estratègies pures hi ha qualsevol opció intermèdia (estratègies mixtes).

- Estratègia de producció d’anivellament

Consisteix a produir la mateixa quantitat d’unitats lògiques de producte en cada període, independentment de la demanda, que és variable per a cada període de l’any (generalment, per mesos). La producció total requerida anualment (o durant el període considerat) es distribuirà uniformement entre els mesos. Això donarà lloc a algun nivell d’inventari en mesos de baixa demanda, i a tenir comandes pendents de lliurament en moments d’alta demanda.

- Estratègia de persecució

És tot el contrari de l’estratègia anterior. La producció serà en cada període la necessitat de producció exacta. Per tant, mai hi haurà cap inventari, ni cap comanda pendent. Per contra, la capacitat s’ha d’ajustar a l’estacionalitat de la demanda. Cal una gran flexibilitat.

Per a les empreses de serveis, aquesta és l’única estratègia vàlida, ja que una de les característiques del servei és que l’elaboració del servei és simultània al consum.

- Estratègia mixta

Una estratègia mixta és qualsevol situació intermèdia. Les dues estratègies pures anteriors proporcionen un marc i un punt de referència, però habitualment es poden trobar altres escenaris amb més avantatges en termes de costos i altres criteris. Per altra

banda, des del punt de vista pràctic, les estratègies pures poden no ser desitjables, però sempre són un bon punt de partida per trobar una solució millor.

4. Mètodes de planificació agregada de la producció

Es poden utilitzar diferents mètodes. L'objectiu sempre és minimitzar el cost de la funció associada al pla agregat de producció.

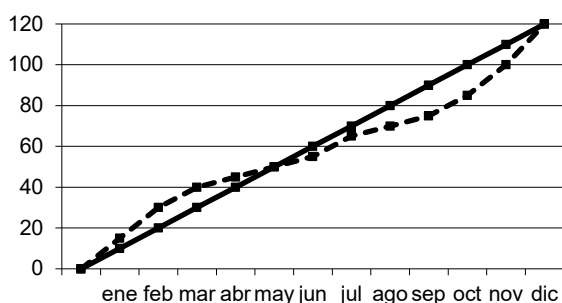
4.1. Mètode iteratiu/gràfic

El mètode iteratiu és el més popular, atès que es pot programar fàcilment en un full de càlcul. Permet generar diferents escenaris. Generalment primer es modelen les dues estratègies pures (anivellament de la producció i seguiment de la demanda), i després es van provant diferents estratègies mixtes, per tal de minimitzar els costos.

La figura següent mostra dues estratègies d'un cas particular. Amb línia discontinua hi ha les necessitats acumulades de producció (iguals en tots dos gràfics). Amb línia contínua es representen dues estratègies diferents de planificació. En aquest cas, l'escenari A és el resultat d'una estratègia d'anivellament de producció. Les necessitats totals de producció a final d'any són 120 unitats, i es produirà a un ritme constant de 10 unitats al mes, independentment de la previsió de vendes, que varia cada mes. En els primers mesos, les necessitats de producció estan per sobre de la producció planificada, i per tant hi haurà comandes que no es podran lliurar a temps. Durant la segona part de l'any és al revés. S'acumularà estoc, perquè el ritme de producció serà superior a les necessitats.

En l'escenari B, el patró de demanda previst és el mateix, però l'estratègia per satisfer les necessitats de producció (el pla de producció i vendes proposat) no permet retards a servir comandes. En qualsevol moment, sempre hi ha algun inventari. La línia contínua, que és el pla, sempre està per sobre de la discontinua (les necessitats de producció). A finals d'any, encara queda un petit estoc. El pendent de producció és força constant. Només hi ha dos canvis de pendent: un al març, que quasi no es percep en el gràfic, i un altre a l'octubre.

Escenari A: Anivellació de la producció



Escenari B: Estratègia mixta

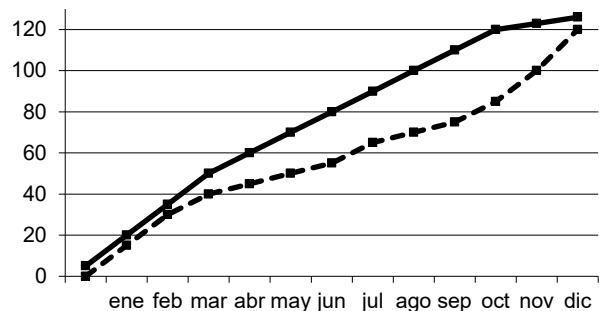


Figura. Exemples de pla agregat de producció mitjançant tècnica gràfica (Nota: Amb línia discontinua, les necessitats de producció, i amb línia contínua, el pla agregat).

L'escenari de persecució de la demanda quedaria representat per una gràfica on les dues corbes estarien totalment sobreposades. Només veuríem una línia.

Arribats a aquest punt, s'han de calcular els costos totals associats a cada escenari. Es poden representar altres escenaris addicionals, i calcular també els seus costos totals associats. Finalment cal decidir i quedar-se amb un pla, que és el que s'executarà.

4.2. Heurístiques

En alguns casos concrets, i sota unes hipòtesis determinades, existeixen heurístiques o algorismes que poden donar una solució òptima o una bona solució. Cal tenir present que en moltes ocasions les possibles solucions són pràcticament infinites.

A tall d'exemple, una de les heurístiques que es poden utilitzar és el mètode de Bowman. Aquest mètode és adequat quan es pretén trobar una solució per a un pla mestre de producció i es compleixen les següents hipòtesis:

- Únicament hi un producte o una família de productes a realitzar.
- Hi ha diferents formes d'obtenir el producte, amb un cost variable de producció diferent.
- No hi ha un cost fix de producció, ni un canvi de cost en els nivells de producció.
- El producte es pot emmagatzemar.
- No es produeixen ruptures d'estoc.
- Les unitats produïdes en un període es poden utilitzar per atendre la demanda del període següent.

En aquest cas concret, i sota aquestes restriccions, el mètode de Bowman aporta la solució òptima al problema. Per tal d'aplicar-lo, i de forma general, cal seguir els passos següents:

- Establir la demanda per a cada període (generalment mesos) que cal atendre.
- Establir les capacitats de producció per a cada període, tenint presents totes les fonts de producció (per exemple: producció en hores normals, producció en hores extres, producció subcontractada, etc.).
- Calcular els costos de producció per a cada font en cada període, tenint presents els costos de possessió de les unitats quan es planifiqui produir-les en períodes anteriors a quan se'n prevegi la demanda.
- Per atendre les unitats de demanda de cada període, s'assignaran les unitats de producció a la font més econòmica (generalment, produir en hores normals) d'aquell mateix període.
- Esgotades les unitats de producció del mateix període, s'assignarà la producció a les altres fonts alternatives (generalment, produir en hores extres, en hores normals en períodes anteriors, subcontractar la producció, etc.) que garanteixin el mínim cost.
- Una vegada assignada tota la producció necessària per a cobrir la demanda, caldrà definir la producció total en cada període per a cada font, així com el cost previst de tot el pla.

El mètode també es pot utilitzar en casos en què es permeti diferir la demanda. Ara bé, malgrat que pugui donar una bona solució, no es pot assegurar que sigui l'òptima.

4.3. Mètodes d'optimització matemàtica

Alternativament, es pot utilitzar algun procediment analític, com ara la programació lineal, que proporciona l'òptim. En concret, es fa servir el mètode *símplex*, que es capaç de minimitzar una funció subjecta a unes quantes restriccions. L'inconvenient és que potser aquest òptim no és factible des del punt de vista pràctic, però en tot cas dona un bon punt de partida per tal d'aconseguir el pla factible.

El programari Excel, un dels fulls de càlcul més utilitzats, proporciona una macro anomenada Solver que optimitza una funció situada en una cel·la utilitzant el mètode *símplex*. La funció ha de considerar tots els costos que s'han de tenir en compte (costos d'inventari, costos de mà d'obra, subcontractació, etc.). Aquesta funció necessita alguns paràmetres propis del cas (cost de manteniment d'una unitat en inventari durant un mes, cost de contractació per empleat, etc.). Altres restriccions del model s'han d'expressar com a equacions.

En concret, cal primer establir quines són les variables del model, allò sobre el que es vol tenir control i decidir. Les variables més importants són les quantitats a produir cada mes: aquestes variables són precisament el pla agregat, que és el que estem buscant. També caldrà decidir sobre el nivell d'estoc, o sobre contractacions i acomiadaments. Per tant, algunes de les variables seran:

- Producció en el mes i : P_i , $i = 1$ fins a n (nombre de mesos)
- Estoc en el mes i : S_i , $i = 1$ fins a n (nombre de mesos)
- Contractes en el mes i : C_i , $i = 1$ fins a n (nombre de mesos)
- Acomiadaments en el mes i : A_i , $i = 1$ fins a n (nombre de mesos)
- Treballadors en el mes i : T_i , $i = 1$ fins a n (nombre de mesos)
- ...

Caldrà conèixer paràmetres (sobre els quals no podem decidir) com ara el preu de guardar en estoc, d'acomiar, de subcontractar, etc. Entre aquests paràmetres hi ha les necessitats de producció de cada mes (o en termes més senzills, la previsió de venda mensual).

- D_i : Previsió de venda agregada
- C_{Inv} : Cost d'inventari d'una unitat durant un mes
- C_{Con} : Cost de contractar un treballador
- $Prod$: Quantitat d'unitats que pot produir un treballador durant un mes
- ...

La funció a minimitzar quedarà en funció d'aquestes variables i paràmetres:

- Cost total = cost inventari + cost contractació +...
- Cost total = $\sum C_{Inv} * S_i + \sum C_{Con} * C_i + \dots$

També hi haurà algunes restriccions, tals com ara:

- $S_i = S_{i-1} + P_i - D_i$ per a $i = 1$ fins a n (nombre de mesos)
- $T_i = T_{i-1} + C_i - A_i$ per a $i = 1$ fins a n (nombre de mesos)
- $P_i = Prod * T_i$ per a $i = 1$ fins a n (nombre de mesos)
- ...

Finalment, mitjançant el mètode símplex, cal trobar el mínim de “cost total”, subjecte a les restriccions que calgui. Això donarà uns valors de les variables, entre elles els valors de les P_i , que és justament el que es busca.

Capítol 5. Planificació de les necessitats de capacitat

Objectiu: Entendre la necessitat de planificar les necessitats de material per poder complir la demanda de producció assegurant la disponibilitat de capacitat.

Resultats d'aprenentatge:

Demanda dependent i demanda independent.

Material requirements planning (MRP I).

Capacity requirements planning (CRP).

Manufacturing resource planning (MRP II).

Enterprise resource planning (ERP).

1. Introducció: Per què és important per a les empreses planificar eficaçment les necessitats de material?

S'entén per necessitats de material tots aquells recursos que les empreses necessiten per dur a terme el seu sistema productiu. Els recursos poden ser humans, econòmics i materials.

Cada cop és més alta la complexitat dels sistemes productius de les empreses per poder donar resposta a la demanda dels clients. El seu èxit en el mercat en certa mesura recau en la seva capacitat de planificació de materials, de la producció i de la gestió d'estocs. Per tant, les empreses no tan sols han de proveir-se de recursos sinó que els han de saber combinar de forma òptima.

Justament de la necessitat de la gestió de tots els recursos sorgeixen els sistemes MRP (*material requirements planning*), que representen un avenç significatiu per a la gestió de les empreses, ja que permeten integrar la totalitat del sistema productiu de l'empresa en un sistema d'informació.

L'ús dels sistemes MRP es remunta a la Segona Guerra Mundial, quan el govern dels Estats Units va utilitzar programes per organitzar la logística dels seus recursos militars. Posteriorment, es van traslladar a la indústria i als anys 60 i 70 es van crear els primers sistemes MRP. Així van néixer els sistemes MRP o planificació de requisits de materials.

En definitiva, un sistema MRP és un sistema d'informació dissenyat per planificar la producció de fabricació. Identifica els materials necessaris, n'estima les quantitats, determina quan es necessitaran per complir el programa de producció i gestiona el temps de lliurament, amb l'objectiu de satisfer les demandes i millorar la productivitat general.

La planificació de materials pot ser relativament senzilla quan els volums de producció són baixos i els productes són senzills. En canvi, pot ser molt complicada quan més grans són els volums de producció i més complexos són els productes.

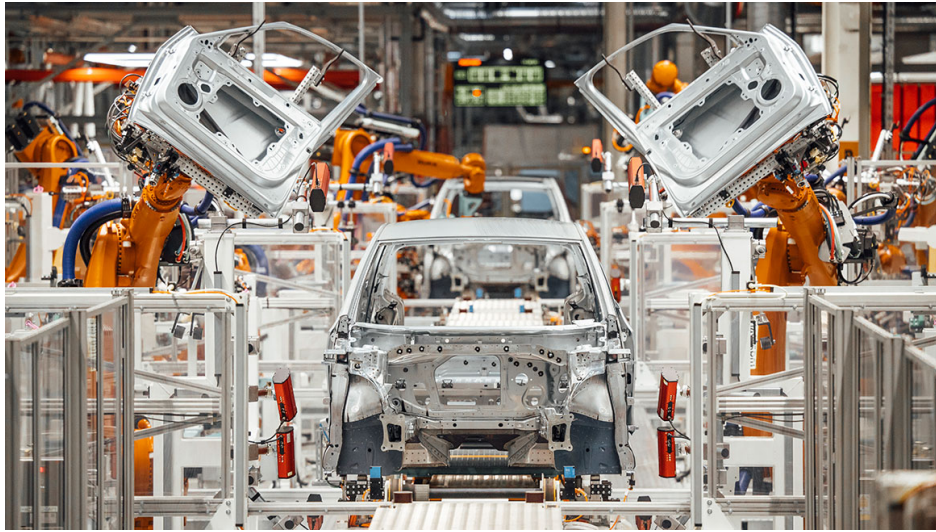


Figura: Línia de producció de Volkswagen.

Font: <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2020/09/pioneers-in-climate-friendly-vehicle-manufacturing.html#>

Sense la planificació dels requisits de material, és impossible administrar l'inventari de manera efectiva per tenir la quantitat justa d'articles correctes en el moment adequat. Tenir massa inventari és costós, però no tenir-ne prou pot generar desproveïments, que sovint són la causa principal d'interrupcions en la producció, retards en els enviaments, costos addicionals i un servei deficient al client.

2. Demanda dependent i demanda independent

Tal com s'ha introduït anteriorment, els sistemes MRP són els sistemes de planificació i administració de materials que programen la producció i controlen els inventaris. En definitiva, els sistemes MRP donen resposta a la pregunta: Quant i quan s'han d'aprovisionar (produït o comprant) els materials necessaris per poder complir la demanda?

Llavors, un dels aspectes importants en el correcte funcionament dels MRP és la diferenciació entre demanda independent i demanda dependent.

- Demanda independent:

La demanda independent és la demanda de productes que no depèn de l'empresa, ja que correspon a la demanda de productes finalitzats per part dels clients. Aquesta demanda sol ser externa a l'empresa perquè les decisions dels clients no són controlables per la companyia. La demanda de peces de recanvi també es considera demanda independent, tot i no tractar-se d'un producte final.

- Demanda dependent:

La demanda dependent és la que es genera a partir de les decisions preses per la mateixa empresa. En funció de la demanda independent dels clients, des de l'empresa es calcula quins components són necessaris per a la fabricació del producte final tenint en compte l'estructura del producte. Per exemple, si un fabricant de cotxes pronostica una demanda d'un determinat nombre d'unitats per a les properes setmanes, des del departament de planificació de l'empresa s'ha de pensar en quants volants, motors, rodes, etc. s'hauran de tenir disponibles per complir la demanda.

Hi ha tres preguntes clau que l'empresa ha de respondre quan es troba planificant la demanda dependent:

- Quins components es necessiten per a fabricar el producte final?
- Quantes unitats de cada component es necessiten?
- Quan es necessiten els components?

3. Càlcul de la planificació de les necessitats de material (MRP)

Per al càlcul del MRP es necessita informació bàsica provinent del sistema de producció i, en contrapartida, genera dos tipus d'*outputs*: ordres de fabricació (OF) i ordres d'aprovisionament o compra (OC) dins un horitzó temporal determinat.

La informació bàsica per al càlcul del MRP és la següent:

- Llista de materials (*bill of materials*, BOM):
Representació jeràrquica de tots els components que componen el producte final. Organitzats per nivells, on el més alt mostra el producte acabat i el nivell inferior mostra les matèries primeres. A part, inclou la relació de quantitat entre dos components consecutius.
- Programa mestre de producció (MPS):
Quantitats que cal produir de cada producte final en un determinat interval de temps. Generalment l'horitzó temporal a què fa referència el MPS és a curt termini. Per definir les quantitats a produir cal tenir en compte tant les previsions de la demanda externa com les comandes fermes ja rebudes d'un producte determinat.
- Registre d'inventaris:
Quantitat d'estoc que es té disponible tant del producte final com dels components que el componen. Per cada producte i component cal conèixer també el termini de lliurament de fabricació o compra.

Partint de la informació bàsica es calcularà, per a cada component de la llista de material, començant pel nivell superior fins arribar al nivell inferior, les OF del producte final i dels components i les OC de les matèries primeres.

Per al càlcul de les OF i les OC cal conèixer els següents conceptes previs:

- **Necessitats brutes (NB):**
Quantitat de producte que ha de quedar disponible per al subministrament exterior (necessitats de la demanda externa) i per a ser usat en altres processos productius de l'empresa o en altres fases de fabricació (necessitats de la demanda interna).
- **Recepcions programades (RP):**
Recepcions de material corresponents a comandes realitzades en el passat i que han d'arribar dins l'horitzó de planificació.
- **Estoc:**
Quantitat de producte que queda en estoc al final del període corresponent.
- **Necessitats netes (NN):**
Necessitats d'un article que no poden ser subministrades amb l'estoc previst i que, per tant, obligaran a generar una ordre de fabricació o compra.
- **Comandes (recepció):**
Quantitats de producte que seran rebudes en aquest període procedents d'OC o OF que has estat emeses durant els períodes anteriors. S'ha de tenir en compte la política de lots establerta per l'empresa.
- **Comandes (llançament):**
Quantitats de producte que cal sol·licitar en cada moment determinat, tenint en compte el termini de lliurament i el període en què s'ha de rebre.

El procés per dur a terme el càlcul de les OF i les OC és reiteratiu per a tots els components del producte i segueix les següents etapes, sempre començant pel producte final:

1. Es calculen les necessitats brutes a partir de la demanda externa, en el cas del producte final, i del component previ en el cas dels components i les matèries primeres, tenint en compte la quantitat de relació especificada en el BOM.
2. S'hi inclouen les recepcions programades dins l'horitzó.
3. Es calculen les necessitats netes (NN) per poder complir les necessitats brutes, l'estoc del període anterior i les recepcions programades del mateix període.
4. Es calculen les comandes de recepció tenint en compte la política de lots de l'empresa per als productes de fabricació o del proveïdor per als productes de compra.
5. Es calcula quan s'han de llançar les OF i les OC tenint en compte el termini de lliurament.
6. Es torna a l'inici amb el següent article, seguint l'estructura de la llista de materials o BOM.

4. Capacity requirements planning (CRP)

En el càlcul del MRP no es comprova si l'empresa disposa de suficient capacitat per dur a terme les ordres de fabricació generades internament per complir la demanda externa. D'aquesta necessitat sorgeix el càlcul de la planificació de les necessitats de capacitat (*capacity requirements planning*, CRP).

En resum, el CRP és un procés que consisteix a calcular les capacitats necessàries als diferents centres de treball per a satisfer les OF i comparar-les amb la capacitat disponible en cada centre al llarg dels períodes de l'horitzó.

El procés de càlcul del CRP es realitza en quatre passos:

1. Es determina la càrrega (temps) generada per totes les OF.
2. Les càrregues calculades en el pas anterior es periodifiquen, si escau, al llarg dels períodes de l'horitzó.
3. Es determina la capacitat necessària per període a cada centre de treball.
4. Es compara la capacitat disponible de cada centre de treball amb la necessària i se'n determinen les desviacions.

De forma il·lustrativa, en la figura següent es pot observar com en els períodes 3 i 4 la càrrega exigida per les OF calculades en el MRP és superior a la capacitat necessària.

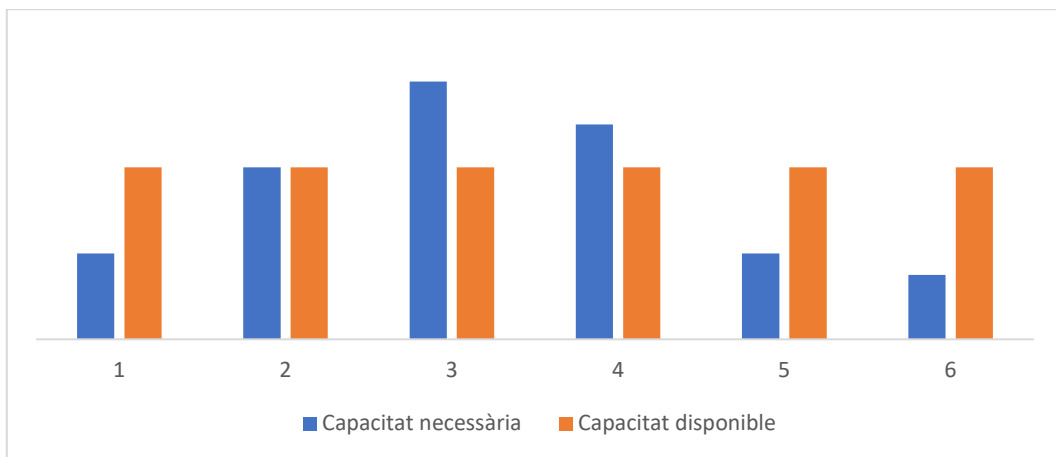


Figura. Capacitat necessària vs. capacitat disponible. Font: Elaboració pròpia.

Davant aquesta situació de manca de capacitat es poden dur a terme diferents accions. En tot cas, la situació contextual de l'empresa i la disponibilitat d'altres recursos, com ara els econòmics, indicarà la millor de les accions:

- Reajustament temporal de les ordres de producció.
- Reajustament de les mides dels lots de fabricació.
- Augment de la flexibilitat del personal.
- Etc.

5. MRP II

Quan es fa referència als sistemes MRP s'ha de diferenciar entre MRP I (*material requirements planning*) i MRP II (*manufacturing resource planning*). De fet, els sistemes MRP II són una millora dels sistemes MRP I. Mentre que MRP I significa planificació dels requisits de materials, MRP II significa planificació dels recursos de fabricació. Tanmateix, els termes sovint s'utilitzen indistintament.

Tal com s'ha comentat anteriorment, els sistemes MRP I van aparèixer als anys 60 per respondre a la necessitat d'administrar eficaçment els inventaris dels productes amb demanda dependent. No obstant això, en alguns aspectes van quedar obsolets ràpidament.

Per això, va caldre fer evolucionar els sistemes MRP I fins a trobar un model de planificació més complet que tingués en compte tota l'organització empresarial i inclogués el càlcul de capacitat, que es realitzava *a posteriori* mitjançant el CRP. Els sistemes MRP II neixen d'aquesta necessitat als anys 80.

A diferència dels MRP I, els MRP II també inclou informació financera i de vendes, per tenir en compte la disponibilitat de recursos. A més de respondre preguntes sobre què, quants i quan comprar materials de MRP I, MRP II respon les preguntes següents:

- Quins recursos són necessaris?
- Quina quantitat de recursos?
- Quan seran necessaris aquests recursos?

En definitiva, els sistemes MRP II identifiquen els problemes de capacitat del pla mestre de producció, resolen les divergències entre la disponibilitat de recursos i calculen el consum previst.

En la següent taula es mostren de forma detallada les principals diferències entre els sistemes MRP I i MRP II:

Característiques	MRP I	MRP II
Control d'estoc	X	X
Lista de materials (BOM)	X	X
Pla mestre de producció (MPS)	X	X
Programació de manteniment dels equips		X
Comptabilitat i planificació financera		X
Control de la capacitat dels centres de treball		X

6. ERP (*Enterprise resource planning*)

Als anys 90, amb l'evolució dels ordinadors i l'aparició de les noves tecnologies, els sistemes MRP van evolucionar cap a una integració no només dels aspectes productius de l'empresa sinó de totes les àrees de la gestió empresarial, des de la gestió financera fins a la gestió de vendes. Naixien els sistemes ERP.

L'objectiu dels sistemes ERP és integrar i automatitzar els principals processos i dades de l'empresa en una única plataforma tecnològica, facilitant la gestió de les dades i l'organització de l'empresa a temps real.

D'aquesta manera, quan arriba una comanda en ferm a l'empresa i el venedor la registra en el sistema, tots els departaments implicats en són informats a temps real. Des del sistema de producció –que haurà de produir la demanda–, al magatzem –que haurà de subministrar el material per produir la comanda–, al departament financer –que haurà d'activar el procés per

cobrar la comanda— o al departament de logística —que serà informat de quan i com s’haurà de fer l’entrega de la comanda.

El fet de d’integrar diferents eines en un mateix programa facilita el creuament de dades i la generació d’informes sobre les diferents àrees. Aquesta informació fa que l’empresa, organitzativament, sigui més àgil i competitiva. Amb un sistema de gestió integral com ara un ERP, s’optimitzen els processos de l’empresa, es redueixen els costos i es facilita la presa de decisions, gràcies a la informació generada pels mateix ERP.

En els darrers anys, degut al ràpid avenç de la tecnologia, els sistemes ERP ja no s’implementen a les instal·lacions de les empreses, sinó que es gestionen des del núvol de manera descentralitzada.

Capítol 6: Programació a curt termini

Objectiu: Entendre els principals reptes de la programació a curt termini (assignació i seqüenciació d'ordres de fabricació) i tècniques d'optimització d'aquesta.

Resultats d'aprenentatge:

Definició i objectius de la programació a curt termini.

Regles de prioritat.

Assignació de les ordres fabricació.

Seqüenciació de les ordres de fabricació.

Tècniques per a la seqüenciació de les ordres de fabricació: algorismes de Johnson i Jackson.

1. Què és la programació a curt termini?

La programació a curt termini es pot considerar la darrera etapa en la planificació de la producció. Fonamentalment consisteix a ajustar les tasques i operacions establertes, sovint per l'execució prèvia del MRP, a les persones i a les màquines o centres de treball específics.

El grau d'influència de la programació a curt termini en els resultats de l'empresa sol ser força rellevant, atès que en pot dependre el compliment dels terminis de lliurament, un aspecte molt valorat per part dels clients de l'empresa.

L'horitzó amb què es treballa és molt reduït: dies, hores i minuts. És per això que calen professionals preparats, sovint els caps de producció, per a realitzar aquesta tasca. Aquests utilitzaran diferents metodologies o programaris que els donin suport durant el procés de programació. Aquestes metodologies o tècniques a utilitzar es poden classificar, de manera molt general, en:

- Programació endavant: Aquesta programació s'inicia tan bon punt es reben les ordres de fabricació. A partir d'aquestes es comença a produir, sense tenir gaire en compte les dates de lliurament. S'utilitza en processos que treballen sota comanda (o *make-to-order*, MTO) en què el lliurament sol ser com més aviat millor.
- Programació enrere: Aquesta programació s'inicia a partir de la data de lliurament de la comanda. El seu principal objectiu és complir els terminis de lliurament establerts. Per tant, es programen primer les operacions finals, i successivament, en ordre invers, les que les antecedeixen.

Per tal de portar a terme aquesta programació, generalment es diferenciarien dues fases:

- Assignació de les ordres de fabricació.
- Seqüenciació de les ordres de fabricació.

Ara bé, abans d'iniciar aquesta etapa de programació és fonamental conèixer quins són els seus objectius. Diferents objectius implicaran diferents metodologies i, conseqüentment, programacions diferents de les operacions.

2. Objectius per a la programació a curt termini

L'elecció de la tècnica de programació adequada depèn de molts factors, com poden ser les característiques del procés, la flexibilitat dels centres de treball, el volum de les ordres de fabricació i la consideració d'un o diversos objectius alineats amb l'estratègia de l'empresa.

Aquests criteris utilitzen normalment algun dels indicadors següents:

- F_{max} : Temps de permanència en el sistema de la peça que hi està més
- F_{min} : Temps de permanència en el sistema de la peça que hi està menys
- F_{mig} : Temps mitjà de permanència de les peces en el sistema
- T_{max} : Retard de la peça que més es retarda
- T_{mig} : Retard mitjà de totes les peces produïdes

Habitualment, el criteri més utilitzat en un sistema productiu és la minimització de F_{max} , és a dir, programar la fabricació de manera que es minimitzi el temps a la línia productiva de la peça que hi està més temps. Ara bé, aquest no és l'únic, i sovint l'elecció depèn de cada situació concreta. Així, per exemple, alguns criteris que es podrien utilitzar són:

- Acabar com més aviat millor la darrera peça, és a dir, minimitzar F_{max} .
- Disminuir el temps mitjà de permanència en el sistema de totes les peces.
- Disminuir al màxim el temps improductiu dels centres de treball entre dues operacions consecutives.
- Disminuir al màxim el nombre de peces en procés (*work-in-progress* o *WIP*).
- Obtindre un "estoc de sortida" regular en la fabricació per lots (equilibratge de les línies de producció).
- Maximitzar la utilització dels centres de treball.
- Disminuir al mínim el nombre de comandes que no compleixen les dates compromeses amb els clients.
- ...

S'evidencia que serà impossible obtenir una programació de la producció que optimitzi tots els criteris que es puguin establir, més enllà que sovint la millora d'un criteri va lligada a l'empitjorament d'altres. Per exemple, si es maximitza la utilització dels centres de treball, implicarà treballar amb lots més grans, i per tant probablement s'augmentarà el retard mitjà de les peces produïdes, en el cas d'una demanda equilibrada. Així, l'objectiu a complir ha de ser únic, i si se'n volen complir de diferents, cal que un d'aquests sigui el prioritari.

Cal dir que aquests criteris no són tècniques de programació, sinó únicament indicadors que mesuraran l'eficàcia de les regles de programació i seqüenciació que s'apliquin.

3. FASE 1: Assignació de les ordres de fabricació

L'assignació o *loading* –també anomenada programació– de les ordres de fabricació és la primera fase de la planificació de la producció a curt termini. En general, després del llançament de l'MRP es coneix:

- Unes ordres de fabricació i de compra amb unes dates límit de lliurament.
- La càrrega de treball esperada per a les ordres de fabricació previstes.
- Una o diverses rutes de fabricació per a aquestes ordres.
- Uns centres de treball amb diferents restriccions (horaris, torns, capacitats...).
- Uns temps d'operació de cada peça en cada centre de treball.
- Uns temps de preparació dels centres de treball, que poden dependre o no de les peces que s'han elaborat anteriorment.

A partir d'aquí, cal assignar aquestes ordres de fabricació als diferents centres de treball de què disposi l'empresa, de manera que s'optimitzin els objectius que s'hagi marcat l'empresa: minimitzar els costos d'operació, reduir el temps d'acabament de la darrera ordre de fabricació, disminuir el temps improductiu, etc.

Aquesta assignació podria ser molt senzilla si totes les ordres de fabricació només es poden fer en un determinat centre de treball, però en general això no és així. Sovint moltes ordres de fabricació es poden fer en més d'un centre de treball, o fins i tot totes les ordres de fabricació es poden realitzar en qualsevol dels centres de treball de l'empresa. Si, a més, es té en compte que es podria assignar part d'una ordre (un nombre determinat d'unitats) a un centre de treball i una part a un altre, el nombre de possibilitats existents és immensa. Així, el problema d'assignació pot ser molt senzill o d'una gran complexitat.

Existeixen tècniques i aplicacions especialitzades, amb intel·ligència artificial, per exemple, que mitjançant diferents heurístiques o algorismes intenten optimitzar, i si més no simplificar i flexibilitzar, aquesta tasca d'assignació. La seva utilització dependrà de la complexitat del problema i del valor afegit que puguin aportar aquestes eines a cada empresa.

En qualsevol cas, una vegada assignat el centre de treball que portarà a terme cada ordre de treball, és molt habitual desenvolupar consecutivament el diagrama de Gantt corresponent. Aquesta és la millor eina, visual, que permet determinar molts dels paràmetres necessaris en la programació entre centres de treball: càrregues de treball, temps de processament, temps de flux, temps ociosos, disponibilitat de centres de treball, etc.

4. FASE 2: Seqüenciació de les ordres de fabricació

Una vegada les ordres de treball han estat assignades a un determinat centre de treball, s'inicia la segona etapa de la programació: la seqüenciació (o *sequencing*) de les ordres de fabricació a realitzar. És a dir, respondre a: Com s'ordenaran les ordres de fabricació en un determinat centre de treball? Quines es realitzaran primer? Quina serà la seqüència amb què cal produir les peces?

A tal efecte, es poden utilitzar unes regles de prioritats, o *dispatching rules*, molt simples, si bé hi podrien haver tantes regles de prioritats diferents com programadors o caps de producció. Les més habituals són les següents:

- FIFO (*first in first out*): La primera peça que arriba és la primera a ser processada.
- SPT (*shortest process time*): Es processa primer la peça que té un temps d'operació més curt.
- LPT (*longest process time*): Es processa primer la peça que té un temps de procés més llarg.
- EDD (*earliest due date*): Es processa primer la peça que té una data de lliurament més pròxima. La més urgent.
- SFT (*shortest float time*) o folgança mínima: Es processa primer l'ordre amb menys folgança, tenint present que la folgança és la diferència entre la data límit de lliurament i el temps de procés. És a dir, la peça amb menys marge de temps per a la producció.

Aquestes regles de prioritat no s'han de confondre amb els indicadors de programació. Aquestes regles proporcionaran una seqüència de producció que tindrà uns indicadors determinats. Llavors caldrà determinar quina és la regla de prioritat que en cada cas determinat dona uns millors indicadors (temps d'espera, temps d'utilització, retards, etc.), en funció de quins siguin els objectius de l'empresa (que poden no ser sempre els mateixos).

Qualsevol problema de seqüenciació es pot descriure amb la següent notació: n/m/A/B

On:

n: Nombre de peces o d'ordres de producció a realitzar

m: Nombre de màquines, recursos

A: Tipus de flux, on:

- P o "permutació": Totes les peces tenen la mateixa ruta i totes les màquines la mateixa seqüència
- F o "flow-shop": Totes les peces tenen la mateixa ruta
- G o "general": Totes les peces tenen diferents rutes

B: Criteri (Fmax, Tmax, Fmig, Tmig, etc.)

En casos molt concrets, sota unes determinades hipòtesis, s'han establert heurístiques que permeten calcular l'opció òptima. Altrament, es necessita l'aplicació de tècniques com ara d'intel·ligència artificial o de simulació de processos industrials per tal d'obtenir bons resultats.

A continuació es presenten algunes de les heurístiques més senzilles a aplicar, sempre que es compleixin les hipòtesis següents:

- Cada ordre de fabricació només es pot fer en un sol centre de treball conegut.
- Quan ha començat una ordre de fabricació cal acabar-la abans de començar-ne una altra al mateix centre de treball. És a dir, no es permeten interrupcions.
- No es poden sobreposar dues operacions en una mateixa peça.
- Cada centre de treball només pot tractar una sola operació.
- El temps d'operació és conegut i constant.
- El temps d'operació és independent de la seqüència.

4.1. Seqüència de n treballs en una màquina ($n/1/A/B$)

Tenint presents les anteriors hipòtesis, en el cas d'un conjunt d'ordres de fabricació o peces que han de processar-se en una mateixa màquina, es detecta, en funció de la regla de prioritats escollida, que:

- SPT minimitza el F_{mig} (temps mitjà de permanència en el sistema) i l'estoc mitjà de productes acabats.
- EDD minimitza el retard mínim (T_{min}) i el retard màxim (T_{max}).
- SFT maximitza la folgança màxima.

En qualsevol cas, les regles més utilitzades, degut a la seva facilitat d'aplicació, són l'EDD i la FIFO (tot i que no doni l'òptim), sobretot en fàbriques on es treballa sota comanda. De forma global, la regla de prioritats SPT és la que obté millors resultats, tot i que és impossible d'utilitzar en fàbriques on arriben contínuament noves ordres i amb temps de procés molt diferents. Les ordres amb una ocupació del centre de treball molt llarga tardarien molt a fabricar-se.

4.2. Seqüència de n treballs en n màquines. Regla de Johnson ($n/2/F/F_{max}$)

Per als casos $n/m/F$, és a dir, amb totes les peces utilitzant la mateixa ruta de fabricació, existeixen dos teoremes a tenir presents:

- Teorema 1: En un problema $n/m/F$, amb totes les peces i màquines disponibles simultàniament, existeix un programa òptim en què les peces tenen la mateixa seqüència en les dues primeres màquines; per tant, els programes considerats en la cerca de l'òptim poden limitar-se als d'aquest tipus.
- Teorema 2: En un problema $n/m/F/F_{max}$, amb totes les peces i màquines disponibles simultàniament, existeix un programa òptim en què les peces tenen la mateixa seqüència en les dues últimes màquines; per tant, els programes considerats en la cerca de l'òptim poden limitar-se als d'aquest tipus.

A partir d'aquests dos teoremes, s'estableix la regla de Johnson, que és una heurística utilitzada per a resoldre situacions de seqüenciament de processos on cal realitzar dos o més treballs (o ordres de fabricació) que han de passar per dues màquines. L'ordre sempre és el mateix: primer es realitzen unes ordres a la primera màquina, i posteriorment a la segona.

Quan l'objectiu sigui minimitzar F_{max} (temps de permanència en el sistema de la peça que hi està més), l'algorisme que dona l'opció òptima és el següent:

- Llistar totes les ordres de fabricació conjuntament amb el temps d'operació a cada màquina.
- Seleccionar el temps de processament més curt. Si és un temps corresponent a la primera màquina, es programa primer, mentre que si correspon a la segona màquina, es programa al final de la seqüència. Qualsevol empat es resol de forma arbitrària.
- Una vegada programada l'ordre de fabricació, sigui al principi o al final, s'elimina de la llista inicial.

- Es van repetir els passos anteriors per a tota la resta d'ordres restants, cap al centre de la seqüència, fins que s'elimina tota la llista. El resultat final és la seqüència òptima en les condicions establertes.

4.3. Seqüència de n treballs en 3 màquines. Regla de Johnson ($n/3/F/F_{\max}$)

Johnson va ampliar el seu algorisme per a 3 màquines, en els casos que la segona màquina sigui poc rellevant respecte al temps de l'operació. Es basa en la creació de 2 màquines fictícies, i l'algorisme segueix els passos següents:

- Es parteix de tres centres de treball o màquines: M1, M2 i M3.
- Es creen dues màquines fictícies, A i B, per a les quals:
 - A "A" el temps d'execució del treball serà igual a la suma dels temps d'M1 i M2.
 - A "B" el temps d'execució del treball serà igual a la suma dels temps d'M2 i M3.
- A partir d'aquests temps calculats per a A i B, s'aplica el procediment desenvolupat per Johnson per a dues màquines, considerant que els treballs primer passen per A i després per B.
- L'òptim que s'obté per a A i B també ho serà per a l'original només si els temps més curts d'M1 o M3 no són inferiors al temps màxim a la màquina M2 (intermèdia).

4.4. Seqüència de n treballs en n màquines. Algorisme de Jackson ($n/2/G/F_{\max}$)

Per als casos amb dues màquines, però on el flux és general i, per tant, els processos de producció poden començar en qualsevol de les dues o únicament operar en una, l'algorisme de Jackson dona la solució òptima quan l'objectiu és optimitzar F_{\max} (temps de permanència en el sistema de la peça que hi està més).

En aquest cas la seqüència que proposa l'algorisme és diferent per a cada màquina i correspon als criteris següents, suposant les màquines M1 i M2.

- Per a M1:
 - Primerament, les comandes que van d'M1 a M2, ordenades segons l'algorisme de Johnson.
 - En segon lloc, les comandes que únicament operen a M1.
 - Finalment, les comandes que van d'M2 a M1, ordenades segons l'algorisme de Johnson.
- Per a M2:
 - Primerament, les comandes que van d'M2 a M1, ordenades segons l'algorisme de Johnson.
 - En segon lloc, les comandes que únicament operen a M2.
 - Finalment, les comandes que van d'M1 a M2, ordenades segons l'algorisme de Johnson.

Capítol 7: Gestió d'estocs

Objectiu: Entendre la necessitat de gestionar els estocs de la manera més eficient i aprendre a optimitzar la gestió dels estocs mitjançant la utilització de models senzills però robustos.

Resultats d'aprenentatge:

Definició i tipus d'estocs.

Costos implicats en la gestió dels estocs.

Anàlisi ABC.

Polítiques de gestió dels estocs.

Lot econòmic: fórmula de Harris-Wilson o EOQ.

Lot econòmic amb producció i consum en paral·lel (EPQ).

Lot econòmic amb demanda diferida.

Lot de gestió amb demanda no homogènia: mètode de Silver i Meal.

1. Introducció: Per què ens cal gestionar els estocs?

Per tal que una empresa pugui produir, inevitablement ha de tenir estocs de tot tipus de material (matèries primeres, productes semielaborats, recanvis, productes acabats, etc.) emmagatzemats. Aquests estocs cal gestionar-los de la manera més eficient possible, reduint al màxim els costos implicats.

Ara bé, cal tenir present que aquests costos no únicament són deguts al cost d'adquisició de cada producte, sinó a d'altres aspectes, com per exemple al manteniment de productes al magatzem o al llançament de cada comanda. Així fer poques comandes a l'any disminuirà els costos que hi estan vinculats (recepció de comandes, control de qualitat...), però en canvi requerirà molts costos d'emmagatzematge, ja que les comandes seran més grans. Cal, doncs, gestionar aquesta situació de la forma més econòmica possible. Així doncs, s'ha d'establir quin és el model ideal per a comprar o fabricar cada producte i en quina quantitat. Una tasca que, a mesura que augmenta el nombre de referències al magatzem, resulta més complexa

Així, la gestió d'estocs inclou el conjunt d'accions que porten a terme les empreses per tal de monitoritzar i activar les ordres de compra o producció dels productes que es requereixin al magatzem, assegurant que es pot atendre la demanda al mínim cost. Com a conseqüència, l'aprovisionament de productes recolza en un conjunt d'indicadors que serveixen als responsables dels magatzems per saber quan cal realitzar una comanda i en quina quantitat. D'aquesta manera es poden mantenir uns nivells d'estoc equilibrats que permetin abastir les necessitats de cada producte.



Figura: Magatzem. Font: <https://www.mecalux.es/blog/almacen-de-transito>

Així doncs, la gestió d'estocs és la metodologia que permet optimitzar les entrades i sortides dels productes que intervenen en la producció d'una empresa (matèries primeres, semielaborats, productes acabats, recanvis, etc.). Els seus objectius principals són:

- Conèixer la situació de l'inventari en cada moment.
- Classificar els productes en funció de la seva rellevància.
- Optimitzar la inversió en productes i la seva gestió, tenint presents tots els costos implicats.
- Assegurar el servei al client, intern o extern, mitjançant el manteniment dels estocs adequats.

Els beneficis de la gestió eficient dels estocs són: la reducció dels costos de gestió dels estocs (emmagatzematge i llançament de comandes) i un increment del retorn del capital invertit en el magatzem. Actualment la gestió d'estocs és una activitat dinàmica, que aprofita les tecnologies existents i permet determinar la millor política en cada moment concret.

2. Tipologia d'estocs i costos implicats

Els estocs es poden classificar de diferents maneres, si bé els principals tipus són els següents:

- Estoc disponible: Quantitat de producte que hi ha al magatzem per atendre la demanda.
- Estoc mínim: Mínim nombre d'existències d'un producte.
- Estoc màxim: Màxim nombre d'existències d'un producte.
- Estoc de cicle: Productes que serveixen per a atendre una demanda de caràcter cíclic, com per exemple quan en determinats períodes anuals la demanda d'un producte augmenta considerablement respecte a la resta de l'any.
- Estoc de seguretat (ss): Nombre mínim d'existències d'un producte, establert durant el procés de planificació, per tal de contrarestar la variabilitat en la previsió de la demanda o en el termini de lliurament esperats. L'objectiu és evitar ruptures d'estoc.
- Estoc perible: Estoc de productes amb data de caducitat.

- Estoc mort: Estoc de productes sense demanda.
- Estoc òptim: Nivell d'estoc més eficient, respecte a la demanda prevista de cada producte.

L'existència d'aquests estocs implica l'aparició de costos vinculats a la seva gestió. Tenint present els costos unitaris, i també els anuals, fonamentalment els costos són els següents:

- Cost d'adquisició unitari (Ca): Cost de compra o de fabricació d'una unitat de producte.
- Cost de llançament (Cl) o *set-up*: Cost degut al llançament d'una ordre de compra o de fabricació. En el cas de compra, aquest cost inclou els costos vinculats a rebre cada comanda (rebre-la, inspecció de qualitat, situar-la al magatzem, gestionar el pagament, etc.). En el cas de fabricació, inclou els costos de preparació de cada màquina abans de llançar un lot: neteja, calibratge, canvi de motlles...
- Cost de possessió unitari (Cp): Cost degut al manteniment d'una unitat de producte durant un any al magatzem. Té en compte els costos de manipulació, deteriorament del producte, conservació, lloguer del magatzem, etc. Aquest cost es calcula generalment com un percentatge del cost d'adquisició, entenent que al cap d'un any el producte perd aquest percentatge del seu valor. Com a mínim el Cp serà igual al cost d'oportunitat dels diners invertits.
- Cost de ruptura unitari (Cr): Cost degut a la ruptura d'estoc d'una unitat durant un any. Té en compte els costos deguts al descompte que calgui fer al client pel fet de lliurar el producte més tard del previst i els costos implicats per la pèrdua de clients insatisfets amb la ruptura.
- Cost d'adquisició anual (KA): Costos anuals deguts a la compra o fabricació dels productes implicats. Es calcula com el cost d'adquisició unitari de cada producte (Ca) per la demanda anual d'aquest (D).
- Cost de llançament anual (KL): Costos deguts a tots els llançaments d'ordres de compra o fabricació que es fan al cap de l'any. Es calcula com el cost de llançament (Cl) pel nombre de llançaments realitzat cada any.
- Cost de possessió anual (KP): Costos deguts al manteniment de tots els productes al magatzem durant un any. Es calcula com el cost de possessió de cada producte (Cp) per l'estoc mitjà al cap de l'any.
- Cost de ruptura anual (KR): Costos deguts a totes les ruptures d'estoc que hi ha hagut durant l'any. Es calcula com el cost de ruptura de cada producte (Cr) pel volum mitjà de ruptura al cap de l'any.

3. Classificació d'estocs ABC

El mètode de classificació dels inventaris ABC s'utilitza per a organitzar la distribució dels productes en un magatzem segons quina sigui la rellevància per a l'empresa, el seu valor i la seva rotació. Així, se situen els productes al magatzem no en funció del volum o quantitat necessaris, sinó de la rellevància econòmica d'aquests a l'empresa.

Es fonamenta en el principi de Pareto o regla 80/20, segons el qual, aproximadament un 80 % dels resultats són deguts a un 20 % de les causes. Aplicant-ho a la gestió d'estocs, obtindríem que el 20 % dels productes generen el 80 % dels moviments en un estoc, i el 80 % restant, únicament el 20 %. Així doncs, els productes es poden classificar en 3 tipus:

- **Articles A:**
Generalment ocupen un 20 % de l'espai al magatzem, però en canvi són els que més rotació tenen. Són els productes en què l'empresa inverteix més pressupost i generen aproximadament el 80 % dels ingressos, i per tant és fonamental no tenir ruptures d'estoc. Són els articles més crítics, raó per la qual cal tenir un control d'estoc exhaustiu o permanent. Els articles A se situen a les zones baixes amb accés directe al moll de càrrega.
- **Articles B:**
Representen aproximadament un 30 % de les referències al magatzem, i són els productes amb una rotació mitjana. Tenen menys rotació i valor que els articles A. La seva gestió d'estocs es pot portar a terme mitjançant l'establiment d'uns estocs mínims i màxims a complir. Al magatzem, se situen en zones d'alçada i accés intermedis.
- **Articles C:**
Sovint representen més del 50 % dels productes emmagatzemats, si bé són els que tenen menys demanda i rotació. Per tant, no cal destinar tants recursos al seu control i gestió, i sovint es treballa amb un important estoc de seguretat. Els articles C se situen a les zones menys accessibles del magatzem i més allunyades del moll de càrrega.

Per tal de classificar els productes segons el sistema ABC, es poden utilitzar diferents indicadors, en funció de quin sigui l'objectiu de l'empresa. Els tres principals són els següents:

- **Cost unitari de cada producte:**
Ordenar els productes segons el cost unitari de cadascun té sentit quan les diferències de costos són molt elevades entre ells. D'aquesta manera es podrà posar més atenció en els productes que tenen un cost més elevat, els articles A.
- **Cost total de l'inventari:**
S'ordenen els productes segons el cost de l'inventari, és a dir, el cost unitari de cada producte pel nombre de productes existents al magatzem. D'aquesta manera s'obté una aproximació molt més acurada als costos reals de l'inventari, si bé és necessària una actualització constant del nivell d'inventari de cada producte.
- **Utilització i valor de l'inventari:**
És el mètode més habitual, atès que considera no només el cost total de l'inventari, sinó també la rotació dels productes. Així, els articles A seran els productes amb elevada quantitat al magatzem i elevada rotació.

També es podrien tenir presents altres característiques, com per exemple el marge de benefici de cada producte, o els costos en cas de ruptura d'estoc.

Sigui quin sigui l'indicador utilitzat, les dades obtingudes per a tots els productes en un magatzem s'organitzen de més gran a més petit, i en aquest ordre, i de forma general, el 20 % de productes més rellevants seran els articles A, el següent 30 % seran els B i el darrer 50 %, els C.

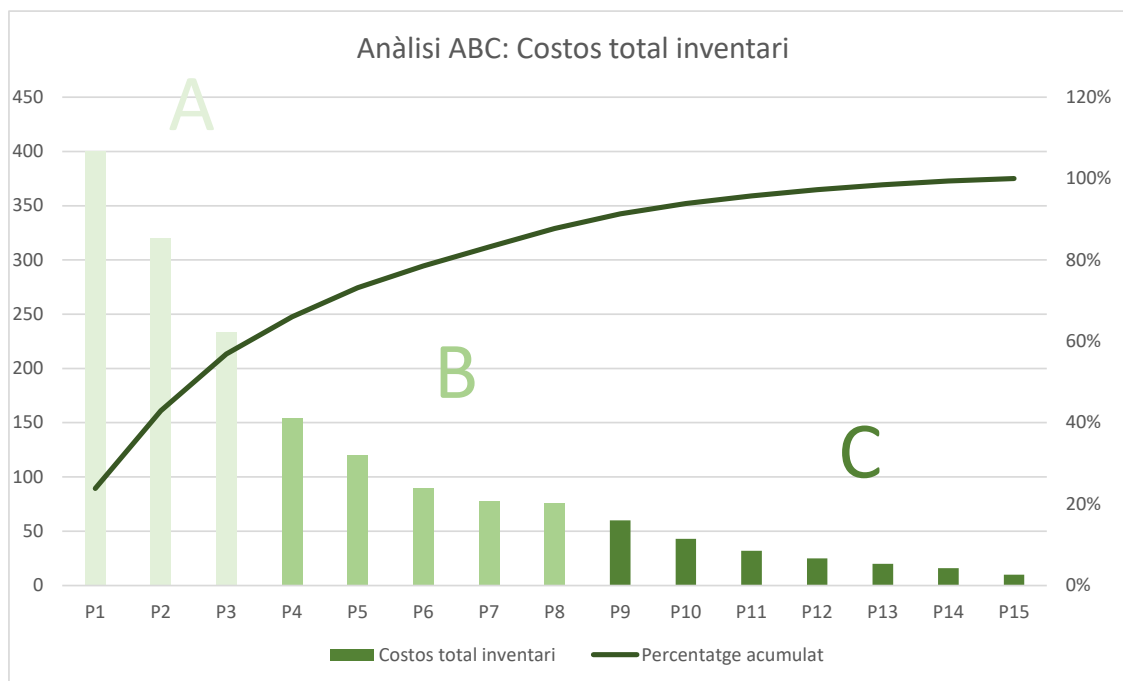


Figura: Classificació de productes segons l'anàlisi ABC (costos totals d'inventari).

4. Polítiques de gestió dels estocs

La gestió d'estocs més bàsica es fonamenta a observar unes regles de subministrament que determinen a quin nivell d'existències d'un producte o en quin període cal fer una comanda. Determinar correctament aquestes regles és bàsic per tal d'evitar acumulacions indesitjables de productes.

- Nivell de cobertura (S): Màxim nombre de productes que pot assumir un magatzem, limitat, generalment, per la seva capacitat màxima.
- Lot de compra/fabricació (Q): Quantitat de productes que es compren o fabriquen en cada comanda.
- Període de revisió (T): Període de temps en què es revisa l'estat de l'estoc disponible per tal de decidir si cal comprar o fabricar més producte o no.
- Temps de lliurament (t) o *lead-time*: Temps entre que es realitza una comanda de compra i que arriba el producte al magatzem o, en el cas de fabricació, entre que s'inicia la producció i que el producte està disponible per a la següent tasca productiva.
- Punt de comanda (s): Nivell de referència que s'utilitza per a llançar una comanda, de compra o producció, quan l'estoc real és menor que aquest. El punt de comanda serà directament proporcional al temps de lliurament o fabricació del producte i a la demanda prevista durant aquest període.

$$\text{Punt de comanda (s)} = \text{demanda (d)} \times \text{temps de lliurament (t)}$$

Tenint presents les variables anteriors, es poden determinar diferents estratègies generals per a la gestió dels estocs. Així, en funció de si la revisió de l'estoc és contínua o periòdica i de si la

quantitat de compra o fabricació és fixa o bé limitada a una màxima cobertura, quedaran establertes les quatre opcions més comunes.

	Quantitat fixa (Q)	Reomplir fins a cobertura (S)
Revisió contínua	(s,Q) Quan el nivell és menor que s, es demana Q	(s,S) Quan el nivell és menor que s, es demana fins a S
Revisió periòdica (T)	(T,Q) Sense sistema d'informació	(T,S) Per a cada període T es demana fins a S

Taula: Estratègies generals per a la gestió dels estocs.

Ara bé, analitzant les estratègies anteriors es pot plantejar: Té sentit produir per lots? Quina ha de ser la mida d'aquests lots? Observant les empreses es comprova que és força freqüent; per tant, hi ha d'haver un avantatge clar a produir per lots.

Normalment els processos es programen per lots. Es creu que la fabricació en lots més grans permet absorbir els costos de llançament o *set up* entre un nombre més gran d'unitats. Això és cert. Per tant, fabricar en lots grans es tradueix en una disminució del cost per unitat.

A la figura següent es planteja un exemple amb un cost de llançament (Cl) de 100 € i un cost unitari d'adquisició (o producció) (Ca) de 20 €. Així, el cost unitari total inclou una part que depèn de Cl i una altra que depèn de Ca. Concretament:

$$\text{Cost total unitari} = \frac{Cl \cdot (Q \cdot Ca)}{Q}$$

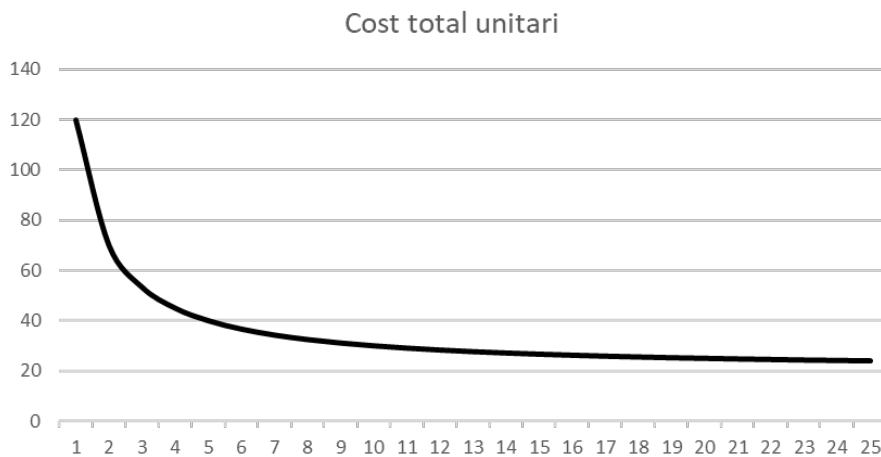


Figura. Cost unitari total en funció de la mida del lot.

Veient la figura, s'observa que si es fabrica el lot mínim (una unitat), el cost per unitat és de 120 €. Si el lot és de dos unitats, el cost per unitat és de 80 €. Així, es comprova com la funció del cost unitari és asintòtica en el cost variable (20 €). Si el lot fos infinit, el cost unitari seria només el cost variable. Quan el lot és infinit, el cost unitari és només el cost variable. El cost de llançament (Cl) quedaria distribuït entre infinites unitats i, per tant, ha desapareixeria.

De totes maneres, ben mirat hi ha dues possibles estratègies per reduir el cost total unitari:

- Augmentar la mida del lot:
La primera estratègia condueix a fabricar en lots grans, i per tant a tenir *lead time* més llargs i *WIP (work-in-progress)* alts. Tot plegat, aquesta estratègia afecta negativament la qualitat del producte. Això és el que es coneix com el paradigma de *producció en massa* (empresa Ford als EUA a principis del segle XX).
- Disminuir el cost de llançament (Cl) o cost de *set-up*:
La segona estratègia és millor en termes d'agilitat, d'accés ràpid al client i de qualitat. Proporciona flexibilitat per canviar el procés si el client exigeix alguna variació o personalització en el producte. Requereix un esforç en enginyeria per tal de disminuir, i idealment eliminar, els costos de *set-up*. Aquesta estratègia va ser introduïda per primera vegada per Toyota al Japó als anys seixanta. Va dur al que es coneix com el paradigma de *producció ajustada (lean production)*.

5. Lot econòmic: fórmula de Harris-Wilson o EOQ

Si es preveu una certa demanda anual d'un producte, és clar que no serà òptim realitzar una multitud de comandes, atès que els costos anuals de llançament seran molt alts. Tampoc serà òptim realitzar comandes exageradament elevades, atès que es tindria un cost anual de possessió molt elevat. Entre les dues possibilitats extremes, de ben segur que hi ha una mida del lot de compra que permet optimitzar els costos: ni excessius llançaments de comandes, ni excessiu estoc al magatzem.

El lot econòmic de producció (*economic order quantity – EOQ*) és un model matemàtic, definit per Harris i Wilson, que permet establir quina és la mida del lot de compra o producció que minimitza els costos de gestió d'estoc. Es pot aplicar sempre que es compleixin les hipòtesis següents:

- L'horitzó d'estudi és il·limitat; per tant, el procés continua indefinidament.
- La demanda és contínua i homogènia en el temps. Generalment es treballa amb la demanda anual (D).
- El temps de lliurament (*lead time*) del proveïdor és constant i conegut.
- El productes són produïts i venuts simultàniament.
- No s'accepten ruptures d'estoc.
- El lot a demanar (Q) és constant, i entra al sistema en bloc i de forma instantània.
- Els costos totals de gestió dels estocs es calculen a partir dels costos de possessió unitaris (Cp) i dels costos de cada llançament o comanda (Cl). Aquests són constants en el temps.
- No existeixen descomptes en el cost d'adquisició o producció unitari (Ca) en funció del volum.

El model parteix de l'anàlisi dels costos totals anuals de la gestió dels estocs, tenint presents les següents variables:

KT = Costos anuals de gestió dels estocs

KL = Costos anuals deguts als llançaments de cada lot

KP = Costos anuals de possessió

KA = Costos anuals d'adquisició

D = Demanda anual del producte

Ca = Cost unitari d'adquisició o producció

Cp = Cost unitari de possessió anual; generalment calculat com un percentatge del Ca

Cl = Cost de cada llançament

Q = Lot de compra o fabricació (* indica l'òptim)

N = Nombre de llançaments anuals

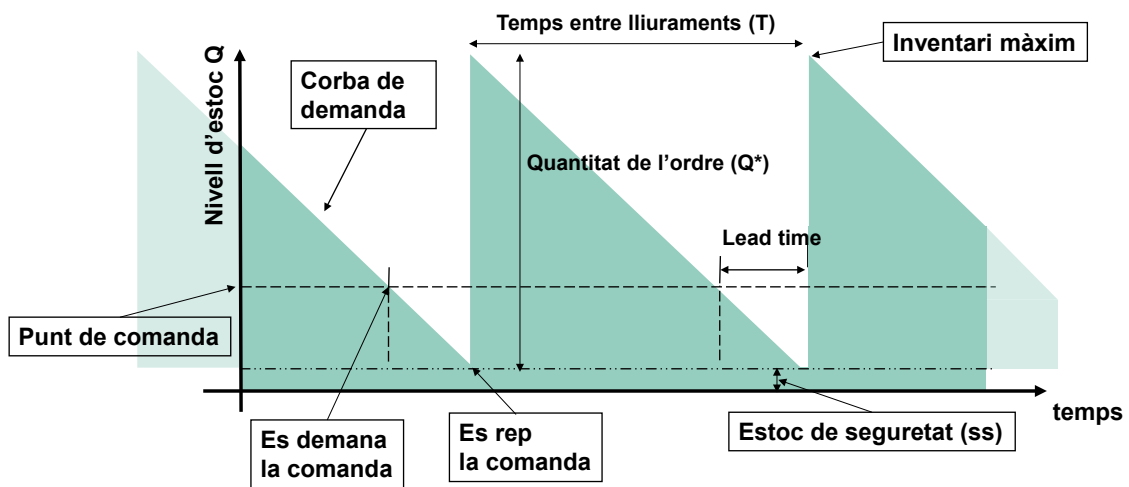


Figura: Model de lot econòmic (EOQ).

Així doncs, els costos anuals de gestió d'estoc es poden definir com:

$$KT = KA + KL + KP = Ca \cdot D + Cl \cdot N + Cp \cdot \text{Estoc mitjà} = Ca \cdot D + Cl \cdot \frac{D}{Q} + Cp \cdot \frac{Q}{2}$$

Per tal d'optimitzar els costos respecte al lot a escollir, es deriva l'equació respecte a Q i s'igualava a zero.

$$\frac{d KT}{d Q} = -Cl \cdot \frac{D}{Q^2} + \frac{Cp}{2} = 0$$

S'obté que el lot econòmic òptim Q^* equival a:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot Cl}{Cp}}$$

I d'aquesta manera:

$$\text{Nombre de llançaments anuals (N)} = \frac{D}{Q}$$

$$\text{Temps entre llançaments (T)} = \frac{Q \cdot \text{Dies operatius anuals}}{D}$$

Cal tenir present que aquest és un model molt “robust”, cosa que significa que encara que es produeixin canvis més o menys significatius en les variables que s'assumeixen com a constants (per exemple, la demanda anual), l'augment dels costos totals respecte al punt òptim no és gaire gran. Així, per tant, malgrat que sigui molt difícil que les hipòtesis es compleixin en la seva totalitat, el model ens pot donar una mida de lot propera a l'òptim que permeti gestionar les ordres de cada producte.

Una extensió d'aquest model és el model “EOQ amb descompte per quantitat”, ajustat a diferents escenaris de descompte en la compra de productes. Aquest model considera una Q inicial que s'obté aplicant la mateixa fórmula del model EOQ per a cada rang de quantitat amb descompte. Si la Q inicial cau dins d'aquest rang (d'unitats a comprar amb descompte) es manté; altrament, s'ha de substituir per la quantitat més propera a obtenir el descompte en aquest rang. Una vegada calculada la Q per a cada rang de descompte, cal calcular els costos totals anuals de gestió d'estoc per a cada cas. Se seleccionarà el rang de descompte que tingui un cost total menor.

6. Lot econòmic amb producció i consum en paral·lel (EPQ)

Una variació del model anterior, adequat per aplicar-lo en el cas de fabricació, és quan es produeix simultàniament consum del producte i fabricació durant un període de temps. És a dir, hi ha un determinat període en què mentre es va fabricant el producte també s'està consumint, en paral·lel. També en aquest cas es pot calcular quin és el lot òptim de fabricació que optimitzi els costos totals de gestió. Aquest model s'anomena *economic production quantity* (EPQ).

En primer lloc, caldrà definir les dues taxes següents:

d = Demanda diària, equivalent a la demanda anual (D) dividida pels dies de treball

p = Producció diària

La taxa p ha de ser més gran que d , altrament no es podria cobrir mai amb la producció la demanda anual esperada.

S'estableixen dos períodes diferenciats:

T1 = Temps en què es produeix i es consumeix al mateix temps, i per tant la taxa resultant de fabricació és $p-d$.

T2 = Temps en què només es consumeix, i per tant la taxa resultant de consum és d .

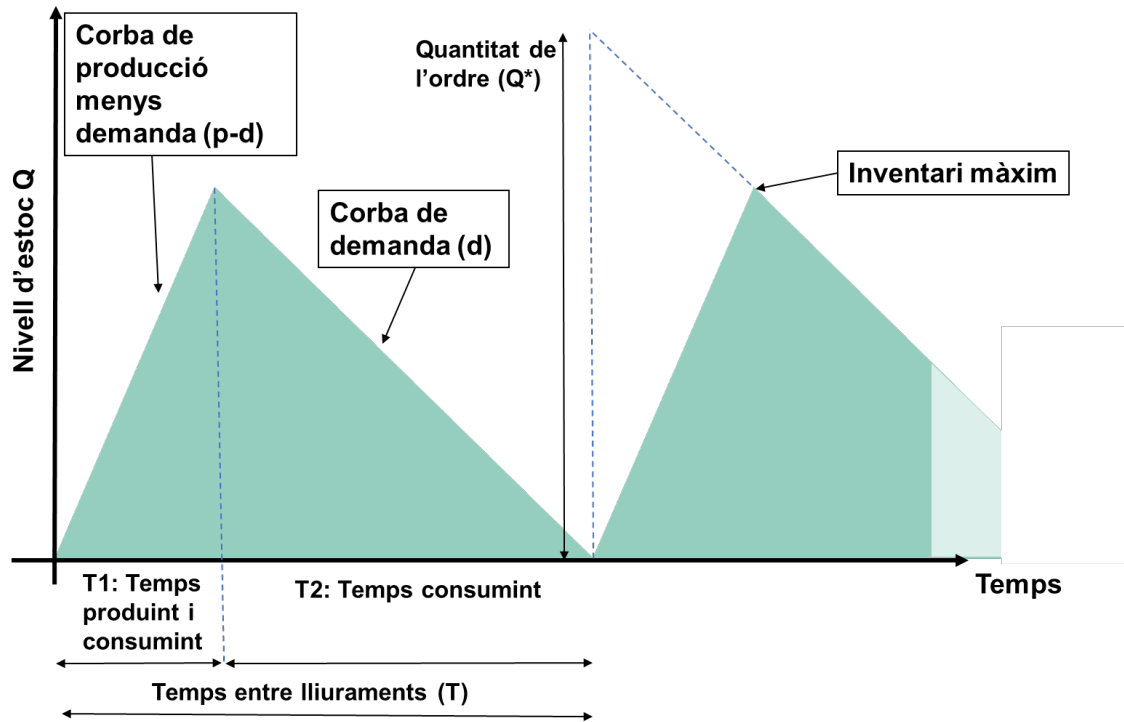


Figura: Model de lot econòmic amb producció i consum en paral·lel (EPQ).

Seguint els mateixos procediments anteriors, es tindria:

$$KT = KA + KL + KP = Ca \cdot D + Cl \cdot N + Cp \cdot \text{Estoc mitjà} = Ca \cdot D + Cl \cdot \frac{D}{Q} + Cp \cdot \frac{Q}{2} \cdot \frac{(p-d)}{p}$$

I operant de la mateixa manera, el lot òptim resultant seria:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot Cl}{Cp \cdot \frac{p-d}{p}}}$$

L'inventari màxim assolit seria:

$$I \max = Q \cdot \frac{(p-d)}{p}$$

Els diferents temps poden determinar-se a partir d'aquest inventari màxim i de les taxes de producció i consum, de forma que quedaria:

$$T1 = \frac{I \max}{p-d} = \frac{Q}{p}$$

$$T2 = \frac{I \max}{d} = \frac{Q(p-d)}{p \cdot d}$$

Igual que en el cas anterior, es tracta d'un model "robust", i per tant s'utilitza per a determinar aproximadament com haurien de ser els lots de fabricació de cada producte per tal de minimitzar els costos de gestió.

7. Lot econòmic amb demanda diferida

Quan sigui factible diferir la demanda —és a dir, lliurar-la amb un cert retard respecte a la data prevista—, també es possible modelitzar-ho i optimitzar el lot de compra o fabricació.

En aquest cas cal tenir present que el fet de diferir també comportarà un cost vinculat als descomptes que calgui fer als clients pel fet de lliurar el producte amb retard o, per exemple, per les possibles pèrdues de clients degut a aquesta situació. Així doncs, caldrà establir algunes variables addicionals a les anteriors:

KR = Costos anuals de ruptura dels estocs

Cr = Cost unitari de ruptura anual

Seguint els mateixos procediments anteriors, es tindria:

$$KT = KA + KL + KP + KR = Ca \cdot D + Cl \cdot N + Cp \cdot \text{Estoc mitjà} + Cr \cdot \text{VR mitjà}$$

On VR = Volum de ruptura

Tenint presents els períodes pels quals hi haurà estoc disponible o bé ruptura, s'arribaria a:

$$KT = KA + KL + KP + KR = Ca \cdot D + Cl \cdot \frac{D}{Q} + Cp \cdot \frac{(Q - VR)^2}{2 \cdot Q} + Cr \cdot \frac{VR^2}{2 \cdot Q}$$

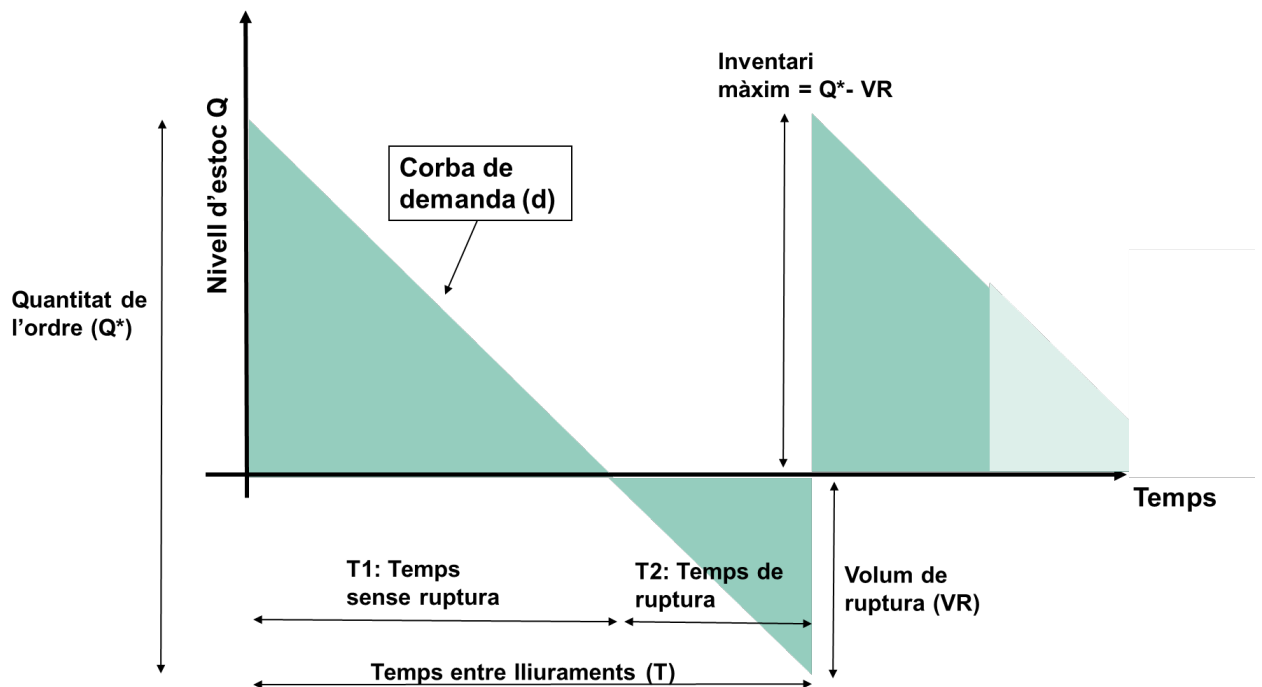


Figura: Model de lot econòmic amb producció amb demanda diferida.

Optimitzant els costos anteriors es resol:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot Cl \cdot (Cp + Cr)}{Cp \cdot Cr}}$$

$$VR^* = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot Cl \cdot Cp}{Cr \cdot (Cp + Cr)}}$$

És interessant veure que no només es calcula un lot òptim de fabricació (Q^*) sinó també un volum de ruptura òptim (VR^*). Per tant, la ruptura establerta no és deguda directament a una mancança puntual d'estocs, sinó que està planificada a priori. És a dir, la gestió d'estocs estableix a priori que hi haurà un conjunt de clients als quals no es podran lliurar les comandes a temps. Això es deu al fet que en aquests casos els costos anuals de ruptura són menors que els costos anuals de possessió, és a dir, sortiria més car disposar d'estoc per a tots els clients que no preveure que a alguns se'ls lliurarà el producte amb retard.

8. Lot de gestió amb demanda no homogènia: mètode de Silver i Meal

Un dels problemes més habituals en la gestió dels estocs és la gran variabilitat en la previsió de la demanda. Els models anteriors es podien realitzar tenint present una demanda força constant durant l'any, la qual cosa sovint no es compleix, atès que molts productes tenen una elevada estacionalitat.

En aquest cas és útil calcular el coeficient de variabilitat, que servirà per determinar si els anteriors models poden utilitzar-se o no. Concretament, es fa referència a:

$$VC = \frac{H \cdot \sum_{t=1}^H D_t^2}{(\sum_{t=1}^H D_t)^2} - 1$$

On:

H = Períodes (setmanes, mesos...) en què es coneix la demanda

D_t = Demanda en cada període t

Així, s'estableix que quan $VC \leq 0,25$ es pot considerar que la demanda és homogènia i es recomana utilitzar el model de Harris-Wilson (EOQ) per al càlcul del lot òptim. Altrament, quan $VC > 0,25$ es recomana utilitzar l'heurística de Silver-Meal.

L'heurística de Silver-Meal no ens donarà el lot òptim, però sí una bona solució que podria acostar-se a aquest òptim. A més, i tenint present que s'utilitza per quan la demanda és molt variable entre períodes, ens aportarà diferents lots en funció de quina sigui aquesta demanda. És a dir, no aporta, com en els casos anteriors, un únic lot òptim a utilitzar durant tot el període sinó uns quants.

L'heurística de Silver-Meal es fonamenta a minimitzar els costos de gestió d'estoc per períodes tenint present que es poden definir de la següent manera:

$$KT_t = \frac{KL + KP}{t} = \frac{1}{t} \cdot (Cl + Cp \cdot \sum_{j=1}^t (j-1) \cdot D_j)$$

on:

KT_t = Cost mitjà per període

T = Nombre de períodes coberts per Q

D_t = Demanda prevista durant el període j

Concretament, l'heurística estableix la necessitat de calcular el cost mitjà per període per a cada possible lot (Q) a establir. És a dir, cal calcular aquest cost quan Q únicament cobreix la demanda del primer període, quan cobreix la dels 2 primers, quan cobreix la dels 3 primers, etc.

Una vegada calculades totes les possibilitats, s'escull la que té un menor cost per període i s'estableix que el primer lot Q cobrirà la demanda de tots els períodes afectats. Cal tenir present que una vegada es detecti que el cost mitjà per període comença a créixer, continuarà creixent en tots els períodes següents.

A partir d'aquest punt, es torna a iniciar l'heurística per als períodes següents.

Capítol 8. Just in time

Objectiu: Conèixer l'objectiu de la filosofia de producció *just-in-time* i algunes de les eines de suport que en faciliten la implementació.

Resultats d'aprenentatge:

Definició i origen del *just-in-time*.

Sistema *pull* versus sistema *push*.

Eines de suport per a la implementació del JiT.

1. Introducció: definició i origen del sistema d'organització *just in time*

El sistema d'organització *just-in-time* (JiT) és una filosofia de producció orientada a la demanda. El seu principal objectiu és augmentar beneficis eliminant tots aquells costos que no siguin imprescindibles en el procés de producció sense deixar de satisfer les necessitats del clients. El concepte prové de l'expressió en anglès *just in time* i significa "just a temps".

Tal com indica l'expressió mateixa, el JiT consisteix a aconseguir que tant els subministraments arribin al sistema de producció en el moment just com que els productes finals arribin al client en el moment adequat. És a dir, tenir les matèries primeres i els components a disposició de la producció en la quantitat i el moment que són necessaris i lliurar el producte final al client en la quantitat i el moment prèviament pactats, amb un cost mínim.

L'origen del concepte JiT s'atribueix al fundador de la marca japonesa Toyota, Sakichi Toyoda, al seu fill Kiichiro i a l'enginyer industrial Taiichi Ohno, que fou qui finalment l'implementà dins la marca automobilística, com a responsable del taller de màquines. Per aquesta raó el sistema JiT es considera un dels pilars del TPS (*Toyota production system*).

Després de la derrota del Japó a la Segona Guerra Mundial, i amb el consegüent augment dels costos de producció, l'empresa Toyota va decidir redefinir el seu sistema productiu per fer front a la forta competència externa, sobretot la indústria nord-americana, que competia amb grans volums de producció i un baix cost degut a les economies d'escala.

L'aposta de Toyota es va basar en l'optimització del procés de producció mitjançant la reducció de costos que no aportessin valor al producte. En concret, l'enginyer Ohno va fer una llista de 7 costos o malbarataments (*muda*, en japonès) que posteriorment ha estat àmpliament difosa:

1. Sobreproducció
2. Temps d'espera
3. Transports innecessaris
4. Processament inapropiat dels productes
5. Excés d'inventari
6. Moviments innecessaris durant la producció
7. Productes defectuosos

Entre tots els costos, el que es considera més perillós és l'excés d'inventari, ja que la seva presència pot invisibilitzar altres costos o malbarataments que existeixen a l'empresa que no són detectables precisament per l'excés d'inventari.

Aquest sobreestoc sol ser causat per una mala gestió de materials. Per exemple, comprar més del que és necessari per aprofitar una oferta o descompte. Un excés d'estoc comporta uns costos associats al manteniment d'aquest estoc, un capital immobilitzat que no aporta valor al producte i en dificulta la gestió. A més, aquest excés pot provocar una baixada en els nivells de qualitat dels productes, ja que el mateix estoc "oculta" errors de producció, defectes que es detecten posteriorment en el procés productiu, etc. En paraules del mateix Ohno, "com més inventari acumuli una empresa, més probable és que no tingui allò que realment necessita".

Per representar els malbarataments ocults degut a l'excés d'inventari se sol utilitzar l'analogia del "riu de les existències", on es representa l'empresa com un vaixell que navega entre les aigües, és a dir, entre el nivell d'existències. A mesura que el nivell de l'aigua va disminuint apareixen cada cop més roques, és a dir, possibles problemes (i costos) que fins llavors havien estat amagats sota l'aigua, com podrien ser la falta de qualitat, els temps de canvi o la mida del lot, entre d'altres.

La filosofia JIT proposa retirar aquestes roques o problemes, no augmentar el nivell de l'aigua o d'existències per ocultar els problemes reals.

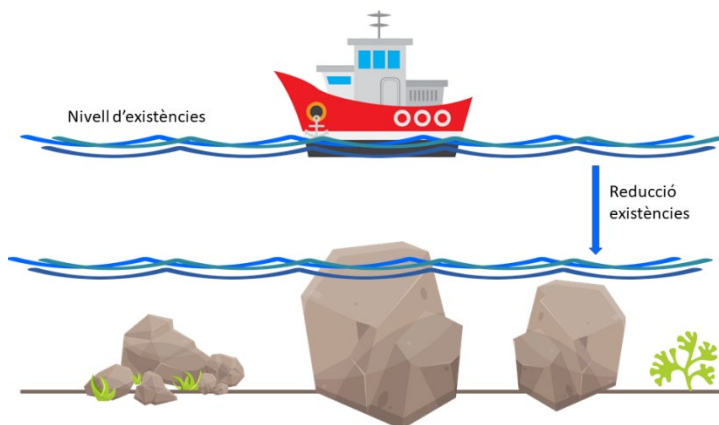


Figura: Riu de les existències. Font: Elaboració pròpia.

2. Sistema *pull* versus sistema *push*

Tradicionalment, els sistemes de producció en massa s'han basat en la filosofia *push* o d'empenta. És a dir, les ordres de treball de les diferents etapes del procés productiu es generen per donar resposta a una previsió de la demanda i a les comandes en ferm. Se sol dir que *s'empeny* el producte des de la demanda de materials fins al client, tal com s'observa a la figura.

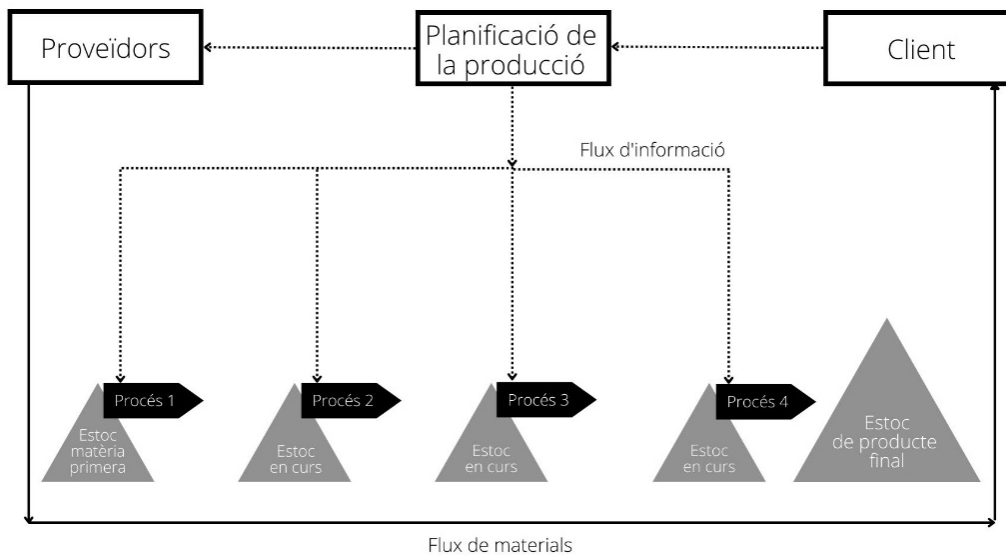


Figura: Sistema de fabricació *push*. Font: Elaboració pròpia basada en *Producció i Logística*. CIDEM (2003).

El sistema de producció *pull* o d'arrossegament, per contra, planifica des de l'anàlisi de la demanda i la gestió d'estocs. Cada etapa del procés productiu recull els elements o peces de l'anterior en el moment en què els necessita i en la quantitat que els necessita, i elimina d'aquesta manera els costos d'estocs i de sobreproducció. És la comanda del client el que inicia el procés de producció i estira tot el procés de forma concatenada, tal com es mostra a la figura.

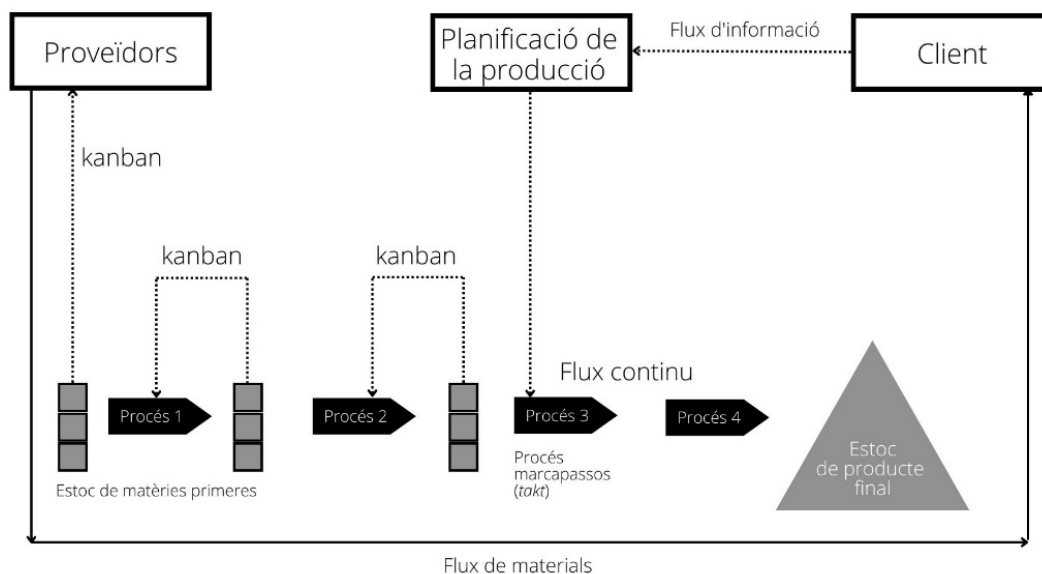


Figura: Sistema de fabricació *pull*. Font: Elaboració pròpia a partir de *Producció i Logística*. CIDEM (2003).

A diferència del sistema *push*, en què la planificació està centralitzada i, per tant, les àrees operatives de producció no tenen cap informació respecte a la demanda real del client, en el sistema *pull* la planificació es focalitza en un dels processos productius, que serà el que marcarà el ritme de treball de tota la cadena de producció. Aquest procés referent s'anomena marcapassos o *takt* i se sol situar a prop del final de la cadena, a l'espera del muntatge final.

Els processos anteriors al procés *takt* es poden regular mitjançant un sistema de targetes, anomenat *kanban*, que indiquen ordres a demanda entre un procés client i un procés proveïdor fins arribar a l'inici del procés productiu. Aquestes targetes solen ser de fabricació, de transport de materials o fins i tot d'urgència.

Aquest sistema de targetes disposa de petits magatzems reguladors entre el procés client i el procés proveïdor que generen la informació i la visibilitat necessària perquè el procés proveïdor sàpiga el que ha de fabricar en cada moment. El sistema de funcionament és senzill. Mentre que els *kanban* de transport generen ordres per al transport d'estoc del material des del procés proveïdor al procés client, el de producció genera ordres de fabricació a partir de la demanda del procés client.

L'ús de les targetes *kanban* dona diferents beneficis:

- Reducció de la quantitat de material que intervé en el procés
- Estalvi en l'espai necessari per emmagatzemar el material
- Reducció dels recorreguts de reposició i consum
- Estalvi del temps necessari per subministrar un material
- Eliminació del trencament d'estocs
- Facilitar la gestió visual dels magatzems i la visualització dels colls d'ampolla

3. Eines de suport

La implementació del sistema de targetes *kanban* dins el JiT no és una tasca senzilla, ja que prèviament s'ha d'aconseguir que el flux de material dins la línia de producció sigui constant i anivellat. L'existència de grans fluctuacions dificulta la integració del sistema. Per a facilitar la implementació del *kanban* existeixen diferents eines. A continuació se'n descriuen algunes.

3.1. *Heijunka* (anivellar la producció)

El sistema *heijunka* s'allunya del model tradicional de producció que es basa en la producció de lots de mides grans. El processament per lots ha estat un mètode altament utilitzat en l'organització del procés de fabricació des de la invenció de la producció en massa. Aquest tipus de processament es basa en la producció de grans lots de productes sense tenir en compte la fluctuació de la demanda dels clients.

L'objectiu de *heijunka* és justament el contrari, obtenir una producció flexible, adaptada a les necessitats de la demanda i evitar la creació d'estocs intermedis entre dues etapes de fabricació, amb la consegüent reducció de costos d'emmagatzematge i manteniment. És a dir, ajustar al màxim els lots, disminuint-ne la mida, de manera que s'ajustin el màxim possible a la demanda real del producte.

Òbviament, *heijunka* no és aplicable si hi ha nul·la o poca variació de producte. Per tant, la gestió pràctica del *heijunka* requereix un bon coneixement de la demanda dels clients i els efectes d'aquesta demanda en els processos.

3.2. *Layout* (distribució en planta)

La distribució en planta és l'ordenació física dels elements que constitueixen una línia de producció. Aquesta ordenació inclou els espais necessaris per als moviments, l'emmagatzematge i totes les activitats que es duen a terme en la línia.

L'objectiu d'una distribució òptima de la planta és optimitzar tant l'espai com el temps de treball. Cal tenir en compte que no hi ha un sol model de distribució en planta. Així, en termes generals existeixen tres tipologies de distribució en planta: distribució per producte, distribució per procés i distribució de posició fixa.

La distribució per producte s'aplica quan la producció és contínua o repetitiva. Els llocs de treball se situen un al costat de l'altre i segueixen l'ordre de les operacions que s'han de dur a terme en el procés productiu. Es tracta d'un procés totalment automatitzat. Un exemple seria un restaurant de tipus autoservei.

La distribució per procés es realitza quan la mida dels lots és variable i hi ha una àmplia varietat de productes. A diferència de la distribució per producte, la maquinària i els treballadors s'agrupen per similitud d'operacions i els productes només circulen pels tallers o departaments que cal. Un exemple seria un hospital, on els pacients només van als serveis on han de rebre tractament.

La filosofia JiT evita justament la distribució per procés. El fet que la seva filosofia es caracteritzi per respondre a les necessitats dels clients provoca que la distribució hagi de ser flexible i el nombre de treballadors s'hagi d'adaptar a la demanda. La forma més habitual, segons la filosofia JiT, és la distribució en forma de U. La principal característica d'aquesta tipologia és que l'entrada i la sortida del procés productiu estant distribuïts de forma paral·lela, i això permet que el nombre d'operaris pugui adaptar-se als canvis de la demanda. Per tant, la distribució en forma de U permet major flexibilitat però exigeix una major polivalència dels operaris.

Finalment, la distribució de posició fixa s'aplica quan el producte, per la seva mida o pes, no es pot desplaçar, i llavors és la maquinària i els treballadors els que es desplacen per tal de realitzar el procés productiu. Un exemple seria la construcció d'un vaixell a les drassanes d'un port marítim.

3.3. SMED (*single minute exchange of die*)

L'SMED es considera una eina de millora contínua que té com a objectiu reduir el temps de preparació/canvi dins el procés productiu. Una millor eficiència del procés provocarà una disminució del risc que es produeixin defectes en el material i avaries en la maquinària. Alhora, la reducció de temps es podrà destinar a incrementar la productivitat i reduir l'estoc de material. En paraules del creador d'aquesta eina, Shigeo Shingo, "el mode més ràpid de canviar una eina és no canviar-la de cap manera".

La implementació de l'SMED segueix 7 etapes:

1. Preparació prèvia: recopilar tota la informació possible del producte i de la maquinària del procés productiu, així com dades històriques del seu funcionament.
2. Analitzar l'activitat en què se centrarà l'SMED: analitzar en detall com es produeix el canvi i la qualitat actual del producte que es produeix.

3. Diferenciar entre preparació interna i externa: es considera preparació interna la que es pot realitzar amb la maquinària aturada, i externa quan es pot realitzar amb la maquinària en funcionament.
4. Organitzar les preparacions externes: l'objectiu d'aquesta etapa és comprovar que totes les preparacions externes estaran preparades un cop la maquinària estigui en funcionament.
5. Convertir la preparació interna en externa: realitzar propostes de millora per reconvertir el temps de preparació intern dins un pla estructurat d'acció.
6. Reduir els temps de preparació interns: realitzar propostes de millora per reduir els temps de preparació interns dins un pla estructurat d'acció.
7. Seguiment: un cop realitzades les etapes anteriors, comprovar les possibles desviacions sobre la planificació de millores realitzades i, si escau, realitzar accions correctores.

Capítol 9: Sistemes de cues d'espera

Objectiu: Identificar i modelar situacions productives amb cues d'espera, a partir del coneixement de les variables a analitzar i de sistemes d'optimització que minimitzin el temps d'espera.

Resultats d'aprenentatge:

Identificació del fenomen de les cues i les seves principals característiques.

Modelització de processos d'espera.

Anàlisi dels costos associats a les esperes.

Psicologia associada als temps d'espera.

Anàlisi operacional de sistemes d'espera: temps d'espera, longitud de la cua i ocupació del servidor.

Simulació de models de cues.

1. Introducció

La figura mostra una cua de gent. La componen persones que estan esperant ser ateses per algun servidor, que en aquest moment està atenent algun altre client. És important remarcar que aquesta gent està esperant perquè vol rebre un servei. Estan disposats a esperar perquè aquest servei els aporta valor. Qualsevol d'aquestes persones haurà d'esperar fins que el servidor pugui atendre els que té davant seu. Aquesta espera és molt diferent dels que esperen que arribi l'autobús. En aquest cas no hi ha cua, sinó que simplement algú (diverses persones al mateix temps) esperen que arribi l'autobús. Tampoc hi ha cua quan uns estudiants esperen a l'aula que arribi el professor i comenci la classe.

Ara bé, una vegada arriba l'autobús, llavors sí que hauran de fer cua per accedir-hi. No poden entrar-hi tots de cop. La porta només té capacitat perquè passi un client cada 3 segons. En aquest cas, el servei seria "pujar a l'autobús", i el servidor (en aquest cas, la porta de l'autobús) només pot servir un client cada tres segons, de mitjana.

Cal identificar bé què és una cua. No és simplement gent que espera. És efectivament una fila de gent que espera, però esperen perquè el servidor va atenent individualment els clients.



Figura. Cua de gent.

En el cas de la cua de la figura, cada persona rebrà el servei en el moment que li toqui. La unitat d'anàlisi és la persona. Més genèricament, s'anomena "arribada" a aquesta unitat que espera per poder rebre un determinat servei d'un servidor.

Es poden aplicar les mateixes lleis tant a processos per proveir un servei com a processos del món de la fabricació de béns físics. Caldrà, però, canviar la terminologia. Per exemple, en l'entorn de la indústria de producció de béns físics es pot parlar d'estocs (quantitat d'unitats que esperen davant d'una màquina o departament per ser processades), mentre que la gent que s'espera a la perruqueria es defineixen com a gent a la cua, no com a estoc.

La taula següent presenta algunes situacions en què es produeixen cues, tant en l'entorn industrial com en el de serveis.

Taula. Exemples de situacions de cues.

Situació	Arribades a la cua	Servei demanat
Peatge autopista	Conductor que vol pagar	Pagar
Supermercat	Gent	Pagar la compra
Metge	Pacients	Atenció mèdica
Port	Vaixells	Càrrega de mercaderia
Taller de mecanització	Peces per ser mecanitzades	Mecanització (soldadura...)
Centre d'atenció telefònica	Clients que truquen	Atenció a la trucada
Taller	Màquines avariades	Reparació de la màquina

2. Costos associats a un sistema de cues

Es poden diferenciar els costos en què incorre el servidor pel fet de proveir el servei dels costos que "paga" el client pel fet d'esperar. La figura mostra com són aquests costos en funció de la qualitat del servei que es presta. La qualitat es podria mesurar, per exemple, com el temps d'espera a la cua. Així, si es vol prestar un servei excel·lent (poca espera per al client), caldria situar-se a la dreta de la figura i els costos per al proveïdor seran alts. En el cas de l'estació de pagament al supermercat, com més caixes per cobrar hi hagi (cada una atesa per una persona), més alt és el cost de servir. Si s'analitzen els costos en què incorre el client (que podem pensar que són proporcionals al temps d'espera), es veu com els costos són baixos a la dreta de la figura.

Per tant, el comportament de les dues funcions de costos són molt diferents: mentre que els costos de proveir el servei augmenten amb la qualitat del servei, els costos associats a l'espera disminueixen. Així que cal buscar el cost total, i buscar l'òptim d'aquest cost total.

Encara es podria anar un pas més enllà, i suposar que el proveïdor vol augmentar la qualitat del servei, pensant que així pot atreure encara més mercat. Això vol dir desplaçar el punt òptim cap a la dreta de la figura. En aquest cas pot optar per disminuir el pendent de costos de proveir el servei, cosa que depèn directament del proveïdor, o bé intentar abaixar la corba de costos del client. Això últim serà més complicat perquè no depèn directament del servidor.

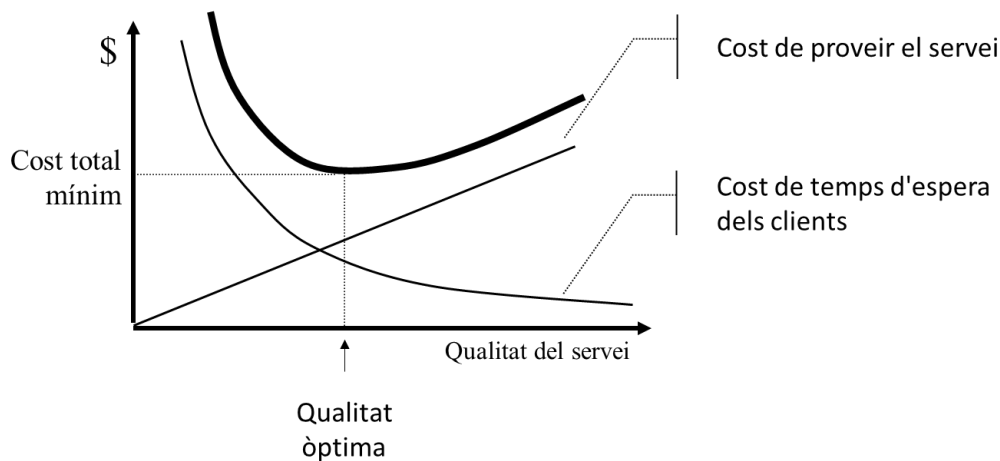


Figura. Costos associats als fenòmens de cues d'espera.

3. Psicologia de les esperes

És ben sabut que la percepció de l'espera és molt diferent segons diferents circumstàncies. És la diferència entre el *kronos* i el *kairos*. El *kronos* és quantitatiu i es mesura en dies, o en qualsevol segmentació del dia (en una unitat de temps), mentre que el *kairos* fa referència al contingut d'aquest temps. Així, una hora fent quelcom avorrit o divertit és sempre una hora (mateix *kronos*), però el *kairos* no és el mateix.

Hi ha algunes coses que afecten el *kairos* en què el proveïdor hi té control; en altres, no.

3.1. Factors sobre el quals l'empresa o proveïdor pot intervenir

La percepció del temps s'allarga en situacions com ara:

- Cues en què hi ha percepció d'injustícia (per exemple, si hi ha gent que es cola).
- L'espera és incòmoda.
- No se sap el temps que caldrà esperar.
- No se sap el motiu de l'espera.

En aquests casos l'empresa pot intervenir-hi per optimitzar la percepció de l'espera. L'empresa pot evitar que hi hagi gent que s'avanci a la cua, o donar informació sobre l'estimació de quant caldrà esperar, o quina és la causa que motiva aquesta espera.

3.2. Factors relacionats amb el client

Aquí el proveïdor no hi pot fer res. S'apunten alguns exemples en què la percepció de l'espera es fa llarga:

- Quan la percepció del valor del servei és baixa.
- Quan s'espera sol (no hi ha ningú més a la cua).
- Quan el client està enfadat.
- Quan el client està angoixat.

3.3. Factors relacionats tant amb el servidor com amb el client

Situacions en què la percepció de durada de l'espera depèn de tots dos, client i proveïdor.

4. Característiques d'un sistema d'espera

En tot sistema hi ha tres parts que cal analitzar.

- El que anomenem "arribada", que és la unitat que ha de ser atesa per un servidor.
- La cua pròpiament dita: la gent (en general, "arribades") que estan fent cua.
- El servidor.

La figura següent mostra un sistema de cues i les tres parts principals. A l'esquerra, un conjunt d'elements (arribades) que són el mercat natural del sistema. És la població que eventualment demanarà el servei. En algun moment anirà a fer cua.

El sistema està compost per la cua, pel servidor i per les arribades que estan sent ateses o servides en un moment determinat.

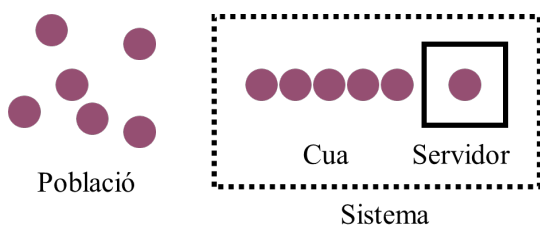


Figura. Parts d'un sistema de cues.

La variabilitat és el que explica la formació de les cues. Bàsicament, la variabilitat està en la població i en el servidor. Són les dues fonts de variabilitat. Situats a l'entrada del sistema i observant com van arribant els clients, es comprova que hi ha una certa variabilitat. El temps entre dos clients consecutius és variable. També hi ha variabilitat en el temps de servei a cada client.

Si no hi hagués variabilitat en les entrades (si el temps entre arribades fos fix), ni tampoc en el servei (el temps de servir fos constant), llavors no hi hauria cua. Arribaria un client, seria servit en un temps determinat, i quan arribés el següent client no hi hauria ningú a la cua i seria servit en el mateix temps.

4.1. Característiques de les arribades

Cal saber coses bàsiques com ara si la població que potencialment pot demanar el servei és limitada o il·limitada. Una perruqueria de barri té un mercat potencial reduït al barri on opera. Un servei en línia pot tenir un mercat potencial pràcticament il·limitat.

Cal veure el patró d'arribades al sistema. Cada quan un client decideix anar a fer cua per ser servit. Pot ser que el patró sigui determinista (seria el cas d'uns clients que decidissin anar a la perruqueria cada primer divendres de mes, per exemple). El més freqüent és que el patró sigui aleatori, seguint alguna llei de probabilitat. Entre els patrons aleatoris, el més freqüent és el determinat per la llei de Poisson. Es dona quan hi ha moltes causes que expliquen el perquè algú decideix anar a fer cua, i cap d'aquestes raons explica de manera molt més gran que les altres aquest comportament.

La llei de Poisson determina la probabilitat que durant una unitat de temps arribin x "arribades".

$$P(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$$

- $P(X)$: probabilitat que arribin x arribades durant una unitat de temps.
- λ : taxa d'arribades. Velocitat mitjana amb què arriben els clients. Per tant, queda mesurat en una relació d'arribades per unitat de temps. Podria ser, en l'exemple de la perruqueria, 3 clients per hora, si s'observa que de mitjana aquests són els clients que hi arriben cada hora.

4.2. Característiques de les cues

Bàsicament, cal veure dues coses: la grandària de la cua i la política de formació de la cua.

1. Longitud de la cua: Cal veure si la cua té algun topall o pot ser il·limitada. En la pràctica, hi ha factors que limiten la longitud de la cua. Per exemple, en una perruqueria seria el nombre de cadires de l'espai d'espera.
2. Una altra qüestió és veure la política d'espera quan l'"arribada" es posa a fer cua. Algunes d'aquestes polítiques o disciplines de cua són:
 - FIFO (*first in, first out*)
 - LIFO (*last in, first out*)

- Temps de servei més curt
- Gravetat en un servei d'urgències
- ...

4.3. Característiques del servidor

Cal analitzar diversos aspectes.

- Configuració del sistema: si hi ha un canal o és multicanal; si té una fase o en té més...
- Taxa de servei: a quina velocitat està servint el servidor.
- Patró del servei. Pot ser constant o determinista. Seria el cas d'una màquina de venda automàtica de cafès que sempre tarda 35 segons a servir-ne un. Moltes vegades el temps de servir és aleatori. En aquest cas, moltes vegades segueix la distribució exponencial negativa. Això és així quan hi ha moltes causes que expliquen la durada del servei però cap predomina sobre les altres.¹

La llei exponencial negativa s'expressa com:

$$F(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

- $F(t)$: probabilitat que la durada del servei sigui t o menys
- μ : taxa de servei

5. Mesures per analitzar fenòmens de cues

Algunes de les mesures per a determinar si un sistema està adequadament dimensionat o no poden ser les següents:

- Temps mitjà que una persona (o objecte) espera a la cua.
- Longitud mitjana de la cua.
- Temps mitjà que un client està en el sistema (inclou la cua i el temps de servei).
- Nombre mitjà de gent en el sistema.
- Rendiment o ocupació del servidor.
- Probabilitat que el servidor estigui desocupat.

6. Tipologies de models de cues

Cal primer aclarir que farem servir la notació de Kendall, que identifica els models segons tres característiques: A/B/C.

- A: Distribució de les "arribades".

¹ En realitat la distribució de Poisson i l'exponencial negativa estan relacionades. En un procés en què les arribades segueixen la distribució de Poisson, el temps entre arribades es calcula a través de la distribució exponencial negativa.

La de Poisson calcula quantes arribades hi ha en una unitat de temps, mentre que l'exponencial negativa determina quant de temps passarà entre dues arribades.

- B: Distribució del temps de servei.
- C: Nombre de canals.

Quan la distribució és Poisson, o bé exponencial negativa, es diu que és Markov, i es fa servir la lletra M. Quan una distribució és constant o determinista, es fa servir la lletra D.

Per a cada model de cua (determinat pel trio A/B/C) existeix un conjunt de fórmules per trobar els diferents paràmetres d'un sistema. Només cal saber λ , μ i el nombre de canals. Aquesta és una manera directa d'analitzar un model de cues. Hi ha tres maneres de resoldre els exercicis de teoria de cues. El primer és aquest: aplicar directament les fórmules una vegada determinat el model.

El sistema d'una perruqueria amb una única perruquera seria M/M/1. La primera M vol dir que les arribades es distribueixen segons una funció de Poisson (per tant, Markov). La segona M fa referència al fet que el temps de serveis és exponencial negatiu (per tant, Markov) i, finalment, l'1 vol dir que només hi ha un servidor.

El tipus de model influeix en el rendiment del sistema. La figura següent mostra dos models diferents. El primer (el de l'esquerra) és M/M/1, i el segon, M/M/s. Cal suposar que els dos escenaris tenen la mateixa taxa d'entrada (λ : la demanda). També se suposa que la capacitat de servei és la mateixa: en el primer cas és μ i en el segon cada servidor té capacitat μ/s (per tant la capacitat de servir és la mateixa). Tot i així, el temps d'espera en el segon cas és més baix. Per tant, el model influeix en el rendiment.

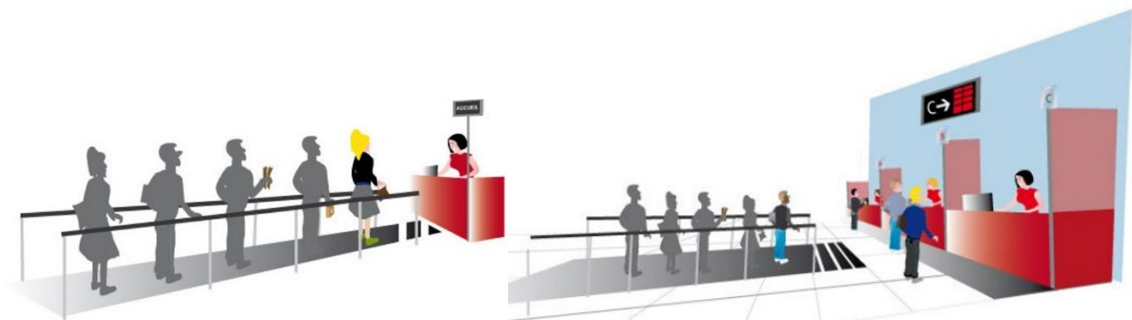


Figura. Dos models de cues. El de l'esquerra és M/M/1 i el de la dreta, M/M/s.

La taula següent presenta diferents models en funció de les característiques de cadascun.

Taula. Descripció de tipus de models.

Model	Exemple	Nom tècnic	Arribades	Servei	Canals
A	Perruqueria	M/M/1	Poisson	Exponencial negatiu	1
B	Finestretes de facturació	M/M/s	Poisson	Exponencial negatiu	s
C	Túnel rentat de cotxes	M/D/1	Poisson	Constant	1
D					

Fent servir la notació de Kendall:

- A: variable aleatòria “temps entre arribades”
- λ : taxa mitjana d’arribades (nombre d’arribades per unitat de temps)
- $Esp [A] = a = 1/\lambda$: temps mitjà entre arribades
- S: variable aleatòria “temps de servei”
- μ : taxa mitjana de servei (nombre d’arribades servides per unitat de temps)
- $Esp [S] = s = 1/\mu$: temps mitjà de servei
- ρ : rendiment o ocupació del servidor
- Nq o Lq : nombre mitjà de gent a la cua (*queue*)
- Ns o Ls : nombre mitjà de gent en el sistema (*system*)
- Wq : temps mitjà d’espera a la cua
- Ws : temps mitjà d’espera en el sistema
- P_0 : probabilitat de trobar 0 persones en el sistema
- P_n : probabilitat de trobar n persones en el sistema

7. Gràfics *input-output*

Per analitzar el procés, cal veure el ritme d’entrades i de sortides. D’aquesta manera, gràficament s’identifica el nombre d’unitats en el sistema. Això serà el nombre de persones en el sistema quan ho apliquem a un servei. Quan s’aplica a l’entorn de processos de producció, s’anomena *WIP (work in process)*. Igualment es pot identificar el temps que una unitat està dins del sistema. Això pot ser el temps mitjà en el sistema en l’entorn de serveis, o bé el *lead time* quan es fa referència als processos industrials o de fabricació de béns físics.

A la figura següent, les entrades es mostren en línia contínua i les sortides, en discontinúta. En l’eix horitzontal es llegeix el moment en què les unitats entren (línia contínua) i surten (línia discontinúta). Per tant, la distància en horitzontal entre la línia contínua i la discontinúta mesura el *lead time* d’una “arribada” concreta. Per altra banda, situant-se en un instant determinat i mesurant en vertical la distància entre ambdues línies, es troba el *WIP* en aquest moment determinat.

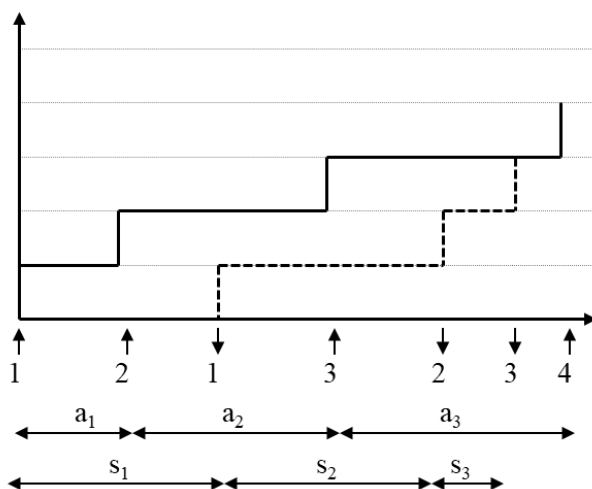


Figura. Gràfica *input-output* d’un fenomen de cues.

8. Anàlisi operacional

Hi ha quatre lleis que es compleixen sempre. Els paràmetres que cal conèixer són: (i) la taxa d'arribades (λ), (ii) la taxa del servidor (μ) i (iii) el nombre de canals. Aquestes lleis permeten trobar altres paràmetres del sistema en funció d'aquests tres.

8.1. Llei de conservació

Es podria afirmar que, a llarg termini, totes les unitats (arribades) que entren en el sistema tard o d'hora han de sortir-ne. Per tant, la taxa d'arribades (λ) ha de ser igual a la de sortides. La taxa de sortides és una mitjana ponderada. El ρ % del temps (quan el servidor està treballant), la sortida és a ritme de μ . Però quan el servidor està desocupat, que és el $(1 - \rho)$ % del temps, la velocitat de sortida és zero. Per tant,

$$\lambda = \mu\rho + 0(1 - \rho)$$

D'aquí es conclou que:

- $\rho = \lambda/\mu$

L'ocupació del servidor és la relació entre la demanda i la capacitat. Evidentment, sempre cal que la demanda (λ) sigui menor que la capacitat de servei (μ), ja que d'altra manera la quantitat d'unitats (arribades) dins el sistema creixeria indefinidament.

En cas de m servidors: $\rho = \lambda/m\mu$

8.2. Llei de Little

En el capítol previ, dedicat a l'anàlisi de processos, es definia:

$$\text{WIP} = \text{throughput} * \text{lead time}$$

que relaciona tres paràmetres: l'estoc en el sistema, la velocitat de processament i el temps de procés. La seva adaptació a la notació per serveis segons Kendall és:

- $E[N_s] = \lambda E[W_s]$

8.3. Llei d'homogeneïtat

Es pot formular de dues maneres. La primera fa referència a temps i la segona a nombre d'arribades.

- $E[W_s] = E[W_Q] + E[S]$
- $E[N_s] = E[N_Q] + E[N_{servida}]$

8.4. Llei de Hopp i Spearman

Fa referència al temps d'espera a la cua.

$$W_q = \left[\frac{p}{m} \right] \left[\frac{\text{Utilització}^{\sqrt{2(m+1)}-1}}{\text{Utilització}} \right] \left[\frac{cv_a^2 + cv_s^2}{2} \right]$$

- Utilització = $\lambda/m\mu$
- m: nombre de canals
- CV: desviació estàndard/mitjana (coeficient de variació d'una variable)
- CVa : coeficient de variació del temps entre arribades
- CVs : coeficient de variació del servei

Es veu que està compost de tres parts. La primera fa referència a la capacitat de servir. En aquest cas p és el temps de procés. Es pot substituir aquesta p per una s , depenent de si es fa referència a un temps de procés o a un temps de servei. Totes les fórmules s'adapten a l'entorn de manufactura i a l'entorn de servei.

La segona part fa referència a la relació entre demanda i capacitat de servir. La utilització és $\lambda/m\mu$.

La tercera part fa referència a la variabilitat del procés. Aquest grau de variabilitat ve donat tant per la variabilitat de les entrades, com per la de la capacitat de servir. En els dos casos es mesura per al coeficient de variació de les dues variables (A –temps entre entrades– i S –temps de servir).

Finalment, cal esmentar un cas particular que és molt freqüent en la realitat, el cas en què es compleixen aquestes tres condicions:

- Les arribades arriben en uns temps entre elles segons una distribució de Poisson.
- El servidor és capaç de servir segons una distribució exponencial negativa.
- Només hi ha un canal.

Quan es compleixen aquestes tres condicions, aplicant les quatre equacions (lleis) esmentades, es pot concloure que:

$$E[N_s] = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

Aquesta equació porta a unes conclusions interessants. En primer lloc, s'observa que si ρ és zero (el servidor està totalment ociós) vol dir que no hi ha ningú en el sistema. Però si el nivell d'ocupació és 1, el sistema és inestable i tendeix a tenir un nombre de gent infinit. Cal veure quin és el punt òptim d'ocupació en cada cas. Si el cost de l'espera per al client és alt i el cost de servir baix, llavors cal estar en nivells d'ocupació baixos (ρ baixa) per tal de no fer esperar els clients.

Quan és al revés, quan el recurs escàs és el servidor, llavors cal mantenir-lo ocupat sempre, encara que el client hagi de fer una espera llarga.

9. Sistemes de cues

Hi ha ocasions en què se superposen diversos models de cues. Per exemple, en un taller de reparació de cotxes, el vehicle entra primer en una estació de treball, després s'envia a una segona estació o bé a una tercera en funció d'unes probabilitats determinades. Així, cada cotxe flueix a través de diferents estacions de treball segons els requisits específics. Aquests sistemes s'anomenen *sistemes oberts*, perquè cada unitat (cotxe) entra en el sistema (taller) per una porta o entrada i al cap d'un temps surt del sistema. En els sistemes oberts, cada una de les cues es pot tractar com una cua aïllada.

Altres vegades es pot modelar com un *sistema de cues tancat*, en què les unitats processades mai surten del sistema. Les unitats van d'una estació a una altra, però no hi ha ni porta d'entrada ni de sortida. Cal una mica d'imaginació per modelar la realitat d'aquesta manera, però hi ha situacions en que és útil fer-ho així.

Per exemple, es pot pensar en un taller de mecanitzar algun tipus de peça mecànica i imaginar que hi ha n màquines funcionant ininterrompudament. De tant en tant s'avarïen i necessiten ser reparades. Es pot considerar que hi ha un mecànic i que quan una màquina s'avarïa demana el servei "ser reparada". En aquest moment la màquina va a fer cua davant del mecànic. Quan està reparada, torna a fer cua a una estació que podem anomenar "màquines treballant". En aquest segon estat no cal fer cua; és com si la capacitat del servidor fos infinita. Altre vegada, des d'aquest estat "funcionant", les màquines (que són les unitats que flueixen en el sistema) demanen el servei "reparació" amb una certa freqüència, així que cada màquina va donant voltes en aquest sistema tancat que només té dues estacions: la de "màquines funcionant" i la del taller de reparació. Per tant, les màquines mai surten d'aquest sistema.

L'anàlisi de sistemes tancats no és tan senzill. Cal utilitzar algun algorisme específic, com ara l'algorisme de Buzen. En aquest cas, però, és més senzill resoldre-ho a través de simulació.

10. Resolució de casos

Hi ha tres maneres d'abordar la resolució d'un sistema de cues:

- Aplicar directament les fórmules a cada model
- Aplicar les quatre lleis operacionals
- Fer simulació

Els dos primers casos s'apliquen en sistemes senzills. Quan són més complicats, cal fer simulacions. En aquest cas, mai podrem obtenir els resultats exactes, però si prou propers a l'òptim com per poder prendre decisions.

Hi ha diverses maneres de fer simulacions. La simulació de Montecarlo es pot fer utilitzant un full de càlcul. Per fer simulacions més complicades cal algun software especialitzat.

Capítol 10. Gestió de la qualitat

Objectiu: Conèixer el concepte de gestió de la qualitat dins del sistema productiu.

Resultats d'aprenentatge:

Definició i origen de la gestió de la qualitat.

Assegurament de la qualitat: sistemes de gestió de la qualitat i del medi ambient.

Gestió total de la qualitat.

1. L'origen de la gestió de la qualitat

Avui dia, les empreses treballen en entorns cada cop més inestables, en què la competitivitat i la internacionalització són factors clau per a la seva supervivència. En aquest context, els models de gestió són una eina essencial per a la millora de la gestió diària, la presa de decisions de l'empresa i l'establiment d'una estratègia que l'ajudi a avançar cap a l'excel·lència empresarial.

Per trencar amb els models de gestió tradicionals, com ara el *taylorista* o el *fordista*, les empreses implementen models de gestió més flexibles i versàtils. En concret, les principals transformacions que estan experimentant són:

- Reducció, **reorganització** i simplificació de la departamentalització i jerarquització de l'empresa, així com del seu procés productiu.
- El **client** es converteix en la figura central sobre la qual pivota l'estratègia de l'empresa. Ja no es parla només del client extern de l'empresa, sinó també del client intern.
- La implantació del paradigma de la **qualitat** com a model orientat a aconseguir la satisfacció de la figura fonamental de l'empresa, el client, a través del canvi cultural que suposa la implantació, entre d'altres, d'un nou model de participació, motivació i formació del personal de l'empresa.

Segons l'Organització Internacional de Normalització (ISO), la qualitat es defineix com "el conjunt de característiques d'una entitat que la fan capaç de satisfer necessitats establertes i implícites".

En aquest sentit, caldria preguntar-se: de qui s'han de satisfer les necessitats? És evident que es tracta de les necessitats de l'usuari o client. No obstant això, cal subratllar que el terme usuari o client no es refereix únicament al client final o extern, és a dir, a la persona, aliena a l'empresa, que adquirirà el producte o servei. De fet, el terme *usuari* o *client* també inclou el client intern, és a dir, l'empleat de l'empresa que compleix les funcions de proveïdor i client al llarg del procés de producció.

En definitiva, la gestió de la qualitat és una filosofia de gestió centrada en la qualitat, basada en la participació de tots els membres de l'empresa, que cerca augmentar la satisfacció dels grups d'interès o *stakeholders* (inclosos els clients externs i interns), els accionistes de l'empresa i la societat en general, alhora que millora l'eficiència organitzativa i obté beneficis per a tots els membres de l'organització i per a la societat en general.

2. Assegurament de la qualitat

Entre les formes principals en què una empresa pot aconseguir el seu compromís amb la qualitat, en primer lloc trobaríem l'ús d'una sèrie d'eines per millorar la qualitat a l'empresa. En segon lloc, i demostrant una implicació més gran de tota l'organització pel que fa a la qualitat, trobaríem l'assegurament de la qualitat.

L'assegurament de la qualitat va néixer com una evolució natural del control de qualitat, limitat i ineficaç per prevenir l'aparició de defectes. Per això, es va fer necessari crear sistemes de qualitat que incorporessin la millora continuada com a principi fonamental i que, en tot cas, fossin útils per anticipar-se als errors abans que es produïssin.

Un sistema d'assegurament de la qualitat se centra a assegurar que allò que una organització ofereix (sigui un producte o un servei) compleix les especificacions prèviament establertes per l'empresa i el client.

L'assegurament de la qualitat és un sistema que posa l'èmfasi des del disseny fins al moment del lliurament al client del producte o servei, concentrant els esforços en la definició dels processos i activitats que permeten obtenir-los d'acord amb les especificacions.

Aquest concepte representa la necessitat d'implicar tota l'organització en la gestió de la qualitat, per demostrar que és capaç d'oferir un producte o servei amb les característiques adequades, mantenint sempre la producció o el servei sota control i d'acord amb els requisits establerts. L'assegurament de la qualitat podria entendre's, per tant, com l'organització, la planificació i el control de totes les activitats i funcions encaminades a aconseguir la qualitat d'acord amb determinats requisits.

La implantació d'un sistema de gestió de la qualitat en qualsevol organització ve motivada per una sèrie de factors externs i interns que influiran més o menys en la definició i l'aplicació del tipus de sistema de gestió de la qualitat adequat, que ha de comptar amb una sèrie de requisits bàsics i una estructura definida i organitzada.

Entre els sistemes de gestió per a l'assegurament de la qualitat, el sistema amb més acceptació i que ha estat implantat per més empreses a tot el món és el basat en la norma ISO 9001:2015, on es defineixen els "requisits d'un sistema de gestió de la qualitat".

A l'hora d'implantar qualsevol sistema de gestió de la qualitat, i especialment els d'assegurament de la qualitat, caldrà analitzar quins recursos i mitjans caldran per dur a terme el projecte, establir una planificació general i definir dins l'empresa mateixa l'estructura que s'encarregarà de donar suport i col·laborar en les diferents tasques que comporta el projecte.

Les etapes bàsiques que componen el projecte d'assegurament i gestió de la qualitat comencen amb l'anàlisi de la situació inicial, seguida del desenvolupament del sistema triat, la implantació pròpiament dita, la posterior avaluació mitjançant una auditoria interna i, finalment, la certificació per una empresa externa degudament acreditada.

En general, l'estructura bàsica d'un sistema de gestió de qualitat d'aquest tipus està formada per tres membres principals: el comitè de qualitat, la direcció de qualitat i els equips de millora. La mateixa organització haurà de decidir qui formarà part d'aquests membres i a qui s'assignaran les responsabilitats que comporta cadascuna de les funcions derivades.

Un cop definida l'estructura del sistema i assignades les diferents responsabilitats, cal dur a terme les activitats d'implantació, entre les quals hi ha l'elaboració de la documentació del sistema.

Aquesta documentació inclou el conjunt de documents generats com a conseqüència de qualsevol activitat que afecti la qualitat, així com la documentació que prové de l'exterior i que és rellevant per al sistema de gestió establert d'acord amb la norma ISO 9001:2015. Constitueix la base del sistema i, per tant, la redacció suposa un gran esforç per part de tots els responsables de l'empresa i, en particular, dels de la gestió de la qualitat.

La documentació del sistema de gestió generalment està formada pels documents següents:

- Documents generals del sistema de gestió (planificació, designació del responsable de qualitat...).
- Documents principals del sistema de gestió (manual de qualitat, procediments de qualitat, instruccions de qualitat, formats i registres de qualitat).

Aquesta documentació serà elaborada per les persones designades per la direcció de qualitat que estiguin implicades en les activitats a què es refereix cada document específic, i serà aprovada inicialment i actualitzada periòdicament d'acord amb la norma ISO 9001:2015.

Un cop implantat el sistema de gestió, cal sotmetre'l a una revisió interna per avaluar si satisfà els requisits que són aplicables, per la qual cosa caldrà fer el que s'anomena una auditoria del sistema de gestió de la qualitat.

Les auditories, en general, poden ser de diferents tipus en funció de la finalitat (auditoria de procés, de producte o de sistema) i de l'abast (auditoria interna o externa).

Les auditories internes les fa el mateix personal de l'empresa. El seu objectiu és identificar els punts febles del sistema per solucionar-los mitjançant una sèrie d'accions correctives o preventives que s'implementen en els casos en què s'han detectat no conformitats.

Finalment, s'aconsegueix la certificació, mitjançant l'avaluació favorable d'una auditoria externa que no és res més que una demostració a l'exterior (clients, proveïdors, societat, etc.) del compromís de l'empresa amb la qualitat.

Un altre tipus de sistema de gestió que actualment està molt implantat a les empreses són els sistemes de gestió mediambiental (SGA). Aquests sistemes es van crear als anys 90 per tal que les empreses assolissin un alt nivell de protecció del medi ambient en el marc del desenvolupament sostenible.

La implantació d'un sistema de gestió mediambiental pot ajudar l'empresa en diferents aspectes:

- Identificar i controlar els aspectes, els impactes i els riscos ambientals rellevants per a l'empresa.
- Millorar la política mediambiental i facilitar la consecució dels objectius de l'empresa complint la legislació mediambiental.
- Definir els principis bàsics que guien l'organització cap a les seves futures responsabilitats mediambientals.
- Establir objectius a curt, mitjà i llarg termini per al comportament mediambiental de l'empresa, analitzant el balanç cost-benefici per a l'organització i les parts interessades.
- Determinar quins recursos són necessaris per assolir amb èxit els objectius preestablerts, assignant responsabilitats en cada cas.
- Definir i documentar les diferents tasques i operacions, les responsabilitats, l'autoritat i els procediments per garantir que tots els treballadors actuïn diàriament per minimitzar o eliminar els impactes negatius que l'empresa pugui causar al medi ambient.
- Millorar la comunicació de l'organització, formant les persones perquè puguin assumir les seves responsabilitats.
- Mesurar l'exercici ambiental dia a dia, cosa que permet veure si s'estan complint els objectius preestablerts i modificant el que calgui quan es consideri necessari.

El sistema de gestió mediambiental més implantat actualment per les empreses és la norma internacional ISO 14001:2015, en què s'estableixen els "requisits d'un sistema de gestió mediambiental". La certificació segons aquesta normativa té una validesa de tres anys, renovable si se supera una auditoria de certificació nova.

El procés de certificació per aconseguir la certificació ISO 14001:2015 és paral·lel al de l'obtenció de la certificació ISO 9001:2015, i de fet es poden portar a terme auditories integrades dels dos sistemes de gestió al mateix temps.

3. Gestió de la qualitat total (*total quality management, TQM*)

Quan es vol que la garantia de la gestió de la qualitat i la satisfacció del client perdurin en el temps, es parla de la gestió de la qualitat total (TQM), que té com a objectiu l'excel·lència empresarial. TQM vol dir que la cultura de l'organització està definida i dona suport a la consecució constant de la satisfacció del client mitjançant un sistema integrat d'eines, tècniques i formació. Això implica la millora contínua dels processos organitzatius, cosa que dona lloc a productes i serveis d'alta qualitat.

La gestió de la qualitat total es basa en vuit principis, tal com es defineixen a la norma ISO 9000:2015, com a "fonaments i vocabulari per a la gestió de la qualitat" i fa referència a la norma ISO 9004:2018 per a la "gestió per a l'èxit sostingut d'una organització".

1. Organització orientada al client

El primer i principal principi de la gestió de la qualitat total és centrar-se en els clients que compren els productes o serveis, així com en els clients potencials. Els clients són els que

justifiquen la qualitat dels productes i serveis. Per tant, l'empresa ha d'assegurar-se que els clients sentin que han gastat els seus diners en un producte de qualitat.

A més, l'organització ha de tenir clar que les necessitats dels seus clients no són estàtiques, sinó dinàmiques, per la qual cosa van canviant al llarg del temps. A part que els clients són cada cop més exigents, també estan més ben informats. L'organització no només s'ha d'esforçar per conèixer les necessitats i les expectatives dels seus clients, sinó que els ha d'oferir diferents solucions mitjançant els productes i els serveis, i gestionar-les i intentar superar les expectatives dia a dia.

2. Lideratge

El lideratge és essencial per mantenir la unitat entre els empleats per assolir objectius interdependents. Encara que existeixen principalment tres tipus de lideratge a la indústria, l'estil de lideratge democràtic és el millor per obtenir bons resultats. Els líders poden formar un ambient convenient per treballar eficaçment dins de l'organització, en el qual tots els empleats treballen per assolir l'objectiu de l'organització.

El lideratge és una cadena que afecta tots els directius d'una empresa que tenen personal al seu càrrec. Si es trenca una baula d'aquesta cadena, es trenca el lideratge de l'empresa.

3. Participació del personal

El personal és l'essència de l'empresa, i el seu compromís total possibilita que les seves habilitats siguin utilitzades per al benefici de l'empresa. El compromís total dels empleats permet a l'empresa desenvolupar nous productes i augmentar el creixement de les vendes. Per tant, tots els empleats de l'organització han d'estar ben formats, compromesos i dedicats a assolir un objectiu comú. Per tant, és obligació de l'empresa crear un entorn receptiu on cada empleat estigui motivat per completar la seva tasca de forma correcta.

4. Enfocament a processos

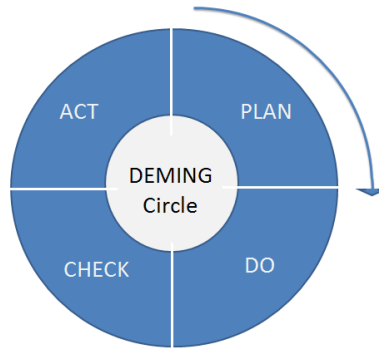
L'empresa necessita millorar els processos de manera constant per obtenir bons resultats. Un resultat desitjat s'aconsegueix més eficientment quan les activitats i els recursos relacionats es gestionen com un procés. El principal canvi es basa en la concepció de l'empresa. L'empresa ha de deixar de ser una empresa organitzada per departaments o àrees funcionals per ser una empresa per processos amb els quals crear valor per als clients.

5. Enfocament del sistema cap a la gestió

Identificar, entendre i gestionar els processos interrelacionats com un sistema contribueix a l'eficiència i l'eficàcia d'una empresa per aconseguir els seus objectius. Per aconseguir-los caldrà que l'empresa detecti i gestioni de manera correcta tots els processos interrelacionats.

6. Millora contínua

Un dels principis més importants és el de la millora contínua, concepte que es pot definir com un procés estructurat en el qual participen totes les persones de l'empresa amb l'objectiu de l'increment progressiu de la qualitat, la competitivitat i la productivitat, en un entorn canviant. Aquest procés s'estructura seguint el cicle de millora contínua, també conegut com el cicle PDCA de Deming.



Les inicials PDCA corresponen a les diferents etapes del cicle, corresponents a planificar, desenvolupar, comprovar i actuar (en anglès, *plan, do, check i act*). No hi ha dubte que l'aplicació del principi de millora contínua repercutirà de forma positiva tant en la reducció de costos de l'empresa, com en la millora de la productivitat i la rendibilitat.

7. Enfocament basat en fets per a la presa de decisions

Les decisions s'han de basar en l'anàlisi de dades i d'informació recopilada. L'empresa ha d'analitzar les dades de les diferents fonts per avaluar l'assoliment dels objectius definits, així com per identificar àrees de millora, incloent-hi possibles beneficis per a les parts interessades.

8. Relació mútuament beneficiosa amb els proveïdors

Una organització i els seus proveïdors són interdependents. Una relació mútuament beneficiosa augmenta la capacitat de tots dos per crear valor. Per tant, és important establir relacions amb els proveïdors per promoure i facilitar la comunicació, amb l'objectiu de millorar mútuament l'eficàcia i l'eficiència dels processos que creen valor.

Capítol 11: Gestió de Projectes

Objectiu: Entendre les principals tècniques per a la gestió de projectes, com ara: diagrama de Gantt, PERT, CPM i l'enfocament de la "cadena crítica".

Resultats d'aprenentatge:

Identificar què és un projecte i les seves característiques.

Diagrama de Gantt.

Diagrama de PERT determinista i probabilístic.

Mètode del camí crític (CPM).

Gestió de *buffers* segons els principis de "cadena crítica".

1. Què és un projecte?

Un projecte es defineix com una seqüència de tasques que cal completar per aconseguir un objectiu. D'acord amb el Project Management Institute (PMI), el terme *projecte* es refereix a qualsevol esforç temporal amb un inici i un final definit.

Cada projecte està compost per unes activitats, i aquestes poden tenir alguna relació de seqüenciació entre elles. Cada activitat requereix un cert temps i consumeix recursos. Els recursos poden ser de diferents menes, però sempre es poden traduir a una mesura comuna: una unitat monetària.

Una altra característica de cada projecte és que és únic. No hi ha mai dos projectes iguals. Un projecte sempre és quelcom que es fa per primera vegada. No hi ha experiència prèvia. Ningú sap com es fa, encara que, òbviament hi ha experiències properes o semblants que donen una idea de com aniran les coses. Per tant, sempre hi ha incertesa respecte al temps que caldrà per fer-lo (quant es tardarà a completar el projecte? quant durarà?) i respecte al cost (quant costarà fer el projecte? quants recursos caldrà invertir-hi?)

Per gestionar aquestes dues incerteses, cal assignar (i) una funció de probabilitat sobre el temps de durada de cada activitat que compon el projecte i (ii) un pressupost per a cada activitat.

La qualitat del projecte es pot mesurar en tres dimensions:

- L'ajust entre les especificacions que el client demana abans de començar i les característiques del projecte que es lliura.
- La diferència entre el cost previst i el real.
- La diferència entre el temps previst (el termini acordat) i el temps real emprat.

En un procés de licitació d'un projecte, els proveïdors competeixen en funció de (i) un preu (inclou els costos interns i el benefici) i (ii) un termini de lliurament. Això és quelcom que s'ha de fixar en funció de l'anàlisi interna del projecte i també del coneixement del sector i dels

competidors. Per descomptat, com més baix sigui el preu i com més baix sigui el termini, millor en termes de competitivitat. Tanmateix, cal analitzar el risc associat a aquestes decisions.

La gestió de projectes inclou tres fases:

- Planificació: fixació de l'objectiu, definició de les característiques que ha de tenir el producte o servei que es lliura i de l'equip que l'executarà.
- Programació: fixar quan començarà cada activitat i quines persones i recursos caldran en cada moment.
- Control: monitorització de l'ús de recursos, costos, qualitat i pressupostos. Aquí cal revisar també els canvis de plans que calgui fer per mantenir la data de lliurament i el cost total que s'ha establert.

Centrant-nos en la fase de programació, els diagrames de Gantt són de gran utilitat en projectes simples. El nom deriva de Henry Gantt, que els va popularitzar a finals del segle XIX.

Tanmateix, quan el projecte és més complex, el *program evaluation and review technique* (PERT) i el *critical path method* (CPM) són dues tècniques molt utilitzades. Per altra banda, les idees derivades de la "cadena crítica" ajuden a utilitzar *buffers* de temps per optimitzar la programació.

El PERT i el CPM es van desenvolupar a la dècada de 1950 per ajudar els gestors de projectes a programar, supervisar i controlar projectes grans i complexos. El CPM va arribar primer, com una eina desenvolupada per ajudar en la construcció i manteniment de plantes químiques de l'empresa DuPont. Per altra banda, la Marina dels Estats Units va publicar el 1958 la tècnica PERT, que feia servir per a la gestió del projecte "Polaris", relacionat amb la fabricació d'uns submarins d'altres prestacions militars.

Critical chain va ser publicat el 1997 per Eliyahu M. Goldratt. Des d'aleshores, no s'ha publicat cap altra contribució rellevant en la gestió de projectes.

2. Diagrama de Gantt

És un tipus de gràfic de barres que il·lustra el calendari d'un projecte. Mostra la llista de les tasques o activitats a realitzar en l'eix vertical. A l'eix horitzontal es mostra el temps. S'hi pot llegir quan comença i quan acaba cada activitat i, en conseqüència, la seva durada. També mostra certa dependència entre activitats; és freqüent que una activitat no pugui començar fins que no acabi una altra. La figura següent mostra un projecte de només tres activitats, en què les activitats A i B s'han de completar abans de que pugui començar C.

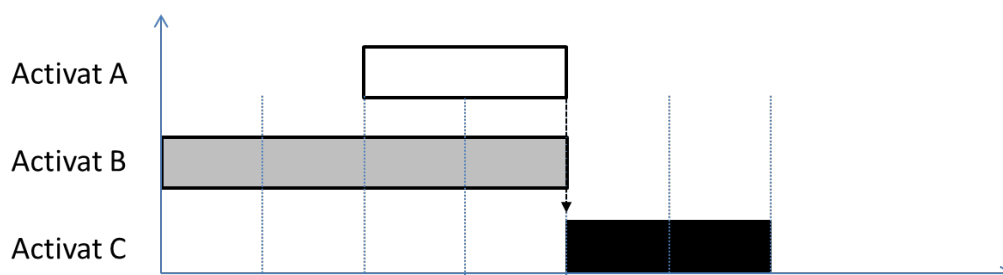


Figura. Diagrama de Gantt amb les activitats a l'eix vertical.

Hi ha un altre tipus de diagrama de Gantt que mostra els recursos en l'eix vertical (en lloc de les activitats). És útil per comprovar que no hi ha cap superposició en les tasques assignades al mateix recurs. La figura següent mostra el mateix projecte, però ara atenent als recursos. En aquest cas, el recurs X s'encarrega de les activitats A i C, mentre que el recurs Y és responsable de l'activitat B.

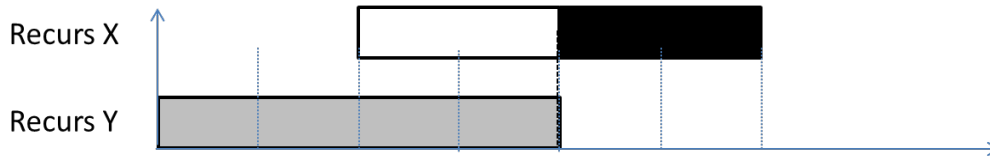


Figura. Diagrama de Gantt que mostra els recursos necessaris en l'eix vertical.

3. Diagrama de PERT determinista

PERT és l'acrònim de *program evaluation and review technique*. En aquest diagrama se suposa, per tal de facilitar la programació, que cada activitat té una durada determinada. Cal tenir present, però, que aquesta circumstància és totalment contrària al marc de la gestió de projectes, ja que, com s'ha dit, la naturalesa pròpia d'un projecte es caracteritza per la incertesa de la durada de cada activitat.

Passos per dur a terme un PERT (determinista)

A. Fer la llista de les activitats. Una activitat requereix temps i consumeix recursos. Es requereix la llista d'activitats per completar tot el projecte.

B. Estimació de quant dura cada activitat. Cal suposar, en aquesta simplificació, que no hi ha incertesa i que es coneix la durada exacta.

C. Per a cada activitat, decidir quines activitats l'han de precedir i quines l'han de seguir. S'ha d'anar amb compte de no introduir més restriccions de les requerides per la naturalesa mateixa del projecte. La introducció de restriccions impacta negativament en la durada total del projecte.

D. Dibuixar la xarxa composta per nodes i fletxes. Un *node* és un esdeveniment, per exemple que s'ha acomplert l'activitat X. És un moment en el temps. Per altra banda, les fletxes signifiquen una activitat, i per tant cal assignar quant de temps cal per completar l'activitat, i també quins recursos calen. Cada node s'anomena amb un número que indica la seqüència amb què s'hi arriba. Quan la xarxa és gran, hi ha un algorisme per fer aquesta numeració de nodes que garanteix que els números donen la seqüència en què es va arribant a cada node.

La figura següent mostra un exemple de xarxa o diagrama. Cada node mostra que s'ha arribat a un cert estat del projecte. Per exemple, que s'han acabat les activitats B i D. És, doncs, un instant de temps. Sobre cada fletxa hi ha una lletra que indica una activitat

determinada. Queden clares també les relacions de precedència temporal entre activitats. S'observa que fins que no s'hagin completat B i D no es pot iniciar F.

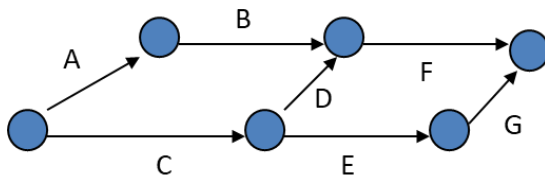


Figura. Diagrama PERT d'un projecte.

Un diagrama té unes característiques:

- Només hi ha un node inicial i un de final.
- Tota activitat en té almenys una de precedent i una de consegüent, a excepció de les activitats que parteixen del node inicial i de les que acaben en el node final.
- Tota activitat comença en un node i i apunta a un node j d'ordre superior, de manera que $j > i$.
- No hi pot haver dues activitats amb el mateix node inicial i el mateix node final.

Per tal que el diagrama de xarxa compleixi aquestes característiques s'hi poden introduir activitats fictícies (*dummy activities*). No consumeixen cap recurs i la seva durada és zero. D'aquesta manera no s'introdueixen més restriccions de les necessàries i el diagrama descriu amb fidelitat la naturalesa del projecte.

E. Calcular t_i (el moment més d'hora en què es pot arribar a un node) i T_i (moment més tardà) per a cada node.

- Primer es calculen els moments "més aviat" per arribar a cada node. El mètode va des de l'esquerra cap a la dreta.
- Després es fa el càlcul dels moments més tardans per a cada node: aquí el mètode va des de la dreta cap a l'esquerra.

En aquesta fase es fa servir una notació especial per a cada node, que inclogui: (i) el número del node, que és com el seu nom; (ii) el moment més d'hora a què es pot arribar al node, i (iii) el moment més tardà a què es podria arribar al node.

F. Cercar "activitats crítiques" i "camí crític".

- Les activitats queden identificades pels seus nodes inicial i final.
- El marge d'una activitat és el temps que es pot allargar una activitat per sobre del temps estimat o esperat sense retardar tot el projecte.
- Una activitat crítica no té marge.
- El marge d'activitat es calcula com: $Slack_{i,j} = T_j - t_i - duration_{ij}$
- El camí crític és un camí continu a través de la xarxa del projecte que: (i) comença en el node inicial del projecte, (ii) acaba en l'últim node del projecte i (iii) només inclou activitats crítiques (és a dir, activitats sense marge).
- El camí crític és important perquè estableix la durada del projecte.

G. Gantt associat al gràfic PERT. És útil dibuixar el diagrama de Gantt, que proporciona una visió intuïtiva de la seqüència d'activitat.

La figura següent mostra el mateix exemple que abans, en què ja s'ha trobat que les activitats crítiques son C, E i G. Per tant, el camí crític queda format per aquestes tres activitats.

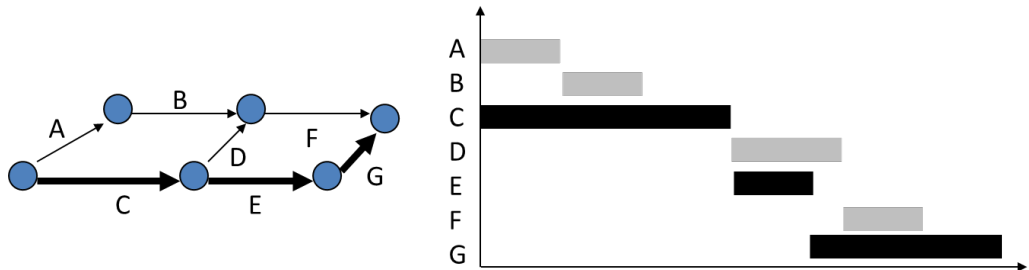


Figura. Diagrama de xarxa i de Gantt d'un projecte, mostrant el camí crític.

H. Perfil de càrrega de recursos al llarg del temps. Permet mostrar l'ús dels recursos. La figura següent mostra, a sota del diagrama Gantt, el diagrama de càrrega, que mostra en vertical els recursos necessaris durant l'execució del projecte, sovint expressats en unitat monetàries.

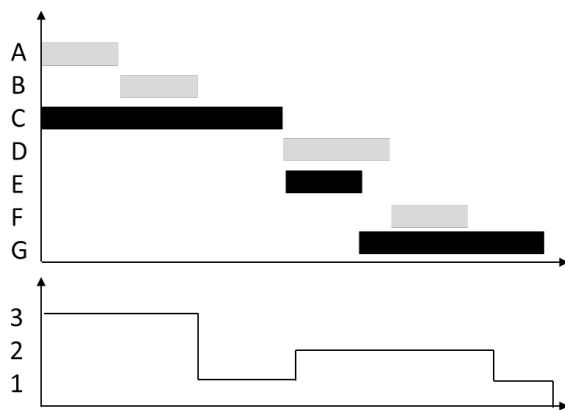


Figura. Diagrama de Gantt i diagrama de càrrega de recursos.

I. Finalment es pot fer una discussió sobre l'estratègia "tan aviat com sigui possible" (*as soon as possible, ASAP*) o bé una estratègia de fer les coses "tan tard com sigui possible" (*as late as possible, ALAP*).

L'estratègia ASAP redueix el risc de lliurar després de la data límit, però requereix més costos financers. ALAP és just al revés. El risc de lliurar fora del termini augmenta i pot acabar en una multa o sanció. L'avantatge és que hi ha menys costos financers.

4. Diagrama de PERT probabilístic

Aquest diagrama s'utilitza quan s'elimina la restricció de considerar que cada activitat té una durada fixa predeterminada. Així, cal considerar que la durada de cada activitat segueix una determinada distribució de probabilitat. D'aquesta manera es gestiona la incertesa de la durada mitjançant una funció de distribució.

Generalment, la durada d'una activitat es distribueix d'acord amb una distribució beta (β). Es requereixen tres paràmetres per tal de fer una estimació de la mitjana (valor esperat) i de la variància.

- a: Optimista. Temps que trigarà una activitat si tot va segons el previst. En estimar aquest valor, només hi hauria d'haver una petita probabilitat (per exemple, 1 vegada de cada 100), que el temps de l'activitat sigui menor que a .
- m: Molt probable (màxima versemblança). Estimació més realista del temps necessari per completar una activitat.
- b: Pessimista. Només una vegada de cada 100 el temps serà més gran que aquest valor.

El temps d'activitat esperat i la variància per a la distribució beta són:

- Mitjana o temps esperat per completar l'activitat = $(a + 4m + b) / 6$
- Variància de l'activitat = $[(b - a) / 6]^2$

Cal tenir present que aquesta última fórmula és per a la variància. Si es requereix la desviació estàndard, s'ha de calcular com l'arrel quadrada de la variància.

La figura següent mostra la distribució β . Pot estar esbiaixada tant cap a l'esquerra com cap a la dreta.

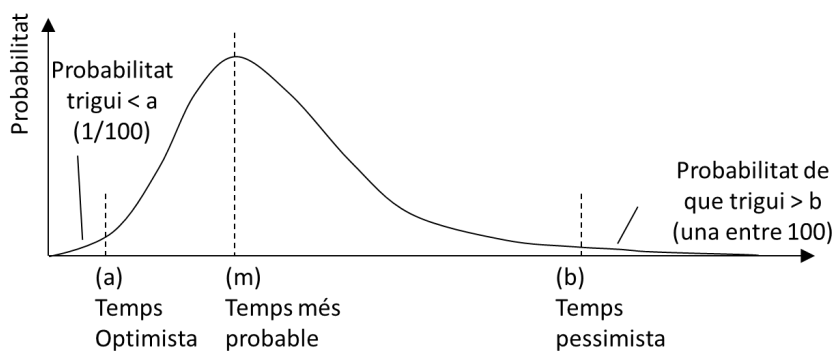


Figura. Funció de densitat β .

Un cop establerta la funció de distribució de la durada de cada activitat, per programar el projecte es poden seguir els mateixos passos que en el cas del diagrama de PERT determinista. La durada de cada activitat segueix ara una distribució beta. Cal agafar la mitjana per a cada activitat i trobar el camí crític.

La durada del projecte (és a dir, la longitud del camí crític) segueix el patró de distribució de la normal. Tenint en compte el teorema del límit central, la durada esperada de tot el projecte (de tot el camí crític) és la suma de totes les durades mitjanes d'aquestes activitats crítiques que

componen el camí crític. La variància també és la suma de les variàncies d'aquestes activitats crítiques.

Una vegada es coneix la durada esperada del projecte i la seva desviació estàndard, es pot calcular quina és la probabilitat d'aconseguir completar tot el projecte en menys d'un període de temps, o la probabilitat d'aconseguir-ho entre un moment determinat i un altre moment posterior. Així doncs, el PERT és una bona tècnica per tal de programar un projecte i avaluar-ne la durada.

5. Mètode del camí crític (CPM)

CPM, acrònim de *critical path method*, és una tècnica en la qual cada activitat té un temps normal o estàndard que s'utilitza en els càlculs. Associat a aquest temps normal hi ha el cost normal de l'activitat. Un altre element és el temps mínim o rècord, que es defineix com la durada més curta necessària per completar una activitat. Associat a aquest temps rècord, hi ha el cost de rècord de l'activitat. Normalment, es pot escurçar una activitat afegint recursos addicionals.

Es tracta d'un procés iteratiu que té com a objectiu reduir la durada del projecte total: si la bonificació rebuda per la reducció d'una unitat de temps és superior al cost associat a aquesta reducció, val la pena invertir en aquesta reducció.

Aquests són els passos a seguir:

A. Calcular el cost de pendent per a cada activitat.

- Pendent del cost d'una activitat = $(\text{Cost rècord} - \text{Cost normal}) / (\text{Temps normal} - \text{Temps rècord})$.
- Aquest és el cost marginal per escurçar l'activitat una unitat de temps.
- Se suposa que el pendent entre el punt "normal" i el punt "crash" és lineal (en un diagrama en què el cost és a l'eix vertical i el temps a l'horitzontal).
- Hi pot haver diferents diagrames de temps de reducció de costos, en funció de la naturalesa de l'activitat. La figura següent mostra dos casos: a (a), hi ha una variació lineal, mentre que (b) mostra una situació en què els increments marginals de cost són creixents per a cada unitat de reducció de durada.

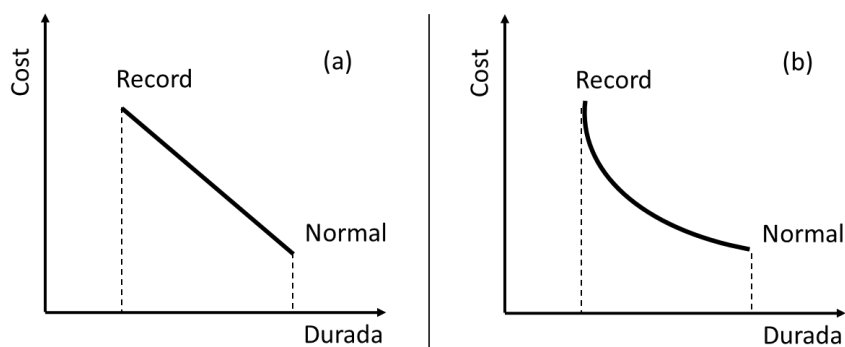


Figura. Exemples de diagrames de cost d'activitat i durada.

B. Trobar el camí o camins crítics del projecte, utilitzant els temps normals d'activitat. Identificar les activitats crítiques.

Només val la pena invertir (reduir) en les activitats crítiques. Aquesta és l'única manera de reduir tot el projecte.

Aquest és el primer escenari, el punt inicial del mètode CPM.

C. Algoritme iteratiu

1. Generar alternatives per escurçar el projecte.
2. Escollir la més econòmica. Mentre es troba una alternativa en què el cost d'escurçar un dia el projecte sigui inferior al benefici de reduir un dia el projecte, val la pena invertir-hi; si no, cal quedar-se en l'escenari existent i acabar el procés CPM.
3. Explotar l'alternativa seleccionada fins que
 - (i) l'activitat triada estigui en la seva "durada rècord o mínima" o
 - (ii) apareix un altre camí crític
4. Calcular la durada del projecte i el seu cost i tornar al primer pas.

Seguint aquest algoritme, el diagrama cost-temps per a tot el projecte serà convex. Això es deu al fet que les primeres alternatives escollides per escurçar el projecte són les més econòmiques. Quan aquestes opcions no estan disponibles en passos posteriors s'utilitzen alternatives més cares, la qual cosa comporta uns costos marginals més elevats.

Així doncs, el CPM és una bona tècnica per avaluar l'ús dels recursos i l'optimització de l'ús d'aquests recursos.

6. Cadena crítica

És la contribució del Dr. Eliyahu Goldratt en el seu llibre *La meta*, i consisteix en una manera de gestionar els *buffers* (temps).

Les tècniques anteriors no gestionen els *buffers* per tal d'evitar desviacions en el termini. PERT/CPM suposen que la durada de cada activitat és realment l'estimació del responsable d'aquesta activitat. Tanmateix, seguint Goldratt, la durada estimada està composta per l'estimació de la durada real per realitzar l'activitat i el marge de seguretat que hi afegeix cada responsable de l'activitat, que podria ser del 50 %. Aquests temps de seguretat els afegeixen a cada activitat cada responsable per evitar una desviació en la realització d'aquesta activitat. Això implica una duració més llarga per a tot el projecte, ja que es van inserint marges parcials durant tot el projecte.

Aquest enfocament (cadena crítica) elimina els marges de seguretat parcials i els gestiona de manera conjunta, amb una visió holística del projecte complet. Ara l'objectiu és optimitzar tot el projecte. Utilitza un *buffer* compartit, en lloc d'un conjunt de *buffers* particulars.

La figura següent mostra la comparació d'un projecte senzill (compost només per tres activitats) gestionat primer amb un enfocament clàssic i després utilitzant el mètode de la cadena crítica.

El mètode de la cadena crítica escurça una setmana el termini del projecte i encara manté un *buffer* del projecte de dues setmanes, la qual cosa redueix el risc de retardar-se en el lliurament.

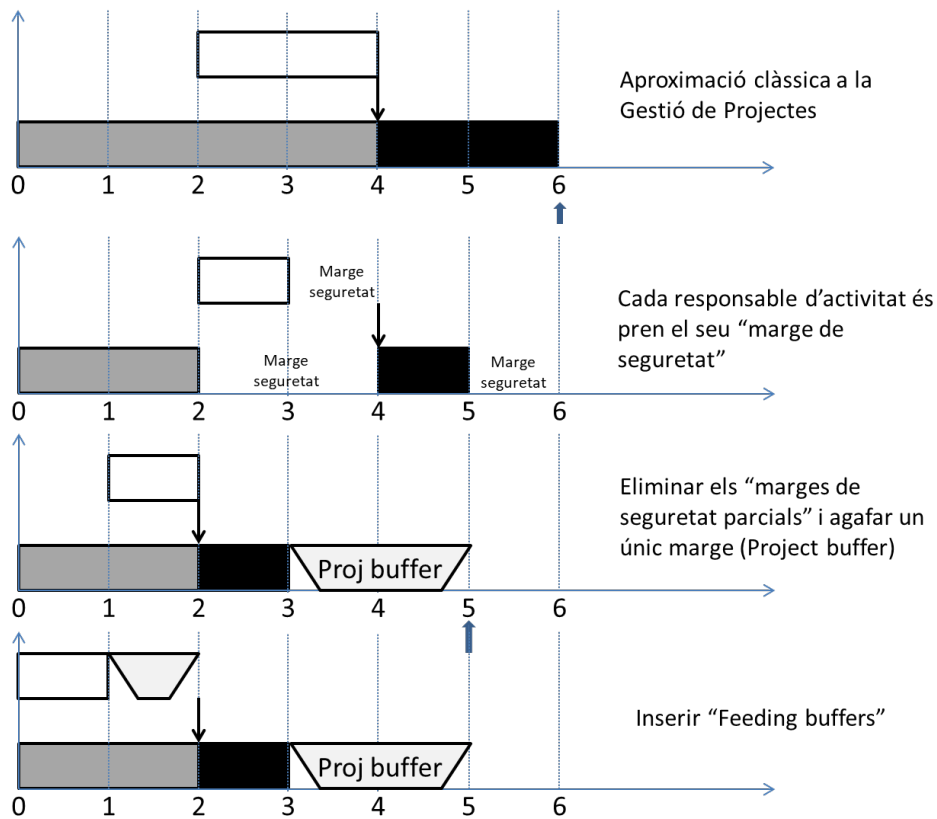


Figura. Comparació d'un projecte senzill gestionat primer amb un enfocament clàssic i després utilitzant el mètode de la cadena crítica.

El camí crític en l'enfocament de gestió clàssic. Eliminant el 50 % del marge de seguretat en cada activitat, s'obté la segona línia. Reordenant el camí crític (tercer gràfic), es pot inserir un *buffer* de projecte (*project buffer*) per protegir la data de lliurament i ser més "competitiu" que amb l'enfocament de gestió clàssic. A més, quan una activitat no crítica està alimentant el camí crític, es pot inserir un *buffer* d'alimentació (*feeding buffer*) per protegir l'avenç regular del camí crític (darrer gràfic).

Els *buffers* i les seves funcions són:

Tipus de <i>buffer</i>	Què protegeix el <i>buffer</i> ?	On s'insereix el <i>buffer</i> ?
<i>Project buffer</i> o <i>buffer</i> de projecte	<ul style="list-style-type: none"> • Protegeix la data de lliurament del projecte • Equilibra les fluctuacions de la cadena crítica 	Al final del projecte
<i>Feeding buffer</i> o <i>buffer</i> d'alimentació	<ul style="list-style-type: none"> • Protegeix la cadena crítica de les fluctuacions negatives de les activitats que alimenten la cadena crítica • Permet aprofitar les fluctuacions positives de la cadena crítica 	On una activitat no crítica alimenta a la cadena crítica

També es poden introduir *buffers* de recursos, que són *pseudobuffers*: no són temps, sinó només un recordatori que un recurs aviat intervindrà en una activitat crítica.

Els passos principals per aplicar els principis de cadena crítica en la planificació d'un projecte són:

1. Trobar el camí crític utilitzant l'estratègia ALAP i les durades sense marges de seguretat per a cada activitat.
2. Anivellament de recursos.
3. Determinació de la cadena crítica.
 - Està formada per activitats crítiques.
 - Una activitat crítica no es pot empènyer cap a l'esquerra sense moure també cap a l'esquerra el punt d'inici de tot el projecte.
 - Cal tenir present que s'anomena cadena crítica en lloc de camí crític, terme que destaca que la cadena és un terme més exigent que no pas camí. La cadena considera no només l'ordre de seqüència de les activitats, sinó també la disponibilitat de recursos.
4. Identificar els punts de *buffer*: on cal inserir *buffers*.
5. Decidir la mida dels *buffers*.
 - Tot i que altres passos d'aquest mètode són força automàtics, la decisió de la mida dels *buffers* és estratègica. Depèn de la competitivitat del sector. No hi ha regles, encara que alguns articles acadèmics en proporcionen algunes, basades en supòsits particulars.
6. Inserir els *buffers*.

