

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Elèctrica

Títol: Disseny d'aplicacions didàctiques amb NI CompactRIO pel Laboratori de Màquines Elèctriques

Document: I. Memòria

Alumne: Jordi Suy Ollé

Tutor: Joan Puigmal Pairo

Departament: Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica

Àrea: Enginyeria de Sistemes i Automàtica

Convocatòria (mes/any) setembre/2015

ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ	3
1.1	Antecedents	3
1.2	Objecte.....	3
1.3	Abast.....	4
2	LÒGICA DE CONTROL.....	5
2.1	Arquitectura NI CompactRIO	5
2.2	Mòduls d'entrades i sortides	8
2.2.1	Mòdul NI 9205 d'entrades analògiques	8
2.2.2	Mòdul NI 9421 d'entrades digitals.....	10
2.2.3	Mòdul NI 9401 de sortides digitals.....	11
3	MAQUINARI DE L'ESTACIÓ DE MESURA	12
3.1	Mesura d'intensitat.....	13
3.2	Mesura de tensió 230-400V	16
3.3	Mesura de tensió 10V	20
3.4	Font d'alimentació.....	21
3.5	Cablejat interconnexió estació de mesura - CompactRIO	21
4	PROGRAMARI ESTACIÓ DE MESURA.....	23
4.1	Programa FPGA	24
4.2	Programa principal.....	28
5	EXEMPLE PRÀCTIC DE L'ESTACIÓ DE MESURA.....	37
6	FUNCIONAMENT DEL MOTOR BRUSHLESS DC O TRAPEZOÏDAL.....	40
7	ELEMENTS DE L'ACCIONAMENT DEL MOTOR BRUSHLESS.....	47
7.1	Motor brushless	48
7.2	Sensors hall	48
7.3	Etapa de potència	49
8	MAQUINARI DE L'ACCIONAMENT DEL MOTOR BRUSHLESS.....	50

8.1	Lectura dels sensors hall	50
8.2	Etapa de potència	51
8.3	Cablejat d'interconnexió de l'accionament del motor brushless	53
9	PROGRAMARI DE L'ACCIONAMENT DEL MOTOR BRUSHLESS.....	55
9.1	Programa FPGA	56
9.2	Programa principal.....	62
10	RESUM DEL PRESSUPOST	65
11	CONCLUSIONS	66
12	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	67
13	BIBLIOGRAFIA.....	68
14	GLOSSARI	70
A	DIAGRAMES DE BLOCS DEL LABVIEW	71
A.1	Programa principal de l'estació de mesura	71
A.2	Programa FPGA de l'estació de mesura	73
A.3	Programa principal de l'accionament del motor brushless	74
A.4	Programa FPGA de l'accionament del motor brushless.....	75
B	MANUAL D'USUARI	77
B.1	Interfície de l'estació de mesura.....	77
B.2	Interfície de l'accionament del motor brushless	78
C	PRÀCTICA DE L'ACCIONAMENT DEL MOTOR BRUSHLESS	80

1 INTRODUCCIÓ

El Laboratori de Màquines Elèctriques té a la seva disposició l'arquitectura NI CompactRIO, que es tracta d'un sistema robust i reconfigurable de control i monitorització de processos industrials. La versatilitat d'aquesta arquitectura la fa molt adequada per desenvolupar tot tipus d'aplicacions didàctiques pel laboratori.

1.1 Antecedents

El Laboratori de Màquines Elèctriques necessita disposar d'un equipament adequat per poder desenvolupar les activitats docents que s'hi porten a terme. Això significa que contínuament es necessita renovar i millorar l'equipament existent per mantenir-lo al dia d'acord amb els recursos tecnològics actuals.

1.2 Objecte

Mitjançant l'arquitectura CompactRIO i la programació amb el software LabVIEW es vol assolir dos objectius perfectament diferenciats.

Per una banda, es vol dissenyar una estació de mesura que permeti realitzar lectures de tensió i intensitat per ser utilitzada en diverses pràctiques realitzades en aquest laboratori. L'objectiu és dotar el laboratori amb un equip útil i flexible que permeti llegir simultàniament fins a quatre intensitats i vuit tensions. Pel que fa a les intensitats, aquestes podran ser d'un valor eficaç de 8A com a màxim mentre que pel que fa a les tensions, quatre podran tenir un valor eficaç de 230V o 400V com a màxim i quatre més podran ser d'un valor màxim de 10V.

L'estació de mesura incorporarà una interfície gràfica on es visualitzaran les senyals i es donarà la magnitud en valor eficaç, la freqüència i la fase de cadascuna d'elles respecte d'una de referència així com també es calcularan potències elèctriques. Totes les senyals podran ser guardades en arxiu de text per poder ser processades amb altres programes. Les representacions gràfiques de les senyals seran temporals i polars.

Es dissenyarà tota l'electrònica associada a l'estació de mesura i es realitzarà la programació amb LabVIEW de la interfície d'usuari.

Per altra banda, es vol actualitzar el sistema d'accionament del motor brushless trapezoïdal del laboratori per a que serveixi com a exemple didàctic per l'estudi d'aquest tipus de motors. Es substituirà l'actual lògica de control implementada amb circuits electrònics no programables per la plataforma CompactRIO juntament amb una electrònica associada per assolir els resultats desitjats. Aquesta electrònica inclou la lectura i tractament de les senyals provinents dels tres sensors hall que incorpora el motor brushless per determinar la posició del seu rotor en cada moment. També serà necessària una etapa de potència que alimenti el motor brushless de forma coherent en funció de la posició del seu rotor.

La interfície d'usuari que es dissenyarà per a l'accionament del motor brushless inclourà una visualització de totes les senyals d'interès a nivell didàctic que intervenen en l'accionament, de tal manera que es pugui utilitzar l'aplicació per a realitzar la pràctica corresponent a l'accionament del motor brushless trapezoïdal de l'assignatura de Control de Màquines Elèctriques.

1.3 Abast

L'abast del projecte comprèn el disseny i muntatge dels circuits electrònics necessaris per les dues aplicacions, la programació amb LabVIEW dels sistemes de tractament del senyal, de càlcul i de control, així com el disseny i configuració de les interfícies de representació gràfica. També comprèn la posta en marxa i el testejat de les dues aplicacions.

No es contempla la possible utilització de cap de l'equipament dissenyat fora de l'àmbit del laboratori. Es desenvoluparà tot el projecte de forma pràctica en les instal·lacions del Laboratori de Màquines Elèctriques.

Per altra banda, l'arquitectura NI CompactRIO utilitzada és la versió 9074 i el software de programació gràfica és el LabVIEW 2013.

2 LÒGICA DE CONTROL

En aquest capítol es descriu el sistema de control que pren les decisions i realitza les operacions per tal de permetre el funcionament de cadascun dels aparells de la instal·lació. Aquesta lògica de control és l'arquitectura NI CompactRIO, que es programa mitjançant el software LabVIEW i és capaç d'interaccionar amb el sistema gràcies a la incorporació de mòduls d'entrades i sortides.

2.1 Arquitectura NI CompactRIO

Aquest projecte es desenvolupa amb l'equip CompactRIO adquirit pel Laboratori de Màquines Elèctriques. Aquest equip és un sistema robust i reconfigurable de control i monitorització de processos industrials. Inclou un controlador encastat i xassís reconfigurable. El controlador encastat ofereix execució autònoma i potent per a aplicacions determinístiques de LabVIEW Real-Time o aplicacions flexibles de Windows Embedded Standard 7. El xassís encastat és al centre del sistema CompactRIO perquè conté un nucli FPGA d'entrades/sortides reconfigurables.

La CPU que utilitza és la NI cRIO-9074 i disposa d'un xassís que permet la incorporació de fins a 8 mòduls per tal de que l'usuari afegeixi tots aquells mòduls necessaris per desenvolupar el seu projecte. En aquest projecte, s'utilitzen tres mòduls: un mòdul d'entrades analògiques (NI 9205), un mòdul d'entrades digitals (NI 9421) i un mòdul de sortides digitals (NI 9401).


	Marca i model	NI CompactRIO 9074
	Tipus	Controlador integrat en Temps Real + FPGA
	Alimentació	19 – 30 VDC
	Comunicació	Ethernet
	Freqüència CPU	400 MHz
	Sistema Operatiu	Real-Time

Figura 1. Característiques de la CPU

El CompactRIO s'alimenta mitjançant una font d'alimentació NI-PS 15 de 24V.


	Marca i model	NI PS-15
	Tipus	Font d'Alimentació 24V
	Alimentació	230 VAC
	Tensió de sortida	24 VDC
	Eficiència	90,2 %
	Pes	500 g

Figura 2. Característiques de la font d'alimentació

La comunicació entre l'equip CompactRIO i l'ordinador s'estableix mitjançant un cable Ethernet que connecta directament els dos elements.

En aquest projecte s'ha determinat que l'ús del nucli FPGA és imprescindible per al funcionament tant de l'estació de mesures com per l'accionament del brushless. En el cas de l'estació de mesures, es necessita un període de mostreig ràpid i fiable que permeti llegir senyals de freqüències elevades. Per altra banda, en l'accionament del motor brushless el CompactRIO necessita llegir les senyals dels sensors hall i generar un PWM d'aproximadament 10 kHz per alimentar l'etapa de potència. Totes aquestes operacions requereixen un cicle d'execució inferior al mil·l·lisegon, per tant només en Real-Time el projecte no s'ha pogut desenvolupar i ha estat necessària la programació FPGA.

La programació en FPGA també ha estat realitzada en LabVIEW tot utilitzant unes funcions adaptades a l'entorn FPGA amb certes limitacions. S'ha utilitzat les eines de compilació Xilinx per traduir el programa de LabVIEW a un bitfile que implementi físicament en FPGA el codi corresponent.

En la figura següent es mostra la FPGA que incorpora el CompactRIO i es dona informació dels recursos disponibles per l'usuari a l'hora de programar.


	Marca i model	Xilinx Spartan 3 2000
	Cel·les lògiques equivalents	46.080
	LUTs/FFs	40.960
	Multiplicadors	40
	RAM (Kb)	720

Figura 3. Característiques de l'FPGA

Cal destacar que en FPGA només s'han implementat les coses indispensables (lectura/escriptura de entrades i sortides). La interfície d'usuari així com tot el codi addicional que això comporta (càlculs, representacions gràfiques, pulsadors, indicadors...) s'ha implementat en el propi sistema operatiu Windows de l'ordinador per tal d'optimitzar els recursos disponibles de l'FPGA.

En definitiva, només s'ha d'implementar en FPGA el codi que sigui determinista, és a dir, que necessiti ser executat sempre i en qualsevol moment en el seu període de temps fixat.

Utilitzant la programació en FPGA es fa necessària la transferència de dades entre el programa implementat en FPGA i el programa que s'executa al propi sistema operatiu Windows.

En aquesta figura es pot veure els diferents programes que es pot tenir en el projecte i dins quin sistema operatiu es troba cadascun.

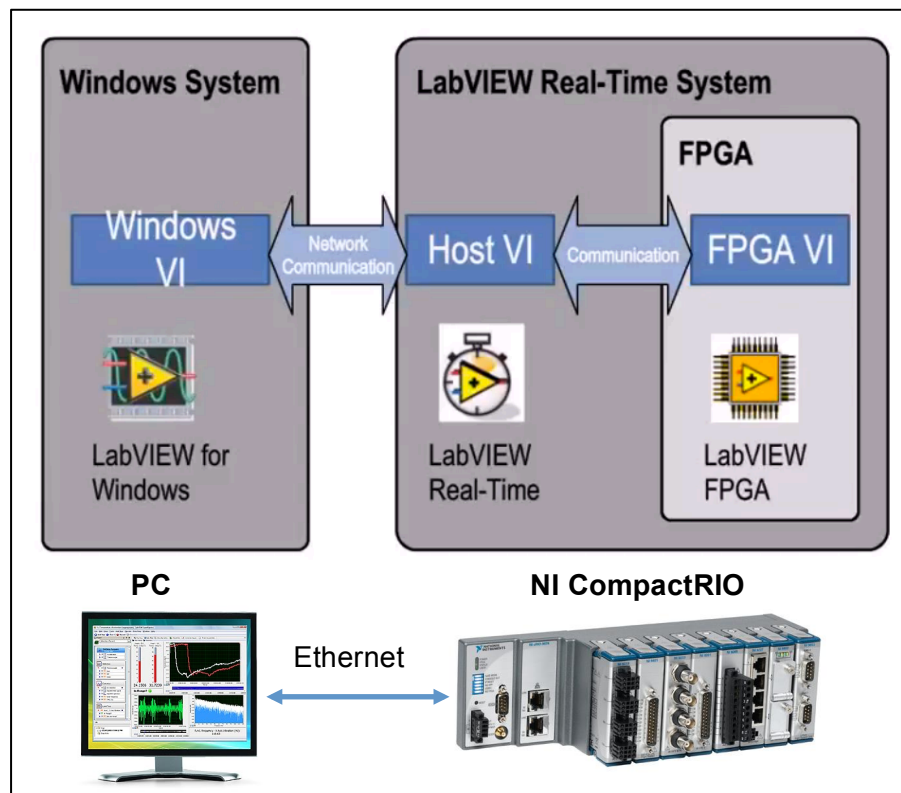


Figura 4. Interfície Windows + Real-Time

En aquest projecte, es tenen programes executant-se dins el sistema operatiu Windows (Windows VI) i programes executant-se dins la FPGA (FPGA VI). No és necessari un tercer programa dins el sistema operatiu en Real-Time que ofereix el CompactRIO ja que totes les accions deterministes que cal executar estaran dins l'FPGA. Per tant, es necessita establir un canal de comunicació per tal d'intercanviar ordres i informació entre els dos programes.

La informació detallada de la solució adoptada per establir aquest canal es troba en l'apartat de programari de cada una de les aplicacions.

2.2 Mòduls d'entrades i sortides

En aquest apartat es descriuen els tres mòduls incorporats al xassís del CompactRIO i que són necessaris per a la realització del projecte. Es justifica la necessitat d'utilitzar cadascun dels mòduls i es proporciona una taula amb les entrades i/o sortides que s'utilitzen de cada mòdul tot explicant quina funció tenen dins el funcionament de tot el conjunt.

2.2.1 Mòdul NI 9205 d'entrades analògiques

El primer dels mòduls que s'explicarà és el mòdul d'entrades analògiques NI 9205.


	Marca i model	NI 9205
	Típus	Mòdul d'entrades analògiques
	Núm. d'entrades	16 diferencials o 32 comunes
	Resolució	16 bits
	Freq. de mostreig	250 kS/s
	Rangs d'entrada	± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V i ± 10 V

Figura 5. Característiques mòdul d'entrades analògiques

El mòdul d'entrades analògiques s'ha configurat per tenir entrades diferencials de manera que s'eliminïn possibles interferències introduïdes en les mesures. Aquest mòdul s'utilitza en l'estació de mesura i permet obtenir una lectura de les 12 senyals que permet l'estació.

Atès que el rang més gran de tensions d'entrada és de ± 10 V, caldrà condicionar els senyals per aprofitar tot el rang de tensió d'entrada.

A continuació, hi ha una taula amb les entrades analògiques utilitzades del mòdul NI 9205. Totes les entrades utilitzades estan configurades com a diferencials, per tant ocupen una entrada Vin + i una entrada Vin -.

Canal	PIN	Funció
0	+ AI0 (1)	Intensitat 1 – Sensor LEM LA 25-NP
	- AI8 (19)	
1	+ AI1 (2)	Intensitat 2 – Sensor LEM LA 25-NP
	- AI9 (20)	
2	+ AI2 (3)	Intensitat 3 – Sensor LEM LA 25-NP
	- AI10 (21)	
3	+ AI3 (4)	Intensitat 4 – Sensor LEM LA 25-NP
	- AI11 (22)	
4	+ AI4 (5)	Tensió 1 – Sensor LEM LV-P
	- AI12 (23)	
5	+ AI5 (6)	Tensió 2 – Sensor LEM LV-P
	- AI13 (24)	
6	+ AI6 (7)	Tensió 3 – Sensor LEM LV-P
	- AI14 (25)	
7	+ AI7 (8)	Tensió 4 – Sensor LEM LV-P
	- AI15 (26)	
16	+ AI16 (9)	Tensió 5 - Directa
	- AI24 (27)	
17	+ AI17 (10)	Tensió 6 - Directa
	- AI25 (28)	
18	+ AI18 (11)	Tensió 7 - Directa
	- AI26 (29)	
19	+ AI19 (12)	Tensió 8 - Directa
	- AI27 (30)	
COM	17	Comú del mòdul

Taula 1. Relació d'entrades analògiques

2.2.2 Mòdul NI 9421 d'entrades digitals

A continuació es mostra una figura on es defineixen les característiques principals del mòdul d'entrades digitals NI 9421.


	Marca i model	NI 9421
	Tipus	Mòdul d'entrades digitals
	Núm. d'entrades	8
	Nivells lògics d'entrada	OFF: < 5V
		ON: 11 - 30V
Consum màxim	240 mW màx	

Figura 6. Característiques mòdul d'entrades digitals

El mòdul d'entrades digitals és l'encarregat de llegir les senyals provinents dels sensors hall per determinar la posició del rotor del motor brushless en tot moment.

A continuació, hi ha una taula que mostra les tres entrades digitals que llegeix el mòdul.

Canal	PIN	Funció
DI1	1	Sensor hall 1
DI2	2	Sensor hall 2
DI3	3	Sensor hall 3
COM	9	Comú del mòdul

Taula 2. Relació d'entrades analògiques

Veiem com el mòdul necessita llegir una tensió superior a 11VDC per donar un nivell lògic alt mentre que el nivell lògic baix ha de ser una tensió inferior a 5V. Caldrà doncs, una etapa de condicionament de senyal que adapti les tensions dels sensors hall al marge de tensions d'entrada del mòdul.

2.2.3 Mòdul NI 9401 de sortides digitals

El tercer i últim mòdul utilitzat és el de sortides digitals.


	Marca i model	NI 9401
	Tipus	Mòdul de sortides digitals
	Núm. de sortides	8
	Nivells lògics de sortida	OFF: 0,4 V màx
		ON: 4,30 – 5,25 V
Consum màxim	580 mW màx	

Figura 7. Característiques mòdul sortides digitals

Les sortides digitals són necessàries per accionar l'etapa de potència del motor brushless. Cada sortida digital s'encarrega d'activar un dels MOSFETS IRF840 de l'etapa de potència. Per tant, es requereixen 6 sortides digitals, 3 de les quals treballaran amb valors lògica 0 i 1 (MOSFETS superiors de les branques) i 3 sortides més treballaran amb PWM (MOSFETS inferiors de les branques).

La taula següent mostra la relació de sortides digitals del mòdul que s'utilitzen i la funció de cadascuna d'elles.

Canal	PIN	Funció
DIO1	16	Accionar MOS 1 (tot o res)
DIO2	17	Accionar MOS 2 (tot o res)
DIO3	19	Accionar MOS 3 (tot o res)
DIO4	20	Accionar MOS 4 (senyal PWM)
DIO5	22	Accionar MOS 5 (senyal PWM)
DIO6	23	Accionar MOS 6 (senyal PWM)
COM	1	Comú del mòdul

Taula 3. Relació de sortides digitals

3 MAQUINARI DE L'ESTACIÓ DE MESURA

En aquest capítol es descriurà tota l'electrònica necessària per permetre l'adquisició de les diferents lectures de tensió i intensitat per part del mòdul d'entrades analògiques del CompactRIO.

La següent figura mostra els elements que intervenen en aquesta aplicació.

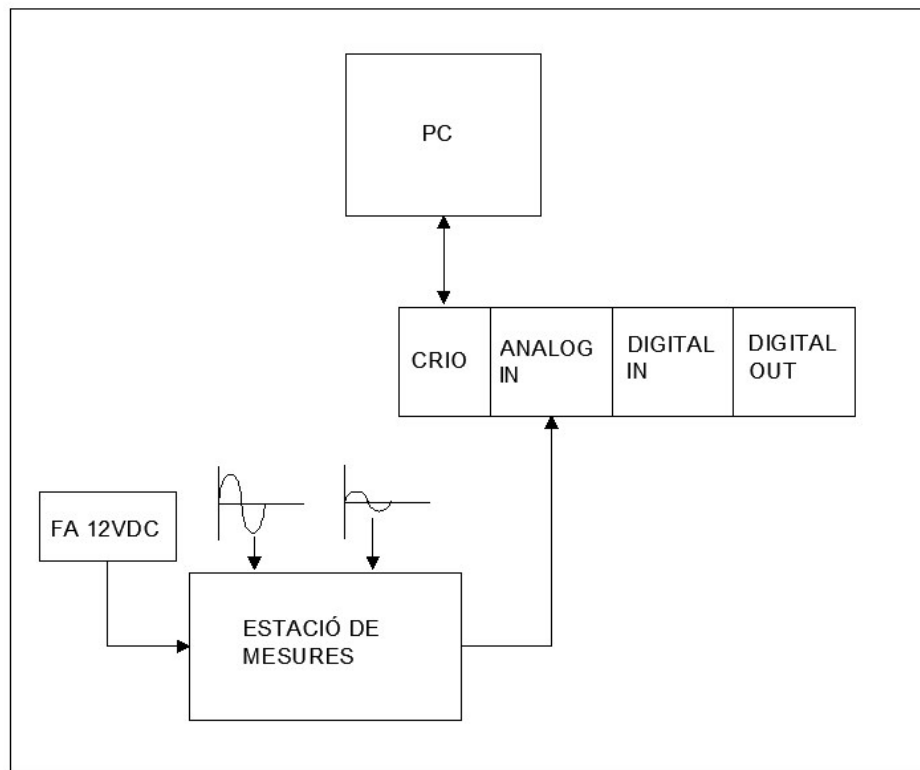


Figura 8. Maquinari de l'estació de mesura

Els elements que intervenen en l'aplicació de l'estació de mesures són el mòdul d'entrades analògiques del CompactRIO, la pròpia estació de mesures i la font d'alimentació de 12VDC per alimentar tota l'electrònica de l'estació.

A continuació es farà una explicació detallada del funcionament de l'estació i es definiran tots els circuits electrònics presents.

3.1 Mesura d'intensitat

Per obtenir lectures de valors instantanis d'intensitat que circula per un conductor s'utilitza un transductor d'intensitat d'efecte hall.

Aquest transductor d'intensitat és de la casa LEM i a continuació es mostren les seves característiques principals.

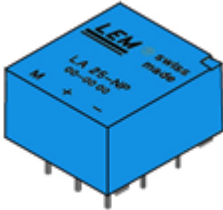
	Marca i model	LA 25-NP
	Tipus	Transductor d'intensitat d'efecte Hall
	Alimentació	± 15 VDC
	Ratio conversió	1-2-3-4-5 : 1000
	Intensitat pr. nominal r.m.s. (I_{PN})	25 A
	Intensitat sec. nominal r.m.s. (I_{PN})	25 mA
	Precisió @ I_{PN}, $T_A=25^\circ\text{C}$	$\pm 0,5\%$
	Linealitat	$<0,2\%$
	Temps de resposta	$< 1\mu\text{s}$

Figura 9. Característiques transductor d'intensitat

Aquest sensor requereix una alimentació simètrica de ± 15 VDC per tant serà necessari disposar d'aquesta tensió en l'estació de mesures. També serà necessari condicionar la senyal de tensió que dona el sensor fins als rangs de tensió d'entrada dels mòduls d'adquisició de senyals analògiques del CompactRIO.

Aquest transductor d'intensitat disposa de 10 connectors en la seva part inferior, de manera que depenent de com es connectin aquests connectors les intensitat nominal i màxima a mesurar varia.

En aquest projecte, s'ha decidit fer la connexió que permet una intensitat nominal de 8 A eficaços i una intensitat màxima de 12 A eficaços. S'ha considerat que aquesta intensitat màxima és suficient com per poder mesurar la majoria d'intensitats presents en els muntatges del laboratori.

En la taula següent es mostra la configuració utilitzada del sensor.

Núm. de voltes primari	Intensitat primari		Intensitat de sortida nominal I_{SN} (mA)	Rati de voltes K_N	Resistència primari R_P (m Ω)	Inductància primari L_P (μ H)	Connexionat
	Nominal I_{PN} (A)	Màxima I_P (A)					
3	8	12	24	3/1000	2,5	0,21	

Taula 4. Paràmetres del sensor d'intensitat

Aquest sensor d'intensitat dona una tensió proporcional a la intensitat que circula pel seu circuit primari. D'aquesta manera el sensor va acompanyat d'una etapa de condicionament de senyals per amplificar la mesura del sensor fins als rangs de tensió d'entrada del mòdul d'entrades analògiques del CompactRIO. A continuació es mostra el circuit de condicionament dissenyat per tenir una tensió proporcional a la intensitat de tal manera que doni un senyal sinusoidal de 10V de valor màxim per una intensitat eficaç de 8A.

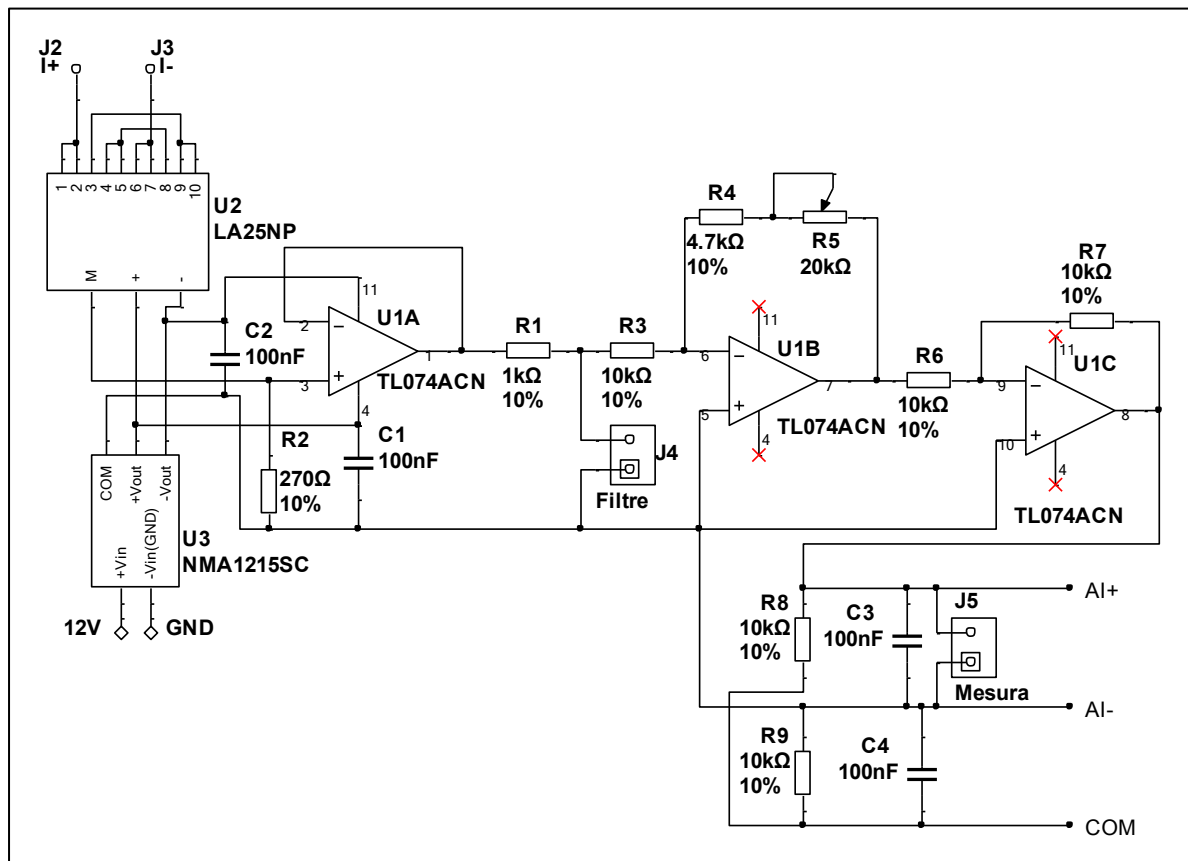


Figura 10. Esquemàtic de la mesura d'intensitat

Inicialment es col·loca un circuit seguidor U1A per augmentar la impedància d'entrada de l'etapa. Llavors es troba amb un amplificador inversor de guany variable U1B. Aquest guany es varia mitjançant el potenciòmetre R5 de tal manera que permet a l'usuari variar el guany de l'etapa. Per acabar, hi ha un inversor de guany unitari U1C per retornar el signe original a la mesura. Per a l'entrada diferencial al mòdul d'entrades del CompactRIO el fabricant aconsella col·locar, en paral·lel entre cada entrada i el comú del mòdul, una resistència de 10 k Ω i un condensador de 100 nF.

Els condensadors de 100 nF C1 i C2 són condensadors de desacoblament situats en les alimentacions del circuit integrat per millorar-ne la seva estabilitat i evitar l'entrada de possibles sorolls.

S'ha habilitat el circuit amb un connector J4 que dóna la opció de filtrar la mesura en cas de ser necessari en el futur. Per altra banda, també hi ha un punt de mesura J5 que permet visualitzar amb una oscil·loscopi la forma d'ona del senyal de la sortida de l'etapa. Aquesta visualització es útil per ajustar el guany amb el potenciòmetre R5.

L'alimentació prové d'un convertidor dc-dc que dóna els 15V i els -15V necessaris per alimentar el sensor d'intensitat. Aquest convertidor es troba alimentat per la font d'alimentació principal de 12V de la placa. D'aquesta manera, cada unitat de mesura es troba completament aïllada de la resta i s'eviten interferències i sorolls que puguin afectar negativament les mesures.

Per ajustar el potenciòmetre de guany s'ha fet circular 8 A eficaços per l'entrada de l'etapa mesurats amb un amperímetre. Llavors s'ha ajustat el potenciòmetre de guany perquè a la sortida de l'etapa hi hagués una senyal sinusoïdal de 7,07V de valor eficaç (10V de valor màxim). D'aquesta manera s'aprofita al màxim el rang d'entrada del mòdul d'entrades analògiques del CompactRIO.

Cal destacar que el transductor d'intensitat ha d'estar en sèrie amb el circuit en el qual es vol fer la mesura d'intensitat tal com si es tractés d'un amperímetre.

3.2 Mesura de tensió 230-400V

Per obtenir lectures de valors instantanis de tensió eficaç entre dos punts d'un sistema elèctric s'utilitza un transductor de tensió d'efecte hall. A continuació es mostren les característiques principals d'aquest sensor.

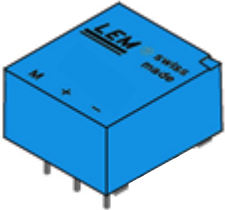
	Marca i model	LV 25-P
	Tipus	Transductor de tensió d'efecte Hall
	Alimentació	± 15 VDC
	Ratio conversió	2500 : 1000
	Intensitat pr. nominal r.m.s. (I_{PN})	10 mA
	Intensitat sec. nominal r.m.s. (I_{PN})	25 mA
	Precisió @ I_{PN}, $T_A=25^\circ\text{C}$	$\pm 0,9\%$
	Linealitat	$<0,2\%$
	Temps de resposta	40 μs

Figura 11. Característiques transductor de tensió

Aquest sensor requereix una alimentació simètrica de ± 15 VDC per tant serà necessari disposar d'aquesta tensió en l'estació de mesures. També serà necessari condicionar la senyal de tensió que dona el sensor fins als rangs de tensió d'entrada dels mòduls d'adquisició de senyals analògiques del CompactRIO. A diferència del sensor d'intensitat, aquest transductor necessita una resistència d'entrada externa que limiti la intensitat d'entrada als 10 mA nominals i permeti obtenir una precisió òptima. La resistència d'entrada s'ha de calcular per tal de que en aplicar-se el voltatge nominal que es vol mesurar, passin els 10 mA d'intensitat en el circuit primari del sensor.

En aquest projecte es vol mesurar dos tensions diferents: 230 Vrms i 400 Vrms, per tant, segons el rang de mesura que es vulgui, s'haurà de col·locar una resistència o una altra en el circuit primari.

Si es vol mesurar fins a 230 Vrms (325V màxims) s'ha de col·locar una resistència de 33 k Ω per tal de fer passar 10 mA en aplicar-se aquesta tensió. D'aquesta manera la mesura de tensió aniria de 0 fins a 230Vrms aprofitant tot el rang d'entrada del sensor.

Si es vol mesurar fins a 400 Vrms (566V màxims) s'ha de col·locar una resistència de 56 k Ω per tal de fer passar 10 mA en aplicar-se aquesta tensió. D'aquesta manera la mesura de tensió aniria de 0 fins a 400Vrms aprofitant tot el rang d'entrada del sensor.

S'han dissenyat unes petites plaques de circuit imprès amb un connector que permeti posar i treure les resistències d'entrada al sensor de forma ràpida i fàcil. S'ha decidit només realitzar les plaques per a poder mesurar fins a 230 Vrms ja que és la tensió típica que s'utilitza en el laboratori i s'ha deixat la possibilitat de realitzar plaques per a mesurar 400 Vrms en cas de que en un futur sigui necessari.

La potència a dissipar per la resistència de 33 k Ω a 230Vrms és de 3,3W per tant, s'ha decidit col·locar dues resistències de 68kW i 4W de potència per reduir l'escalfament de cada una de les resistències. A continuació hi ha una figura amb l'esquemàtic de la placa dissenyada.

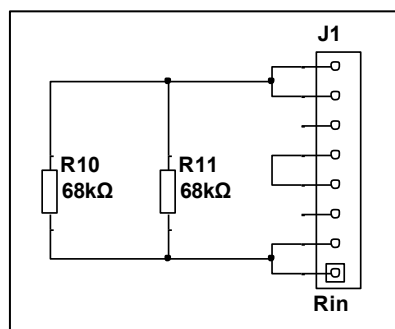


Figura 12. Esquemàtic placa per mesura de tensió 230Vrms

A continuació es mostra la serigrafia superior i les pistes de coure de la petita placa de resistències per mesurar tensions de 230Vrms.

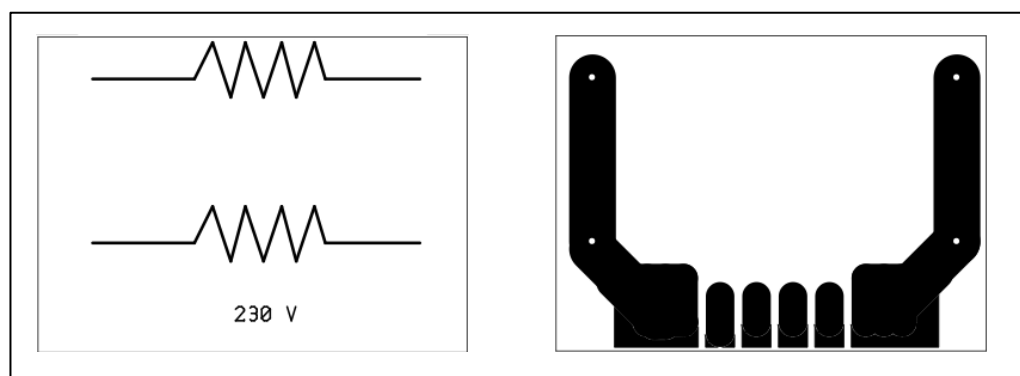


Figura 13. Serigrafia placa per mesura de tensió 230Vrms

S'ha soldat una tira de 8 pins mascle a la placa de resistències per tal de poder-la col·locar en la base de 8 pins femella que es troba en sèrie amb l'entrada de cadascun dels transductors de tensió.

Veiem com la figura següent mostra l'entrada del sensor de tensió on es pot veure que el mateix connector de 8 pins utilitzat per les resistències es troba l'entrada positiva per tal d'acoblar-hi la plaqueta amb les resistències a sobre.

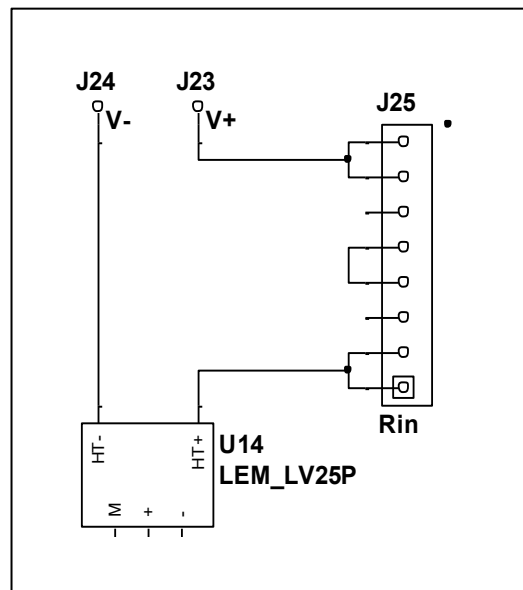


Figura 14. Esquemàtic d'entrada del sensor de tensió

S'han realitzat quatre plaques de resistències per tenir un rang de mesura de 230Vrms en cadascuna de les quatre unitats de mesura de què disposa l'estació de mesura.

Aquest sensor dóna una senyal proporcional a la tensió aplicada al seu circuit primari. D'aquesta manera el sensor va acompanyat d'una etapa de condicionament de senyals per amplificar la mesura del sensor fins als rangs de tensió d'entrada del mòdul d'entrades analògiques del CompactRIO.

L'etapa de condicionament correspon a l'etapa utilitzada en el circuit de mesura d'intensitat prèviament descrit en aquest capítol.

A continuació es mostra el circuit de condicionament dissenyat per tenir una senyal proporcional a la tensió aplicada de tal manera que doni uns valors màxims de $\pm 10V$ per 230V eficaços.

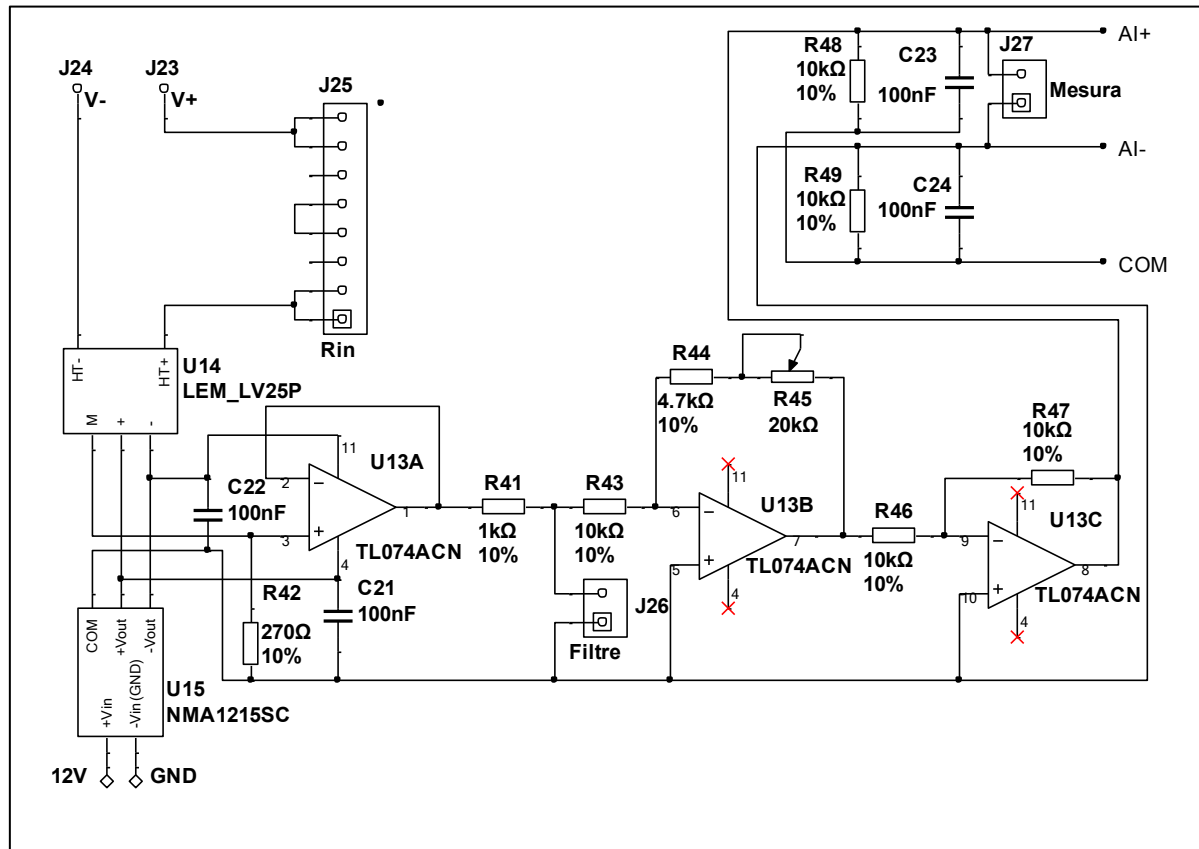


Figura 15. Esquemàtic de la mesura de tensió de 230/400Vrms

Inicialment es col·loca un circuit seguidor U13A per augmentar la impedància d'entrada de l'etapa. Llavors es troba amb un amplificador inversor de guany variable U13B. Aquest guany es varia mitjançant el potenciòmetre R45 de tal manera que permet a l'usuari variar el guany de l'etapa. Per acabar, hi ha un inversor de guany unitari U13C per retornar el signe original a la mesura. Per a l'entrada diferencial al mòdul d'entrades del CompactRIO el fabricant aconsella col·locar, en paral·lel entre cada entrada i el comú del mòdul, una resistència de 10 kΩ i un condensador de 100 nF.

Els condensadors de 100 nF C21 i C22 són condensadors de desacoblament situats en les alimentacions per millorar-ne la seva estabilitat i evitar l'entrada de possibles sorolls.

El connector J25 serveix per connectar-hi la resistència d'entrada de l'etapa. Aquesta resistència és la que determinarà la intensitat que circularà pel primari del sensor i per tant és la que determina la resolució. Segons si es vol un abast de 230V o de 400V caldrà connectar-hi una resistència o una altra.

S'ha habilitat el circuit amb un connector J26 que dóna la opció de filtrar la mesura en cas de ser necessari en el futur. Per altra banda, també hi ha un punt de mesura J5 que permet visualitzar amb una oscil·loscopi la forma d'ona del senyal de la sortida de l'etapa. Aquesta visualització es útil per ajustar el guany amb el potenciòmetre R5

L'alimentació prové d'un convertidor dc-dc que dóna els 15V i els -15V necessaris per alimentar el sensor d'intensitat. Aquest convertidor es troba alimentat per la font d'alimentació principal de 12V de la placa. D'aquesta manera, cada unitat de mesura es troba completament aïllada de la resta i s'eviten interferències i sorolls que puguin afectar negativament les mesures.

Per ajustar el potenciòmetre de guany s'han aplicat 230V eficaços a l'entrada l'etapa mesurats amb un voltímetre. Llavors s'ha ajustat el potenciòmetre de guany perquè a la sortida de l'etapa hi hagués 10V de tensió. D'aquesta manera s'aprofita al màxim el rang d'entrada del mòdul.

Cal destacar que el transductor de tensió ha d'estar en paral·lel amb el circuit en el qual es vol fer la mesura de tensió tal com si es tractés d'un voltímetre.

3.3 Mesura de tensió 10V

La mesura de tensió de 10V de valor màxim no requereix d'electrònica associada ja que el mòdul d'entrades analògiques accepta precisament fins a 10V de tensió d'entrada.

Per aquesta raó, aquestes mesures només requereixen el filtre RC que recomana el fabricant per a la seva bona lectura.

A continuació, hi ha una figura que mostra el petit circuit que conforma una mesura de tensió de 10V de valor màxim.

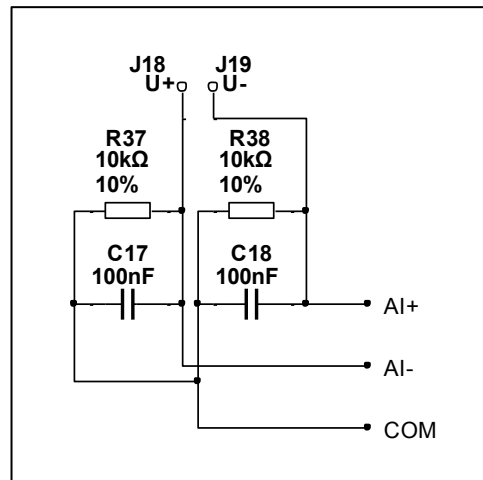


Figura 16. Esquemàtic de la mesura de tensió de 10Vmàx

3.4 Font d'alimentació

La font d'alimentació encarregada de donar tensió a tota l'electrònica de l'estació és de 12V, 1A i a continuació es mostren les seves principals característiques.


	Marca i model	Emerson	DA12-M	
		Series		
	Potència	12 W		
	Alimentació	230 VAC		
	Sortida	12V, 1A		
	Tipus de sortida	Single		

Figura 17. Font d'alimentació Emerson

3.5 Cablejat interconnexió estació de mesura - CompactRIO

Aquesta connexió permet la lectura de les senyals analògiques per part del mòdul NI 9205 del CompactRIO. Les dotze senyals que llegeix arriben en configuració diferencial i acotades

en un rang de $\pm 10V$. Aquesta connexió està formada per un multicable de vint-i-cinc conductors amb apantallament.

A continuació hi ha una taula que defineix cadascun dels conductors d'aquest cable.

CONNECTOR DB25 ESTACIÓ	CABLE		MÒDUL ANALOG IN	
	J22	CONCEPTE	COLOR	PIN
1	I3+	Groc	3	AI2
2	I3-	Blanc-groc	21	AI10
3	I2+	Gris	2	AI1
4	I2-	Blanc-gris	20	AI9
5	I1+	Blau	1	AI0
6	I1-	Blanc-blau	19	AI8
7	COM	Negre	17	COM
8	V1+	Vermell	5	AI4
9	V1-	Blanc-vermell	23	AI12
10	V2+	Verd	6	AI5
11	V2-	Blanc-verd	24	AI13
12	V3+	Gris-rosa	7	AI6
13	V3-	Gris-marró	25	AI14
14	I4+	Rosa	4	AI3
15	I4-	Blanc-rosa	22	AI11
16	V5+	Lila	9	AI16
17	V5-	Vermell-blau	27	AI24
18	V6+	Blanc	10	AI17
19	V6-	Blanc-negre	28	AI25
20	V8-	Marró-verd	30	AI27
21	V8+	Groc-marró	12	AI19
22	V7-	Rosa-marró	29	AI26
23	V7+	Marró	11	AI18
24	V4-	Marró-blau	26	AI15
25	V4+	Marró-vermell	8	AI7

Taula 5. Cable estació de mesures - CompactRIO

4 PROGRAMARI ESTACIÓ DE MESURA

En aquest capítol es descriuran els programes desenvolupats en LabVIEW que conformen el projecte de l'estació de mesura.

Aquest projecte de LabVIEW engloba dos programes principals. Un dels programes és el Host PC.vi que es troba dins el sistema operatiu Windows de l'ordinador i és el que l'usuari executarà per iniciar el funcionament de l'estació de mesura. L'altre programa és l'fpga.vi que es troba dins l'entorn FPGA que ofereix el CompactRIO i s'encarregarà de l'adquisició de les diferents senyals que es mesuren.

En la figura següent es mostra la distribució dels programes que formen part del projecte LabVIEW juntament amb tot el hardware corresponent. Els dos programes principals del projecte estan assenyalats amb una fletxa vermella.

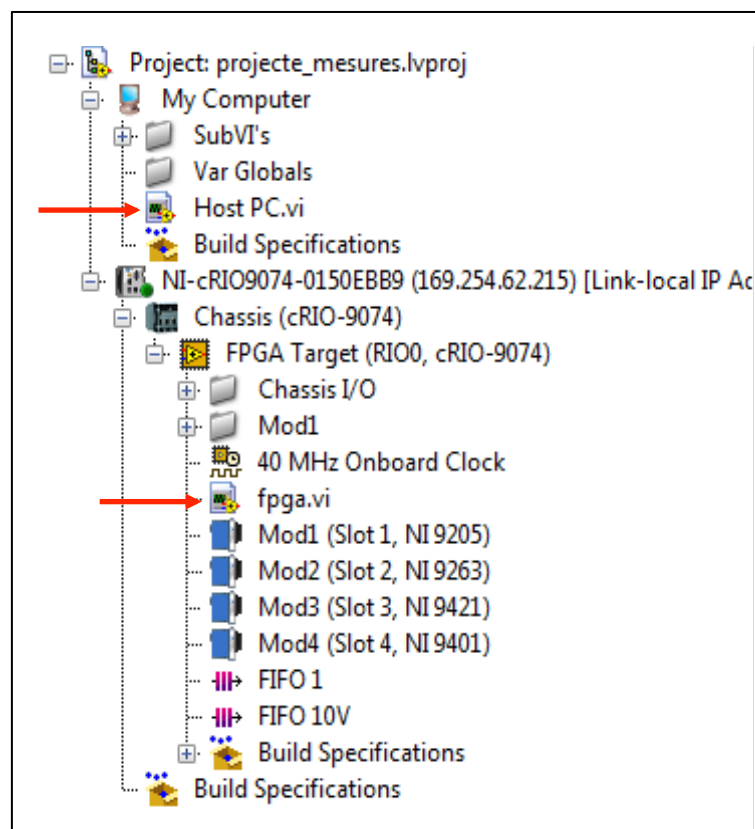


Figura 18. Projecte LabVIEW de l'estació de mesura

4.1 Programa FPGA

El programa realitzat en FPGA executa dues operacions bàsiques: lectura de senyals i enviament cap al programa principal. Aquestes operacions es porten a terme a un ritme de 200 microsegons per cicle. Aquest temps és el període de mostreig de l'estació de mesures i correspon a una freqüència de 5 kHz. Tenint en compte que l'aplicació està pensada per mesurar senyals provinents de la xarxa elèctrica (50 Hz) la freqüència de mostreig del programa FPGA (5 kHz) és suficient com per tenir una bona lectura de les senyals.

L'organigrama general del programa FPGA és senzill i només incorpora les operacions imprescindibles que s'han d'executar en l'FPGA. A continuació hi ha una figura que mostra l'organigrama.

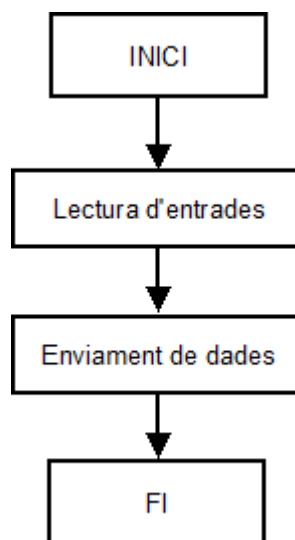


Figura 19. Organigrama general programa FPGA

La lectura d'entrades correspon a llegir les 12 entrades analògiques que arriben provinents de l'estació: quatre intensitats i vuit tensions. Llavors un cop llegides es col·loquen dins un array de valors i s'escriu aquest array en una memòria FIFO que ofereix el programa. Aquesta memòria FIFO serà llegida pel programa principal per tenir accés a totes les dades obtingudes i poder-ne fer les representacions gràfiques.

A continuació hi ha una figura del codi del programa on es veu aquest procediment.

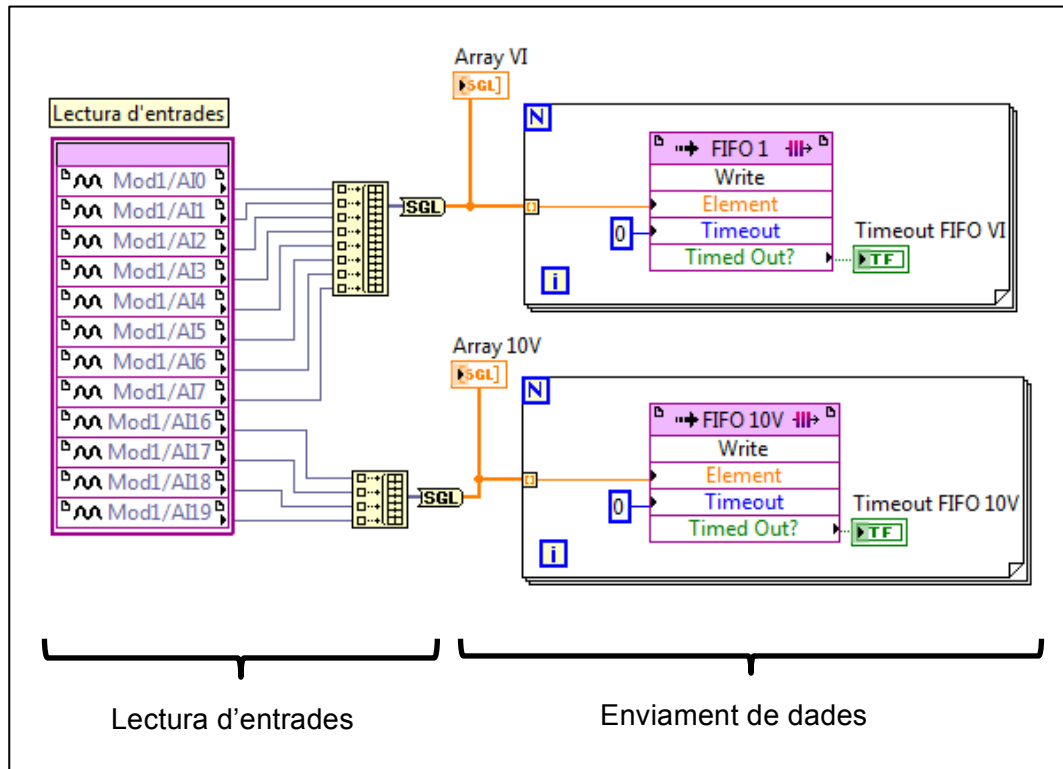


Figura 20. Programa FPGA

Veiem com l'enviament de dades es fa amb dos memòries FIFO. L'entorn FPGA posa a disposició del l'usuari fins a tres memòries FIFO per a ser utilitzades en l'enviament de dades. En aquest programa es deixa una memòria FIFO lliure per poder fer ampliacions futures i s'utilitzen dues memòries. Una memòria inclou totes les senyals provinents dels transductors tant d'intensitat com de tensió (Array VI) mentre que l'altra FIFO incorpora les quatre mesures de 10V (Array 10V).

Les dues memòries FIFO tenen un indicador lluminós (Timeout FIFO) que s'encén quan la memòria ha quedat plena de valors i s'estan perdent dades tot indicant que hi ha algun funcionament incorrecte en el sistema de comunicació.

En la recepció, el programa principal va llegint les dades i les va extraient de la memòria FIFO a una velocitat més lenta, per això és important una memòria amb espai suficient com per no quedar saturada de dades en cap moment. Aquesta memòria serveix com a intermediari entre un emissor que emet a gran velocitat i un receptor que llegeix més lentament.

En la figura següent, es mostra l'intercanvi d'informació mitjançant memòries FIFO entre el programa que s'executa a l'FPGA (fpga.VI) i el programa que s'executa dins el sistema operatiu Windows (Host.VI).

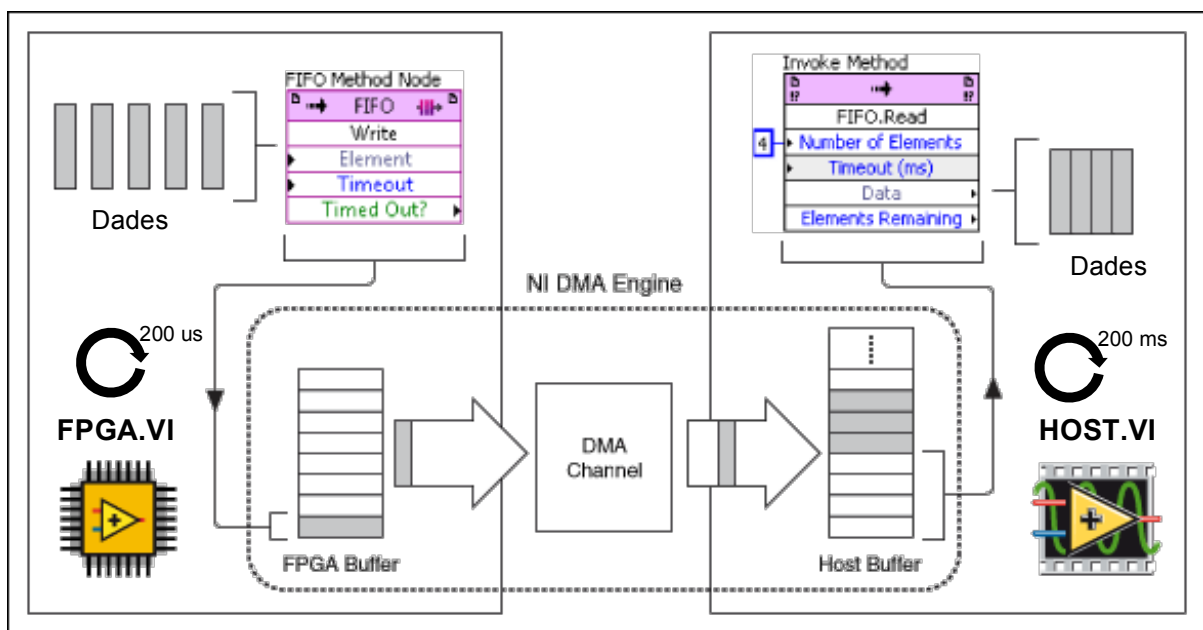


Figura 21. Comunicació DMA entre VI's

Sabent que l'fpga.vi escriu dades cada 200 us i que el Host.vi les llegeix cada 200 ms es pot deduir que quan el Host.vi vagi a llegir les dades a la memòria FIFO es trobarà 1000 dades escrites per cada lectura. Per tant, en el cas de l'Array VI on s'escriuen fins a 8 lectures diferents en cada cicle de l'fpga, el Host.vi llegirà cada vegada 8000 dades. En canvi, l'Array 10V on s'escriuen 4 lectures, el Host.vi llegirà 4000 dades cada vegada.

Cal recordar que aquest programa FPGA és compilat mitjançant les eines de compilació Xilinx i implementat físicament a la FPGA que incorpora el propi CompactRIO. Aquestes eines llegeixen, interpreten i converteixen un codi de programació gràfica de LabVIEW en un arxiu de bits anomenat FPGA Bitfile que té totes les instruccions necessàries per implementar el codi LabVIEW en el nucli FPGA. A continuació, hi ha una figura que mostra els passos a seguir en el procés de compilació del programa LabVIEW.

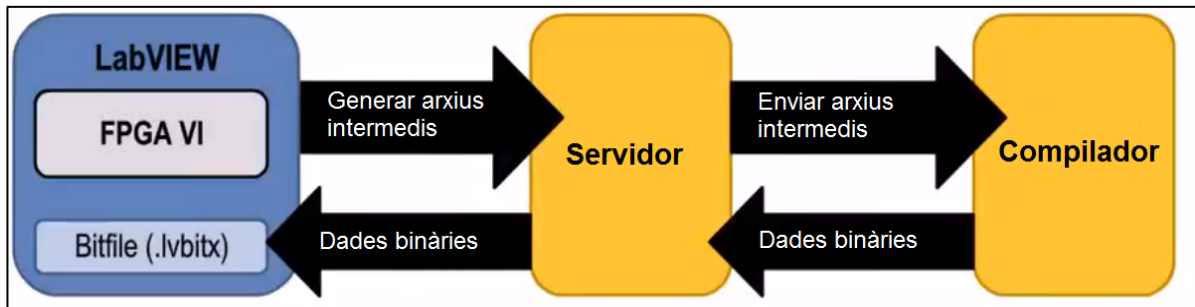


Figura 22. Passos en el procés de compilació

Un cop el programa ha estat compilat amb èxit per part de les eines de compilació, cal analitzar els informes per tal de determinar si l'ús de recursos que es fa de l'FPGA és coherent.

Reports			
Final device utilization (map)			
Device Utilization	Used	Total	Percent
Slice Registers	4232	40960	10,3
Slice LUTs	5976	40960	14,6
Mult18X18s	1	40	2,5
Block RAMs	8	40	20,0

Figura 23. Informe de recursos utilitzats

En la figura anterior es pot veure com tots els recursos utilitzats per implementar el programa en FPGA són inferiors als recursos totals de què disposa l'FPGA, per tant en principi, en aquest aspecte, el programa compleix amb les limitacions del sistema. Els percentatges d'ús de cada recurs indiquen que el programa FPGA encara permet futures ampliacions del codi de programació sense tenir problemes de recursos.

Pel que fa als temps d'execució, en la figura següent es poden veure les freqüències en MHz utilitzades i es pot comprovar com sempre són inferiors a les freqüències màximes de funcionament.

Reports		
Final timing (place and route) ▼		
Clocks	Requested (MHz)	Maximum (MHz)
MiteClk (Used by non-diagram components)	33,00	43,80
40 MHz Onboard Clock	40,00	61,95
80MHz (Used by non-diagram components)	80,00	91,03

Figura 24. Informe de les freqüències de funcionament

Un cop analitzada la informació del compilador, es pot dir que el programa s'ajusta de forma coherent als recursos de què disposa l'FPGA i deixa recursos suficients per a possibles ampliacions en l'estació de mesura.

4.2 Programa principal

El programa principal de l'estació de mesura es troba dins el propi sistema operatiu Windows de l'ordinador i és el programa que ha d'executar l'usuari per iniciar l'adquisició de dades.

La tasca principal d'aquest programa és la de rebre les lectures de cada mesura provinents de l'fpga.vi i tractar aquestes dades per tal de extreure'n la màxima informació possible i poder representar-les gràficament. D'aquesta manera l'usuari tindrà a la seva disposició tota la informació necessària de les senyals per tal de poder treure les conclusions pertinents.

Doncs que aquest programa realitza operacions de càlcul, representacions gràfiques i manipulació de arrays de dades, no és necessari un cicle d'execució molt elevat. En aquest cas, s'ha determinat que un cicle de 200 ms s'ajusta correctament a les necessitats del programa.

A continuació hi ha l'organigrama del funcionament general del programa principal.

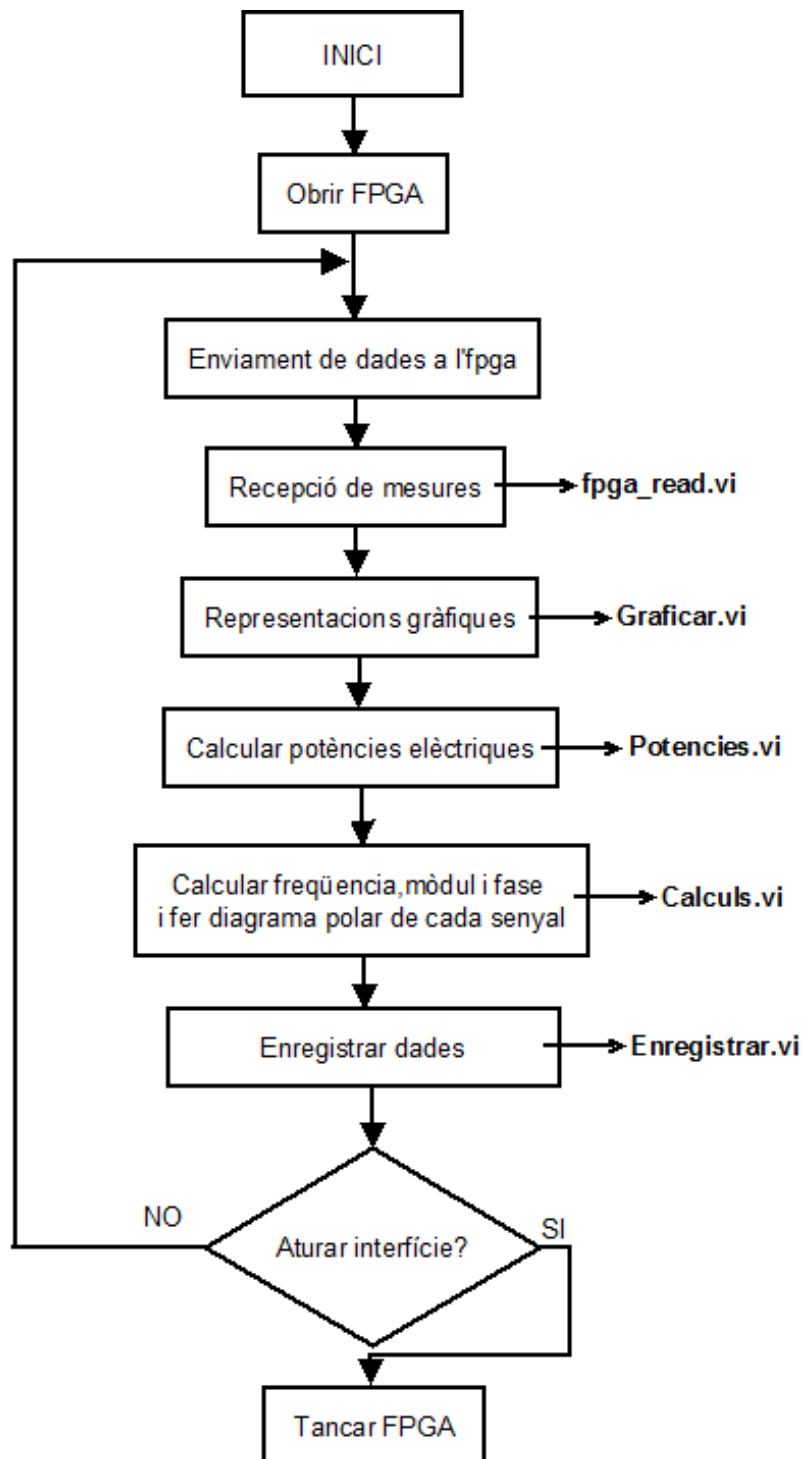


Figura 25. Organigrama del programa principal

Els SubVI's utilitzats en aquest programa queden resumits en la següent taula.

SubVI	Funció
Fpga_read.vi	Lectura de les dades provinents de l'fpga.vi
Graficar.vi	Representació temporal de les lectures
Potències.vi	Càlcul de potències elèctriques monofàsiques i trifàsiques
Calculs.vi	Càlcul de freqüència, mòdul, angle i representació polar de cada lectura
Enregistrar.vi	Ofereix la possibilitat de guardar lectures en un arxiu .txt

Taula 6. SubVI's del programa principal

El primer que fa el programa principal és enviar dades a l'fpga. En aquest cas només li envia el període de mostreig que tindrà el programa fpga.vi. Tot seguit procedeix a la recepció de les mesures mitjançant la lectura de les dues memòries FIFO on el programa fpga.vi ha guardat els arrays de dades.

A continuació hi ha una figura que mostra el programa que conté el subVI Fpga_read.vi i es pot veure com es llegeixen les dades de les dues memòries FIFO i es transfereixen a un sol array anomenat Array Lectures.

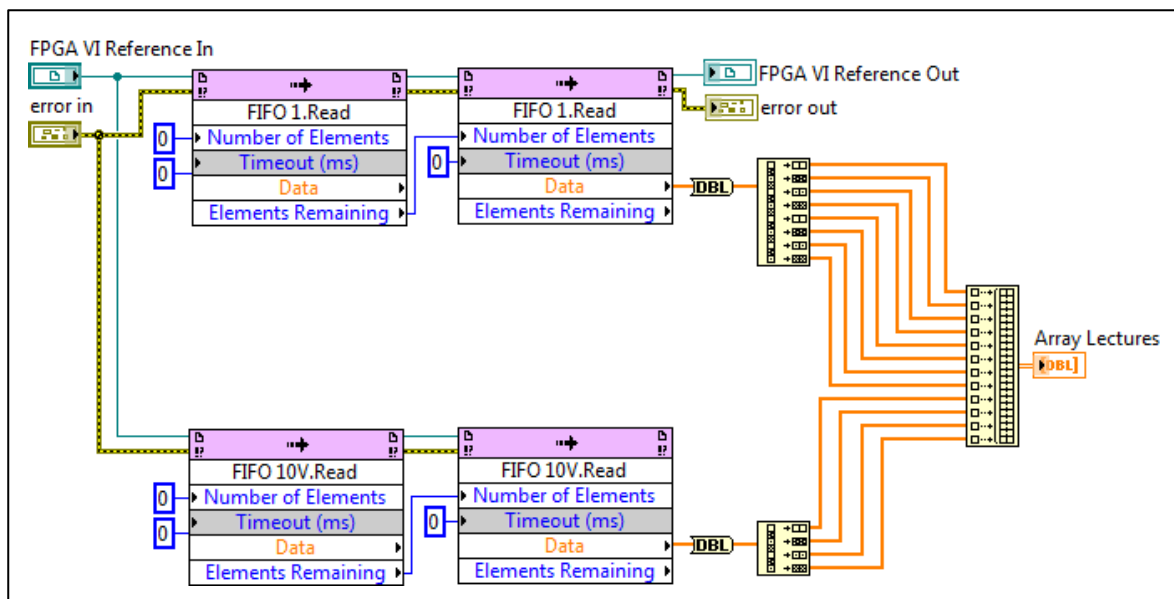


Figura 26. Lectura de senyals

Pel que fa a la representació gràfica, el subVI Graficar.vi té com a entrades l'Array Lectures i dos paràmetres que defineix l'usuari: Referència 0° i Períodes. El subVI Graficar.vi el que fa és buscar el pas per zero en ascendent (de negatiu a positiu) de la senyal que l'usuari ha escollit com a referència 0° i llavors fa una representació gràfica de totes les senyals adquirides durant els períodes de la senyal de referència que determini l'usuari.

A continuació hi ha una figura on es mostra gràficament el que fa el subVI Graficar.vi. En aquest cas l'usuari ha escollit que la senyal de referència sigui la de color blau i que vol visualitzar dos períodes de senyal. El que es mostraria en la interfície d'usuari seria la zona de la gràfica que es troba de color groc, tot eliminant la resta parts de la gràfica.

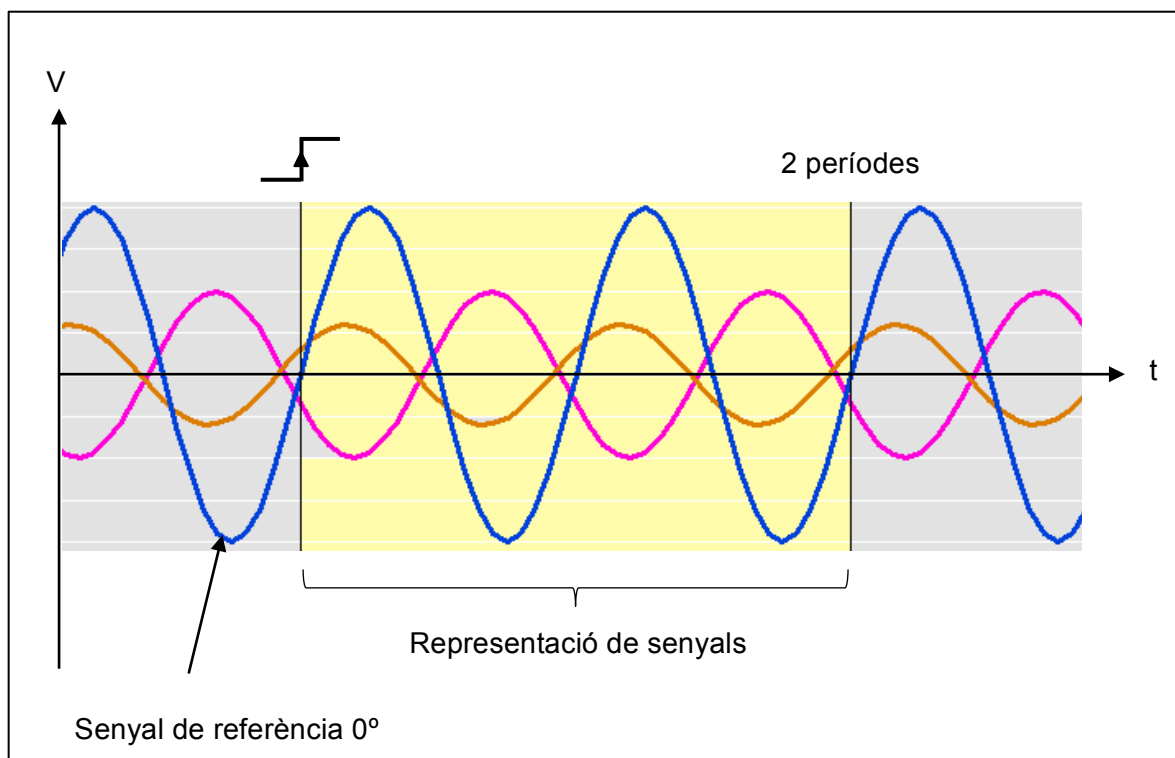


Figura 27. Representació subVI Graficar.vi

El subVI Graficar.vi realitza unes operacions imprescindibles per tal de que l'usuari pugui veure per pantalla les senyals fixes sense que es moguin contínuament. La funció que realitza aquest subVI es podria assimilar al dispar per flanc que té un oscil·loscopi convencional.

A continuació hi ha una figura que mostra aquesta representació gràfica en el panell frontal d'usuari. En aquest cas l'usuari ha escollit veure 5 períodes i la senyal de referència és V1 (color blau).

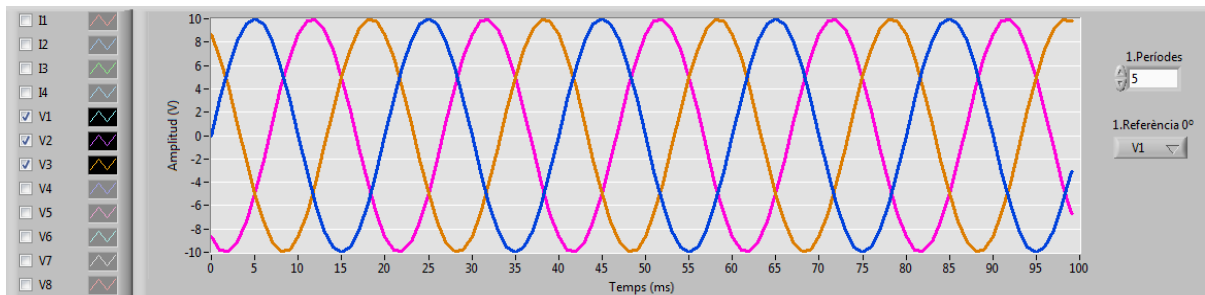


Figura 28. Representació gràfica panell d'usuari

Per a realitzar les operacions dels SubVI's que venen a continuació, s'ha fet ús de la llibreria Electrical Power Suite de LabVIEW. En concret, s'han utilitzat els següents VI's:

VI	Funció
Frequency	Determina la freqüència del senyal (o senyals) d'entrada
RMS	Determina el valor eficaç del senyal (o senyals) d'entrada
Fundamental Vector	Determina mòdul i fase del senyal (o senyals) d'entrada respecte una referència
Power	Determina la potència elèctrica d'una tensió i una intensitat

Taula 7. VI's de la llibreria Electrical Power Suite utilitzats

Seguint l'ordre de l'organigrama, es procedeix a fer el càlcul de potències elèctriques (subVI Potències.vi). Aquest càlculs han estat realitzats amb el Power.VI de la llibreria prèviament descrita.

Pel que fa a les potències monofàsiques l'usuari ha d'escollir quina tensió i intensitat vol utilitzar per fer el càlcul de la potència i es mostrarà per pantalla la potència activa, reactiva, aparent i factor de potència. Si es vol calcular potències trifàsiques s'han de fer les connexions corresponent al mètode Aron. A continuació s'explica en què es basa el mètode i com es determina la potència trifàsica del sistema.

El mètode Aron és un sistema basat en dos wattímetres que té com a objectiu determinar la potència elèctrica trifàsica desenvolupada en un sistema trifàsic tant equilibrat com desequilibrat. a figura següent mostra com s'han de connectar els dos wattímetres per tal de poder-ne determinar la potència mitjançant Aron.

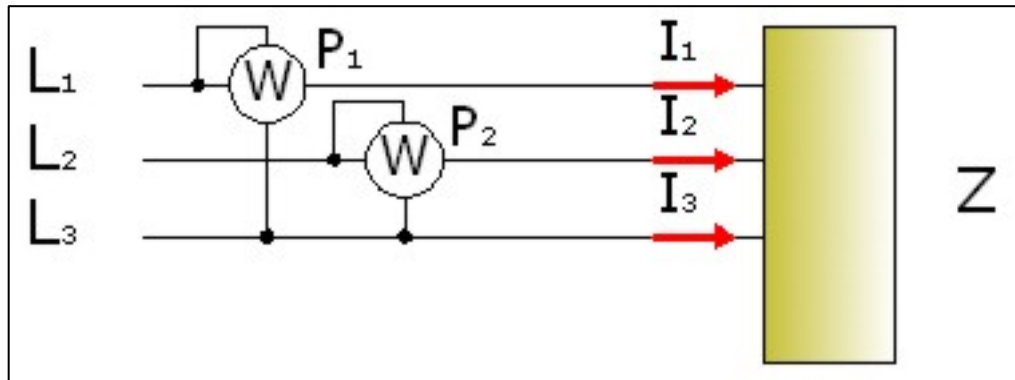


Figura 29. Wattímetres del mètode Aron

Veiem com els dos wattímetres mesuren tensió i intensitat de les dues primeres línies i agafen la línia restant com a referència. Seguint aquesta connexió, es pot determinar la potència activa i reactiva trifàsica del sistema amb les següents expressions:

$$P_{III} = P_1 + P_2 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Q_{III} = \sqrt{3} \cdot (P_1 - P_2) \quad (\text{Eq. 2})$$

Un cop determinades la potència activa i reactiva es pot trobar la resta de variables d'interès, com la potència aparent i el factor de potència mitjançant les següents expressions:

$$S_{III} = \sqrt{P_{III}^2 + Q_{III}^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$fdp = \frac{P_{III}}{S_{III}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Per determinar la potència d'un sistema trifàsic amb l'estació de mesura es seguirà el mateix mètode Aron. Per tant, es requerirà a l'usuari que entri dues tensions i dues intensitats tals que permetin realitzar els càlculs prèviament descrits.

A continuació hi ha una figura on es mostra com s'han de connectar les mesures V1, V2, I1 i I2 de l'estació de mesures per a que el programa pugui aplicar el mètode Aron correctament.

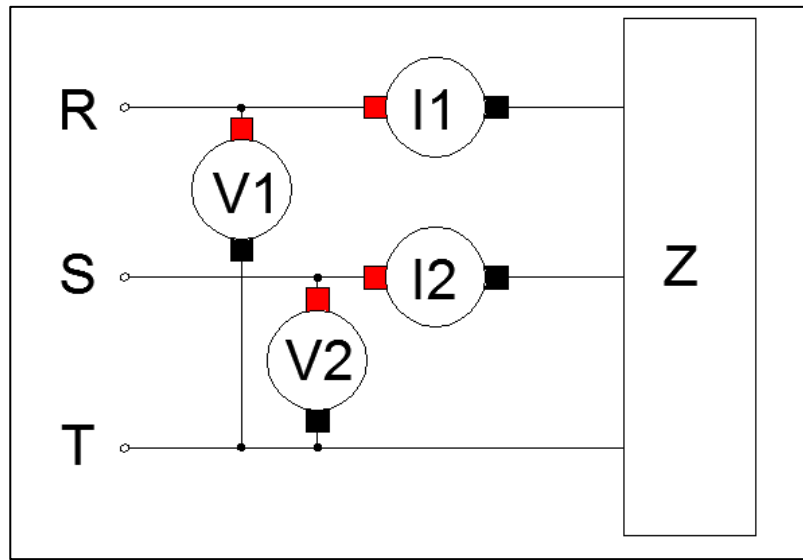


Figura 30. Connexions necessàries en l'estació de mesures

D'aquesta manera, seguint amb les expressions anterior es pot utilitzar la llibreria Electrical Power Suite de LabVIEW es determinaria la potència monofàsica de cada branca. Les expressions de potència serien les següents:

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$P_2 = V_2 \cdot I_2 \quad (\text{Eq. 6})$$

I un cop obtinguts aquests valors de P_1 i P_2 ja es podrien utilitzar les expressions anterior per determinar la potència trifàsica del sistema analitzat.

A continuació hi ha una figura on es mostra la interfície d'usuari corresponent al càlcul de potències. Es mostra un exemple de càlcul de potència monofàsica on l'usuari escull tensió i

intensitat i també es mostra un exemple de càlcul de potència trifàsica, on l'usuari ha de realitzar la connexió Aron tal com s'indica.

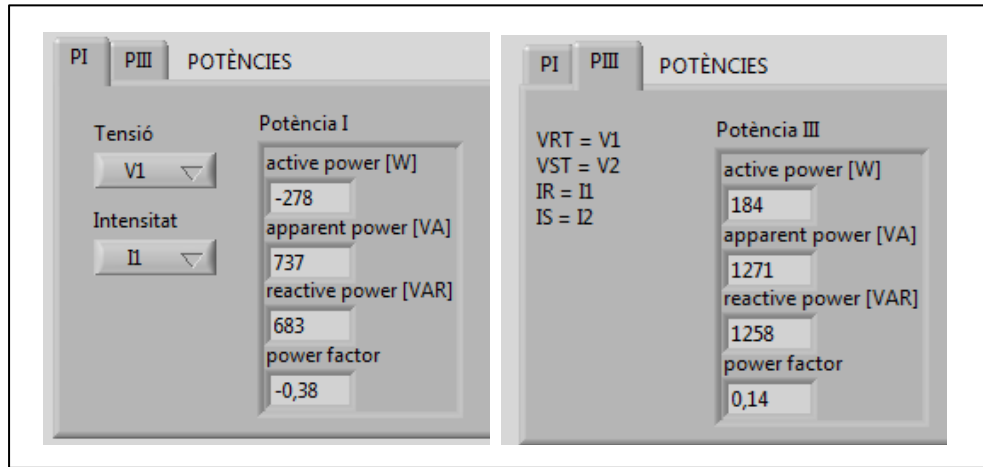


Figura 31. Interfície de càlcul de potència elèctrica

Pel que fa als càlculs realitzats en el subprograma *Calculs.vi*, bàsicament s'utilitzen els VI's *Frequency* i *Fundamental Vector* de la llibreria *Power Electronics* per determinar la freqüència de cada mesura, el mòdul i la seva fase respecte a una mesura de referència (fase 0°) que pot escollir l'usuari. Els resultats d'aquests càlculs es mostren en la interfície d'usuari en format de taula i en un diagrama polar tal com es veu en la següent figura.

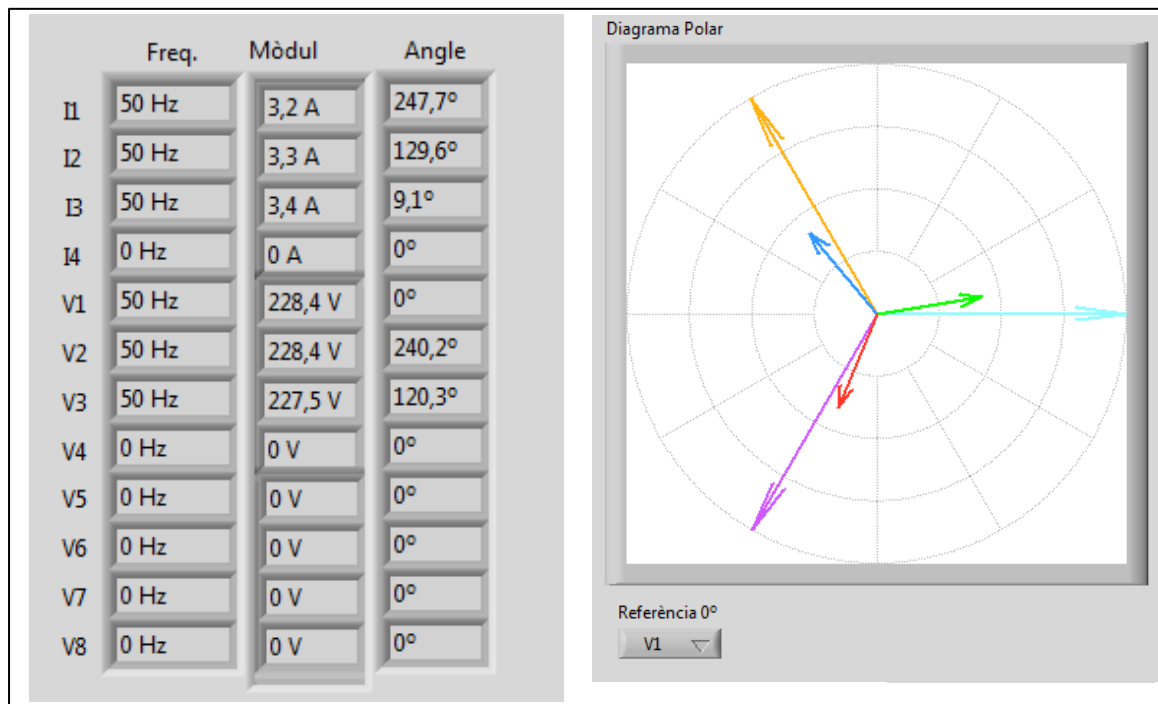


Figura 32. Interfície de la representació polar

Per últim, l'usuari pot guardar les mesures durant un temps determinat en un arxiu de text tot utilitzant el subVI Enregistrar.vi. A continuació es mostra la finestra de la interfície que permet realitzar aquesta funció.

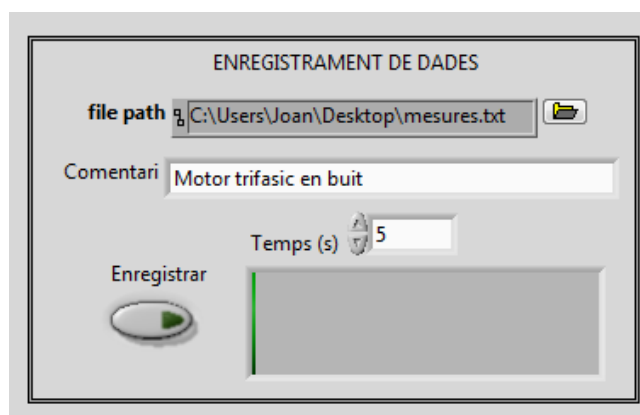


Figura 33. Interfície d'enregistrament de dades

L'arxiu de text resultant conté un capçal amb informació rellevant de l'adquisició, com el títol, la data i hora i els guanys de tensió i intensitat corresponents. A continuació hi ha un exemple d'arxiu de text on s'han enregistrat diverses mesures durant un període de temps determinat.

Motor trifasic en buit												
Data: 17/06/2015			Hora: 12:42									
Guany V= 32,526912			Guany I= 1,131371									
I1	I2	I3	I4	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	
-3,431	-0,219	-0,031	0,001	-1,005	-8,894	-0,006	-0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
-3,302	-0,383	-0,029	0,004	-0,386	-8,639	-0,005	0,001	0,002	0,002	0,002	0,003	
-3,181	-0,591	-0,033	0,006	0,215	-8,378	-0,007	-0,004	0,002	0,003	0,002	0,002	
-3,050	-0,833	-0,033	0,005	0,809	-8,090	-0,008	-0,000	0,002	0,003	0,002	0,002	
-2,866	-1,115	-0,031	0,004	1,412	-7,762	-0,004	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	
-2,660	-1,386	-0,027	0,004	2,006	-7,412	-0,004	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
-2,393	-1,642	-0,031	0,004	2,598	-7,030	-0,006	-0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	
-2,141	-1,919	-0,030	0,002	3,204	-6,622	-0,003	-0,001	0,002	0,002	0,002	0,003	
-1,905	-2,171	-0,033	0,006	3,787	-6,171	-0,005	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003	
-1,696	-2,445	-0,032	0,005	4,359	-5,681	-0,009	-0,001	0,002	0,003	0,002	0,003	
-1,494	-2,703	-0,029	0,003	4,925	-5,146	-0,007	-0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	
-1,257	-2,988	-0,029	0,003	5,469	-4,580	-0,005	0,000	0,002	0,003	0,003	0,003	
-0,988	-3,224	-0,033	0,005	5,978	-3,975	-0,006	-0,001	0,002	0,003	0,003	0,002	
-0,638	-3,472	-0,029	0,003	6,451	-3,357	-0,005	-0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	
-0,342	-3,666	-0,028	0,002	6,890	-2,699	-0,006	-0,001	0,002	0,003	0,002	0,003	
-0,097	-3,771	-0,030	0,004	7,287	-2,039	-0,008	0,001	0,003	0,003	0,003	0,002	
0,048	-3,793	-0,033	0,006	7,669	-1,386	-0,007	-0,000	0,002	0,003	0,003	0,002	
0,185	-3,801	-0,030	0,003	8,047	-0,746	-0,007	-0,003	0,003	0,002	0,002	0,003	
0,331	-3,837	-0,029	0,004	8,411	-0,130	-0,006	-0,001	0,002	0,002	0,002	0,003	
0,545	-3,886	-0,031	0,006	8,743	0,473	-0,007	-0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	
0,834	-3,992	-0,033	0,004	9,042	1,070	-0,007	-0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	
1,122	-4,085	-0,032	0,003	9,313	1,665	-0,009	-0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	
1,389	-4,134	-0,030	0,004	9,563	2,255	-0,006	-0,000	0,002	0,002	0,003	0,003	

Figura 34. Exemple d'arxiu de text generat

5 EXEMPLE PRÀCTIC DE L'ESTACIÓ DE MESURA

En aquest capítol es descriurà un exemple pràctic realitzat amb l'estació de mesura per tal de provar la seva funcionalitat i comprovar la fiabilitat dels resultats obtinguts.

S'ha alimentat a 230V trifàsics un motor d'inducció del laboratori. A continuació, es mostren les característiques principals del motor.


	Marca i model	ASEA MBT 132 SC
	Tipus	Motor d'inducció trifàsic
	Potència	6,2 kW
	Velocitat nominal	1450 rpm
	Tensió nominal	230 V/400 V
	Intensitat nominal	16,5 A/14,2 A
	Factor de potència	0,85
	Protecció	IP55

Figura 35. Motor trifàsic de test

L'objectiu és determinar els paràmetres del motor quan es troba funcionant en buit. Es vol obtenir les intensitats (mòdul i fase) i la potència trifàsica que desenvolupa el motor. Llavors es compararan els resultats obtinguts mitjançant l'estació amb les lectures dels elements de mesura del laboratori per tal de comprovar els resultats i determinar la precisió que ofereix l'estació de mesura.

Es mesuren les tres tensions d'alimentació amb els punts de mesura V1, V2 i V3 i es mesuren les tres intensitats de línia del motor amb els punts de mesura I1, I2 i I3. En les mesures V4 i I4 no s'introdueix cap senyal.

A continuació es mostren els valors de freqüència, mòdul i fase obtinguts amb l'aplicació.

	Freq.	Mòdul	Angle
I1	50 Hz	3,2 A	247,7°
I2	50 Hz	3,3 A	129,6°
I3	50 Hz	3,4 A	9,1°
I4	0 Hz	0 A	0°
V1	50 Hz	228,4 V	0°
V2	50 Hz	228,4 V	240,2°
V3	50 Hz	227,5 V	120,3°
V4	0 Hz	0 V	0°

Figura 36. Valors obtinguts

El diagrama polar obtingut en el panell frontal d'usuari és el següent.

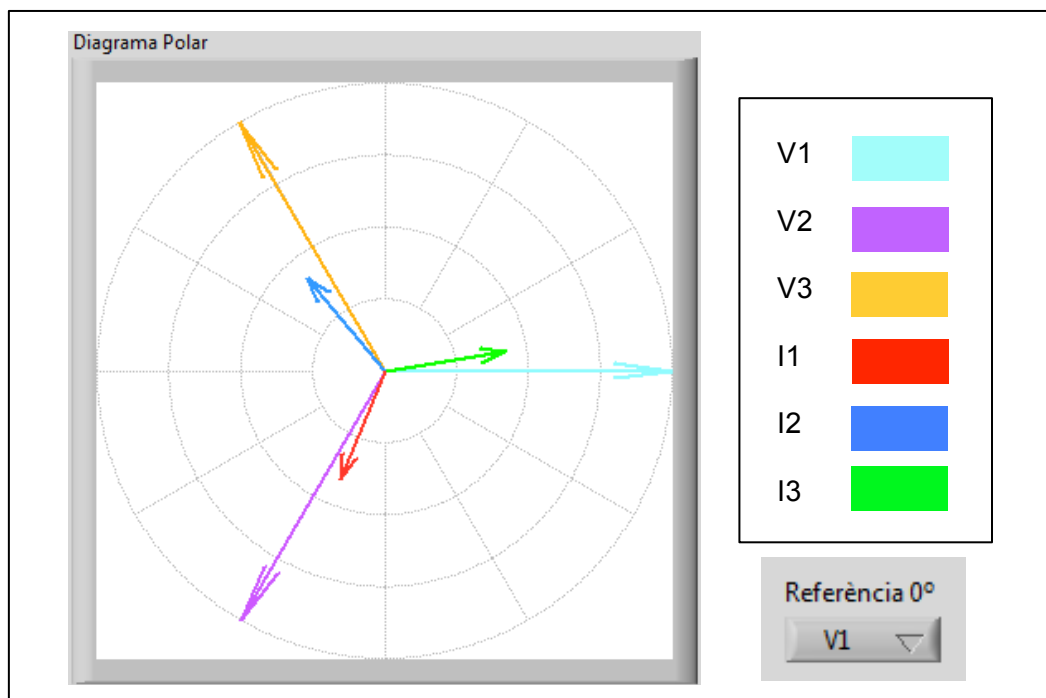


Figura 37. Representació polar de mesures

Per determinar la potència elèctrica trifàsica que desenvolupa el motor, cal realitzar les connexions per poder aplicar el mètode Aron.

En la següent figura es mostren les connexions i els resultats obtinguts amb l'aplicació.

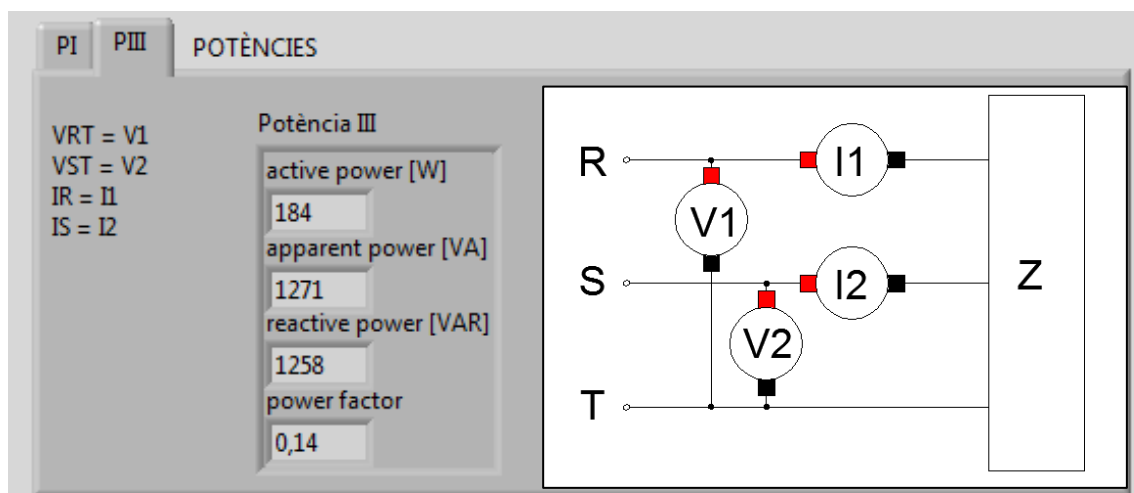


Figura 38. Interfície LabVIEW de potència elèctrica

Veiem com la potència activa en buit és bastant baixa (184 W) en comparació amb la reactiva (1271 VAR). Això implica un factor de potència molt baix (0,14). Aquests resultats de potència s'ajusten als resultats esperats d'un motor funcionant sense càrrega.

Per comprovar la fiabilitat de l'estació, s'han utilitzat els instruments de mesura d'un dels bancs de laboratori i s'han mesurat les mateixes magnituds que amb l'estació. Els resultats obtinguts es troben resumits en la següent taula.

Magnitud	Estació de mesures	Banc del laboratori
Tensió de línia	228 V	230 V
Intensitat de línia	3,3 A	3,4 A
Potència activa trifàsica	184 W	198 W
Potència reactiva trifàsica	1271 VAR	1260 VAR

Taula 8. Comparativa de resultats obtinguts

La taula comparativa anterior permet concloure que l'estació de mesures dissenyada en aquest projecte ofereix un resultats fiables i ajustats a la realitat.

6 FUNCIONAMENT DEL MOTOR BRUSHLESS DC O TRAPEZOÏDAL

Amb el nom de motors brushless s'anomenen els motors síncrons d'imants permanents alimentats amb un circuit electrònic i controlats per diferents tècniques. En els anomenats motors brushless DC o trapezoïdals la tècnica de control consisteix en una commutació electrònica de les bobines del debanat d'induït similar a la commutació electromecànica que es realitza en els motors de corrent continu. En els motors anomenats brushless sinusoidal s'utilitzen tècniques de control vectorial. L'objecte d'aquesta aplicació és poder variar la velocitat d'un motor brushless DC o trapezoïdal. Aquest tipus de motor s'ha convertit en una alternativa al motor de corrent continu per a assolir una bona resposta dinàmica sense els problemes del col·lector de delgues i escobretes que tenen els motors de corrent continu.

L'estructura del motor brushless trapezoïdal és segons s'indica en la següent figura.

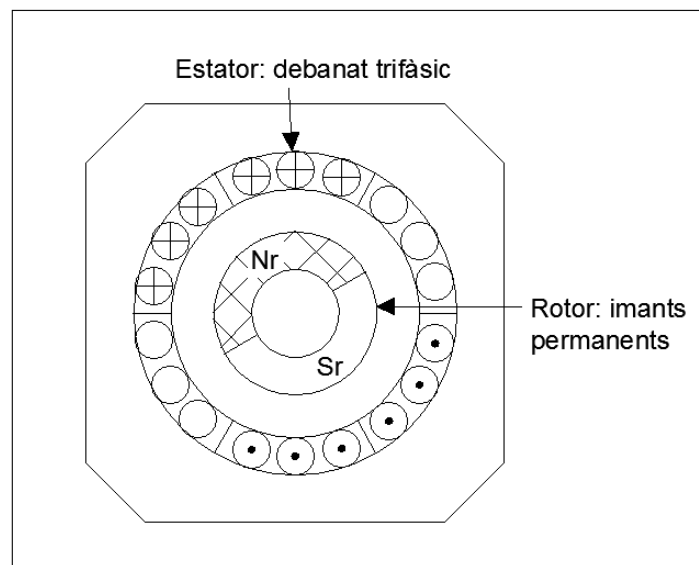


Figura 39. Composició interna del brushless trapezoïdal

El nom de “motor brushless trapezoïdal” prové de la forma de les forces electromotrius induïdes en els debanats. En efecte, si fem treballar el motor brushless com generador i observem en l'oscil·loscopi la forma d'ona de les tensions generades, veurem que tenen la forma típica d'un trapezi.

Aquesta forma d'ona de les f.e.m.'s induïdes és degut a la forma constructiva dels debanats i de la forma dels imants permanents del rotor.

L'etapa de potència del motor brushless consta de tres branques de semiconductors de potència que permeten fer circular intensitat per cada una de les fases del motor (A, B i C) en els dos sentits. D'aquesta manera, segons les fases alimentades i el sentit del corrent, s'obté un camp magnètic d'estator en una determinada posició. L'objectiu és generar en tot moment un camp magnètic d'estator situat a 90° elèctrics del camp magnètic de rotor generat pels imants permanents aconseguint així fer girar el rotor.

A continuació hi ha una figura de l'etapa de potència del motor brushless.

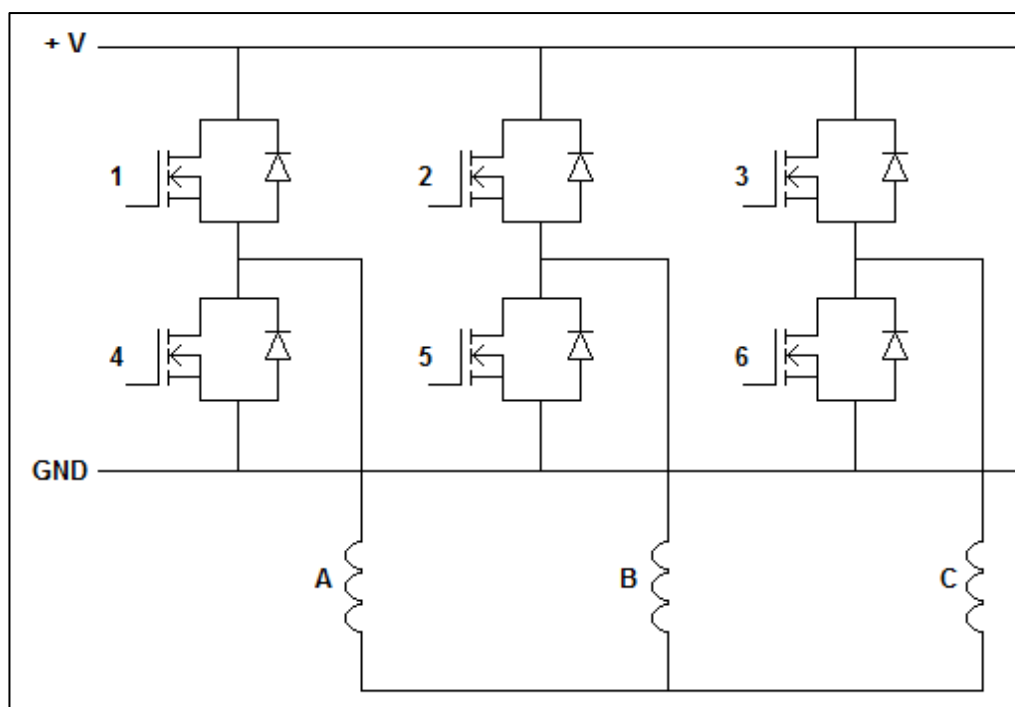


Figura 40. Etapa de potència

El motor brushless d'aquest projecte és un motor de 4 pols amb imants permanents en el rotor cobrint cada pol un arc de 180° elèctrics (90° geomètrics). Tanmateix, per fer més entenedora l'explicació teòrica del funcionament d'aquest tipus de motors en l'explicació que segueix hem considerat un motor de 2 pols.

En aquest tipus de motor hem d'alimentar en cada instant els bobinats de dues fases del l'estator a fi de obtenir una "capa de corrent que entra: \oplus " que cobreixi 120° i una "capa de corrent que surt: \ominus " que cobreixi 120° .

A continuació es veu com s'ha d'alimentar l'estator del motor per poder fer-lo girar en un sentit de gir horari.

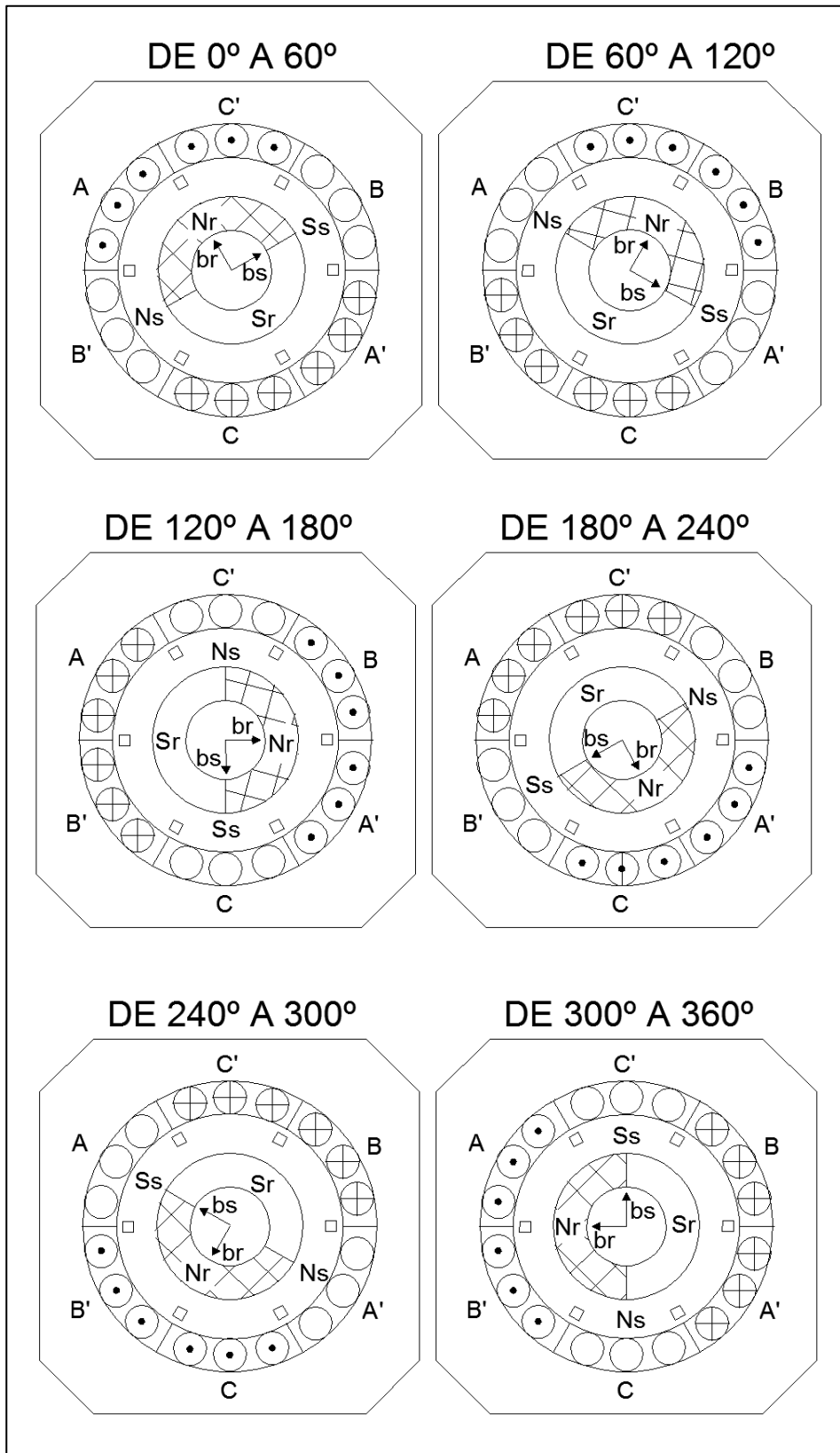


Figura 41. Motor sentit de gir horari

Per saber la posició del rotor en tot moment s'utilitzen tres sensors hall distribuïts uniformement al voltant de l'eix de rotació. Amb la informació d'aquests tres sensors, es pot determinar en quin rang de graus en troba el rotor i per tant es pot saber com s'han d'alimentar els MOSFETS de cada branca per seguir la rotació del motor. La taula següent indica la posició del rotor segons la combinació dels sensors hall.

Posició rotor	0-60°	60-120°	120-180°	180-240°	240-300°	300-360°
Hall 1	0	0	1	1	1	0
Hall 2	1	1	1	0	0	0
Hall 3	1	0	0	0	1	1

Taula 9. Posició del rotor segons halls

A continuació hi ha una taula que resumeix totes les senyals corresponents a la rotació del motor brushless en sentit horari.

SENTIT DE GIR HORARI						
Posició rotor	120-180°	180-240°	240-300°	300-360°	0-60°	60-120°
Hall 1	1	1	1	0	0	0
Hall 2	1	0	0	0	1	1
Hall 3	0	0	1	1	1	0
Mosfet 1	0	1	1	0	0	0
Mosfet 2	1	0	0	0	0	1
Mosfet 3	0	0	0	1	1	0
Mosfet 4	0	0	0	0	1	1
Mosfet 5	0	0	1	1	0	0
Mosfet 6	1	1	0	0	0	0
Fase A	0	+1	+1	0	-1	-1
Fase B	+1	0	-1	-1	0	+1
Fase C	-1	-1	0	+1	+1	0

Taula 10. Taula lògica sentit de gir horari

Es pot comprovar com cada columna de posició de rotor es correspon amb la figura anterior en quant a alimentació de les fases de l'estator. D'aquesta manera s'aconsegueix fer girar el motor brushless en un sentit de gir horari.

Si es vol fer girar el motor en sentit contrari (sentit antihorari), caldrà alimentar les fases de l'estator de forma diferent per cada posició del rotor.

A continuació es veu com s'ha d'alimentar l'estator del motor per poder fer-lo girar en un sentit de gir antihorari.

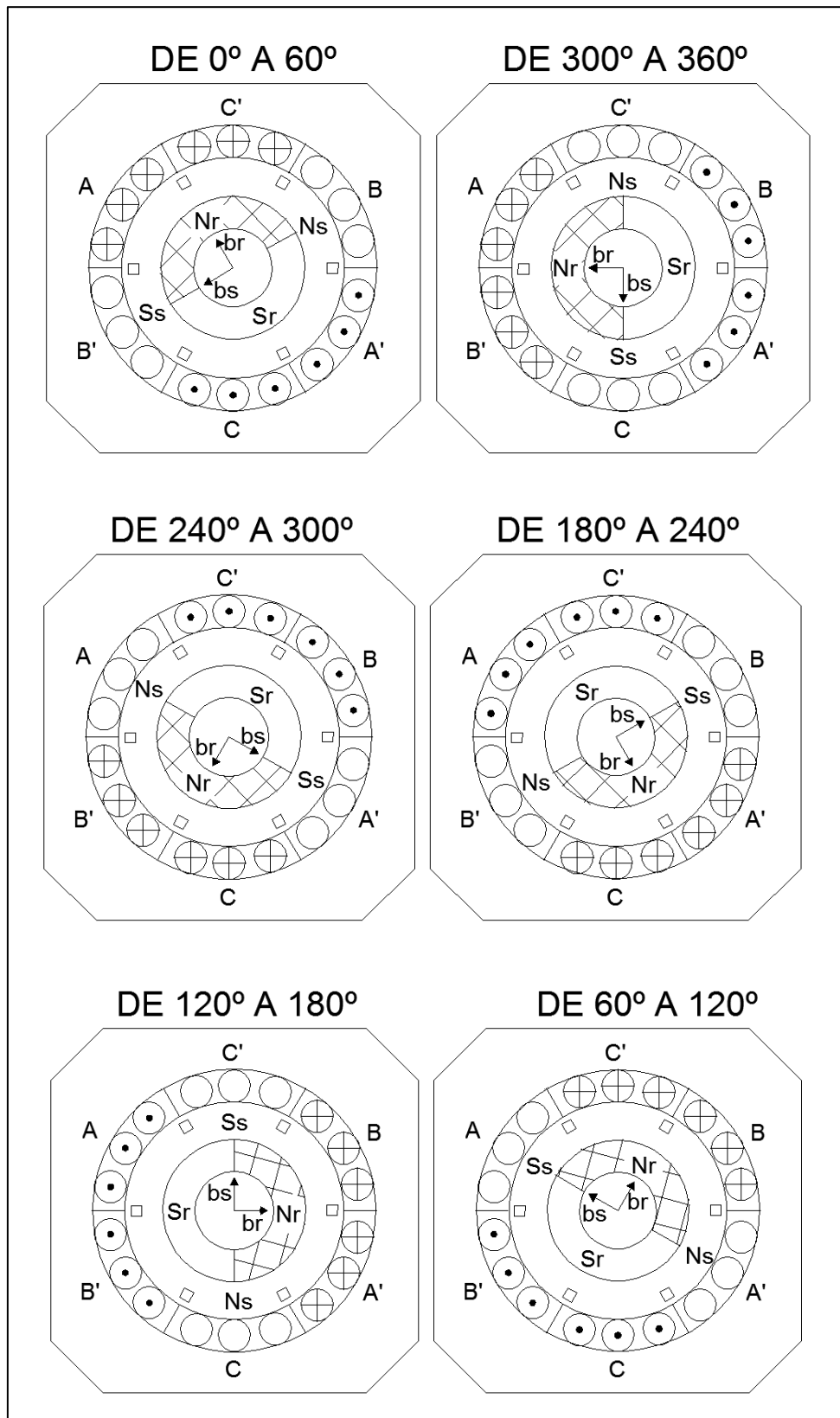


Figura 42. Motor sentit de gir antihorari

A continuació hi ha una taula que resumeix totes les senyals corresponents a la rotació del motor brushless en sentit antihorari.

SENTIT DE GIR ANTIHORARI						
Posició rotor	240-300°	180-240°	120-180°	60-120°	0-60°	300-360°
Hall 1	1	1	1	0	0	0
Hall 2	0	0	1	1	1	0
Hall 3	1	0	0	0	1	1
Mosfet 1	0	0	0	1	1	0
Mosfet 2	1	0	0	0	0	1
Mosfet 3	0	1	1	0	0	0
Mosfet 4	1	1	0	0	0	0
Mosfet 5	0	0	1	1	0	0
Mosfet 6	0	0	0	0	1	1
Fase A	-1	-1	0	+1	+1	0
Fase B	+1	0	-1	-1	0	+1
Fase C	0	+1	+1	0	-1	-1

Taula 11. Taula lògica sentit de gir antihorari

Mitjançant les taules anteriors, es pot deduir les equacions lògiques de cadascun dels MOSFETS en funció de les entrades dels sensors hall. En el cas del sentit de gir horari, les equacions lògiques reduïdes que resulten de les combinacions de la taula lògica són les següents.

$$M1 = H1 \cdot \overline{H2} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$M2 = H2 \cdot \overline{H3} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$M3 = \overline{H1} \cdot H3 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$M4 = \overline{H1} \cdot H2 \quad (\text{Eq. 10})$$

$$M5 = \overline{H2} \cdot H3 \quad (\text{Eq. 11})$$

$$M6 = H1 \cdot \overline{H3} \quad (\text{Eq. 12})$$

A continuació hi ha les equacions lògiques de cada MOSFET en sentit de gir antihorari.

$$M1 = \overline{H1} \cdot H2 \quad (\text{Eq. 13})$$

$$M2 = \overline{H2} \cdot H3 \quad (\text{Eq. 14})$$

$$M3 = H1 \cdot \overline{H3} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$M4 = H1 \cdot \overline{H2} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$M5 = H2 \cdot \overline{H3} \quad (\text{Eq. 17})$$

$$M6 = \overline{H1} \cdot H3 \quad (\text{Eq. 18})$$

Amb aquestes equacions lògiques el CompactRIO llegirà l'estat dels sensors hall i determinarà quins MOSFETS s'han d'alimentar en cada cas per fer girar el motor brushless en el sentit de gir escollit per l'usuari.

7 ELEMENTS DE L'ACCIONAMENT DEL MOTOR BRUSHLESS

En aquest capítol es definiran tots els elements físics que formen part de l'accionament del motor brushless i s'explicarà quin és el seu paper en el desenvolupament del mateix. Es farà una breu descripció de les característiques principals de cadascun d'ells i s'explicarà el seu funcionament.

En la següent figura es mostra com queden interconnectats els diferents elements de la instal·lació. S'indica la comunicació entre els elements i el sentit de la mateixa mitjançant fletxes.

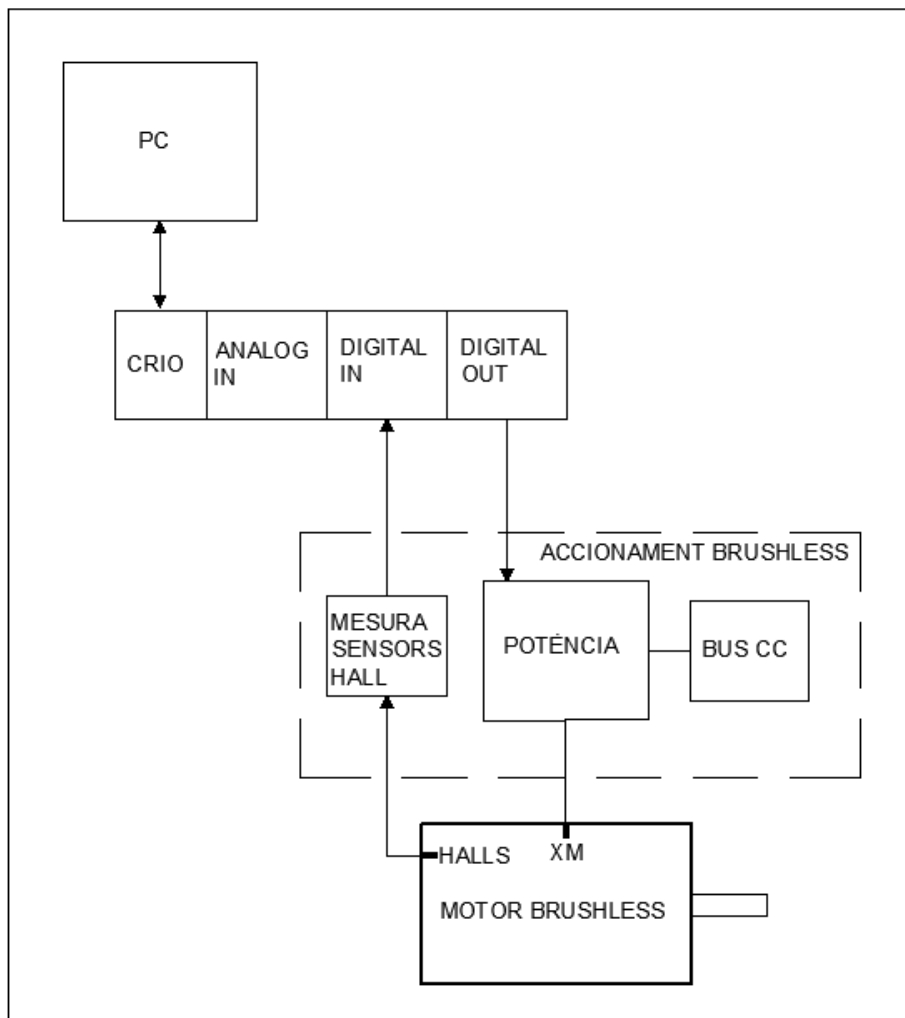


Figura 43. Etapa de potència

7.1 Motor brushless

El motor brushless és la màquina rotativa per la qual es dissenya un sistema d'accionament. L'objectiu és que l'usuari pugui variar la seva velocitat i el seu sentit de gir.

El motor brushless utilitzat en aquest projecte és de tipus trapezoïdal i té les següents característiques principals:


	Marca i model	Bardello BRL 90/1
	Tipus	Motor síncron d'imants permanents de 4 pols
	Tensió nominal	135 Vrms
	Velocitat nominal	3000 rpm
	Parell nominal	1 Nm
	Parell de pic	3 Nm
	Intensitat nominal	1,5 A
	Intensitat de pic	4,5 A

Figura 44. Motor brushless trapezoïdal

7.2 Sensors hall

Aquest tipus de transductors s'activen davant la presència d'un camp magnètic i amb una combinació de tres sensors d'aquest tipus podem determinar la posició del rotor del motor.

A continuació hi ha una figura amb les característiques principals del sensor.


	Marca i model	Thalheim D-37269
	Tipus	Sensor d'efecte Hall
	Alimentació	+15 VDC
	Protecció	IP65
	Diàmetre d'eix	10 mm

Figura 45. Sensors hall

A continuació hi ha una taula que defineix cadascuna de les senyals del connector dels sensors hall.

Pin	Color	Nom	Funció
1	Verd	Vcc	Alimentació +15V
2	Gris	H1	Sensor hall 1
3	Blanc	H2	Sensor hall 2
4	Marró	H3	Sensor hall 3
5	Groc	GND	Referència 0V
6	Negre	Malla	Malla del cable multipolar

Taula 12. Connexions dels sensors hall

Els sensors hall que incorpora el motor brushless del laboratori necessiten una alimentació de 15V per funcionar correctament (pins 1 i 5).

D'aquesta manera, quan el sensor hall 1 detecta camp magnètic tanca el seu contacte intern i connecta el seu pin 2 amb el pin 5 que és la massa. Al deixar de detectar, el pin 2 passa a ser un contacte a l'aire sense connexió a massa. Amb una electrònica associada adequada, es podrà llegir les senyals dels sensors hall amb el mòdul d'entrades digitals del CompactRIO.

7.3 Etapa de potència

L'etapa de potència està composta per sis semiconductors de potència que alimenten les 3 fases del motor brushless. Les característiques d'aquests elements són les següents:

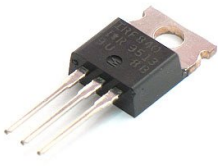
	Marca i model	Fairchild Semiconductor MOSFET IRF840
	Tipus	MOSFET de potència
	Tensió V_{DS} màxima	500 V
	Intensitat màxima I_D	8 A
	Dissipació de potència	125 W

Figura 46. MOSFET IRF840

8 MAQUINARI DE L'ACCIONAMENT DEL MOTOR BRUSHLESS

En aquest capítol es descriurà tota l'electrònica necessària per permetre l'accionament del motor brushless trapezoïdal del laboratori.

8.1 Lectura dels sensors hall

Els tres sensors hall que incorpora el motor permetran determinar quina és la posició del seu rotor en cada moment. L'etapa de condicionament de senyals ha d'adaptar la senyal lògica provinent del sensor en una senyal lògica dins els marges de lectura del mòdul d'entrades digitals del CompactRIO. Per aquesta raó, el valor lògic "1" ha de ser una tensió superior a 11V (en aquest cas és de 15V) i el valor lògic "0" ha de ser una tensió inferior a 5V (en aquest cas és de 0V).

A continuació, es mostra una de les tres etapes de condicionament del sensor hall per tal de tenir la senyal lògica dins els marges anteriorment esmentats.

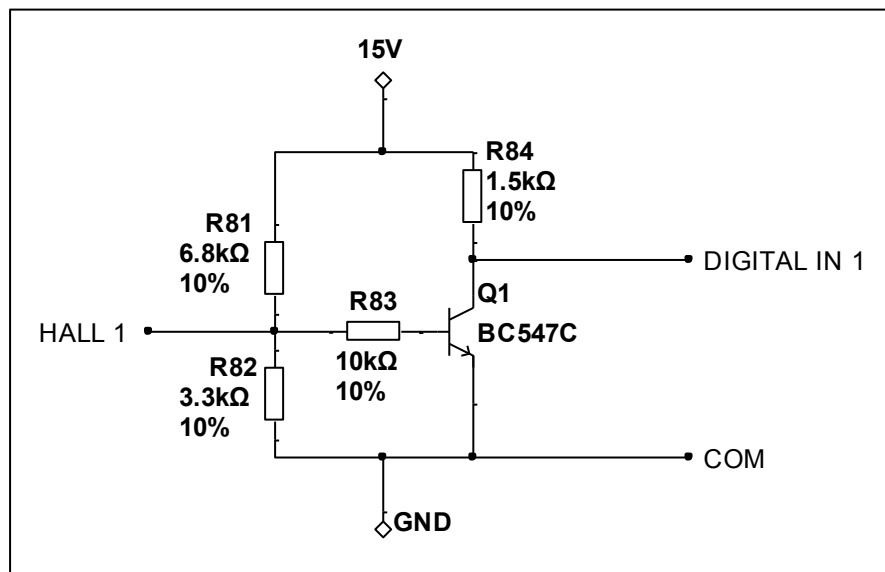


Figura 47. Etapa de condicionament del sensor hall

Cadascun dels halls es pot assimilar a un contacte que s'obre i es tanca. D'aquesta manera, quan el sensor hall 1 doni un 0 (contacte obert) el divisor de tensió provocarà que apareguin

5V en la base del transistor BC547C que es saturarà i posarà a terra l'entrada digital 1 del mòdul.

En canvi, quan el sensor hall 1 doni un 1 (contacte tancat) el punt del divisor de tensió anirà a terra (0V) i per tant a la base del transistor no hi haurà tensió, el transistor estarà tallat i a l'entrada digital 1 del CompactRIO hi haurà els 15V de la font d'alimentació.

S'ha calculat la resistència del transistor (R_{B3}) per tal de fer-lo treballar en saturació o tall (tot o res). Segons els fabricants del transistor i es sap que $\beta = 600$ i si volem que passi una intensitat de col·lector $I_C = 10$ mA, sabent les equacions següents es pot determinar el valor de la resistència.

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad (\text{Eq. 19})$$

$$V_{CC} = I_B \cdot R_4 + 0,7 \quad (\text{Eq. 20})$$

De l'equació 10 es troba que $I_B = 0,017$ mA. I llavors amb l'equació 11 es troba $R_4 = 858$ k Ω

Per saturar el transistor la resistència de base R_4 ha de ser inferior a 858 k Ω , per tant s'ha escollit una resistència de 10 k Ω .

D'aquesta manera, amb 3 circuits electrònics com l'anterior el CompactRIO pot determinar la posició del rotor en motor brushless en tot moment per saber així com ha d'alimentar l'etapa de potència per fer girar el motor.

Cal comentar que l'alimentació de 15V s'aconsegueix realitzant la font d'alimentació dins el mateix circuit de lectura dels sensors hall a partir de la tensió de xarxa de 230V.

8.2 Etapa de potència

L'etapa de potència del motor brushless ha de permetre alimentar les tres fases del motor de forma correcta en cada moment en funció de les lectures dels sensors hall. Aquesta etapa està formada per tres branques de MOSFETS que alimenten cadascuna de les fases.

A continuació es mostra l'electrònica corresponent a una de les branques de MOSFETS de l'etapa de potència.

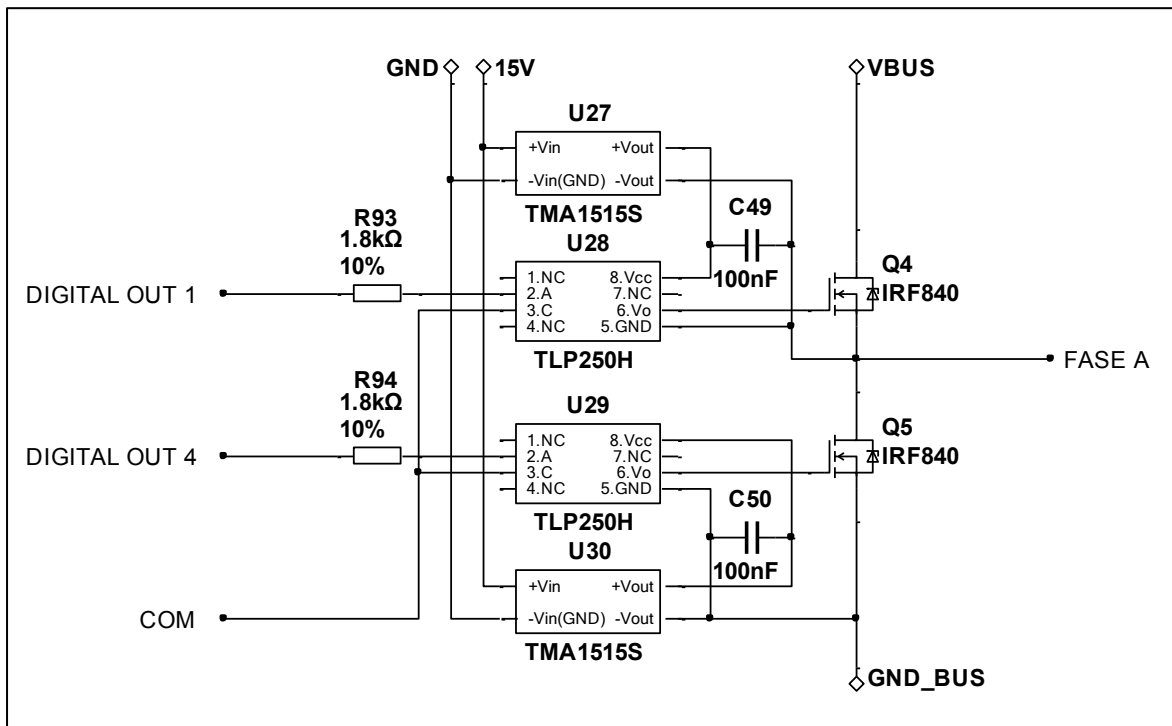


Figura 48. Branca de MOSFETS de la fase A del motor

Els MOSFETS IRF840 es troben alimentats amb el driver TLP250H. Aquest driver necessita una alimentació de 15V que prové d'un convertidor dc-dc. Aquest convertidor s'alimenta de la font de 15V que s'ha muntat a la placa mitjançant 230V eficaços. D'aquesta manera s'aconsegueix que cada MOSFET estigui alimentat amb una tensió totalment independent a la resta, mantenint un aïllament de masses essencial en aquest tipus de muntatge.

En el punt mig de cada branca s'hi connecta cadascuna de les fases del motor brushless de tal manera que mitjançant les sortides digitals del CompactRIO es pot controlar la seva alimentació.

Cal comentar que la tensió de bus de 170V DC prové d'una placa electrònica que formava part del sistema d'accionament del brushless anterior a aquest projecte. Aquesta placa va equipada amb un transformador 230V/120V de tal manera que es redueix la tensió provinent de la xarxa fins a 120V i posteriorment es rectifica per aconseguir els 170V de tensió contínua amb la qual s'alimenta el bus de l'etapa de potència.

8.3 Cablejat d'interconnexió de l'accionament del motor brushless

En aquest apartat es definiran els conductors que intercanvien informació entre el sistema d'accionament del motor brushless i el CompactRIO.

A continuació hi ha una taula que defineix cadascun dels conductors de l'alimentació de les tres fases del motor.

CONNEXIONS AL MOTOR	CABLE		CONNECTOR ALIMENTACIÓ
	PIN	CONCEPTE	COLOR
U1	FASE A	Marró	1
V1	FASE B	Blau	2
W1	FASE C	Negre	3

Taula 13. Alimentació motor brushless

També hi ha el cable que connecta la placa de lectura dels sensors hall amb el mòdul d'entrades digitals del CompactRIO. Es tracta d'un multicable de cinc conductors amb apantallament.

A continuació, hi ha una taula que defineix cadascun dels conductors d'aquest cable.

CONNECTOR HALLS	CABLE		MÒDUL DIGITAL IN	
	J39	CONCEPTE	COLOR	PIN
1	Hall 1	Groc	1	DI1
2	Hall 2	Vermell	2	DI2
3	Hall 3	Verd	3	DI3
4	Comú	Marró	9	COM

Taula 14. Connexió sensors hall – Mòdul digital IN

Per altra banda hi ha el cable que connecta les sortides digitals del CompactRIO amb la placa de potència del motor brushless. Es tracta d'un multicable de nou conductors amb apantallament.

A continuació hi ha una taula que defineix cadascun dels conductors d'aquest cable.

MÒDUL DIGITAL OUT		CABLE		CONNECTOR DB9 POTÈNCIA
PIN	NOM	CONCEPTE	COLOR	J51
19	DO3	MOSFET 3	Vermell	1
23	DO6	MOSFET 6 (PWM)	Taronja	2
17	DO2	MOSFET 2	Marró	3
1	COM	GND	Negre	4
22	DO5	MOSFET 5 (PWM)	Gris	5
-	-	-	-	6
20	DO4	MOSFET 4 (PWM)	Blau	7
1	COM	GND		8
16	DO1	MOSFET 1	Groc	9

Taula 15. Connexió Mòdul digital OUT – Etapa de potència

9 PROGRAMARI DE L'ACCIONAMENT DEL MOTOR BRUSHLESS

En aquest capítol es descriuran els programes desenvolupats en LabVIEW que conformen el projecte del sistema d'accionament del motor brushless trapezoïdal del laboratori.

Aquest projecte de LabVIEW engloba dos programes principals. Un dels programes és el Host PC.vi que es troba dins el sistema operatiu Windows de l'ordinador i és el que l'usuari executarà per iniciar el funcionament del motor. L'altre programa és l'fpga.vi que es troba dins l'entorn FPGA que ofereix el CompactRIO i s'encarregarà de la lectura i escriptura de les diverses senyals que intervenen. En la figura següent es mostra la distribució dels programes dins el projecte. Els programes principals del projecte s'han assenyalat amb una fletxa vermella.

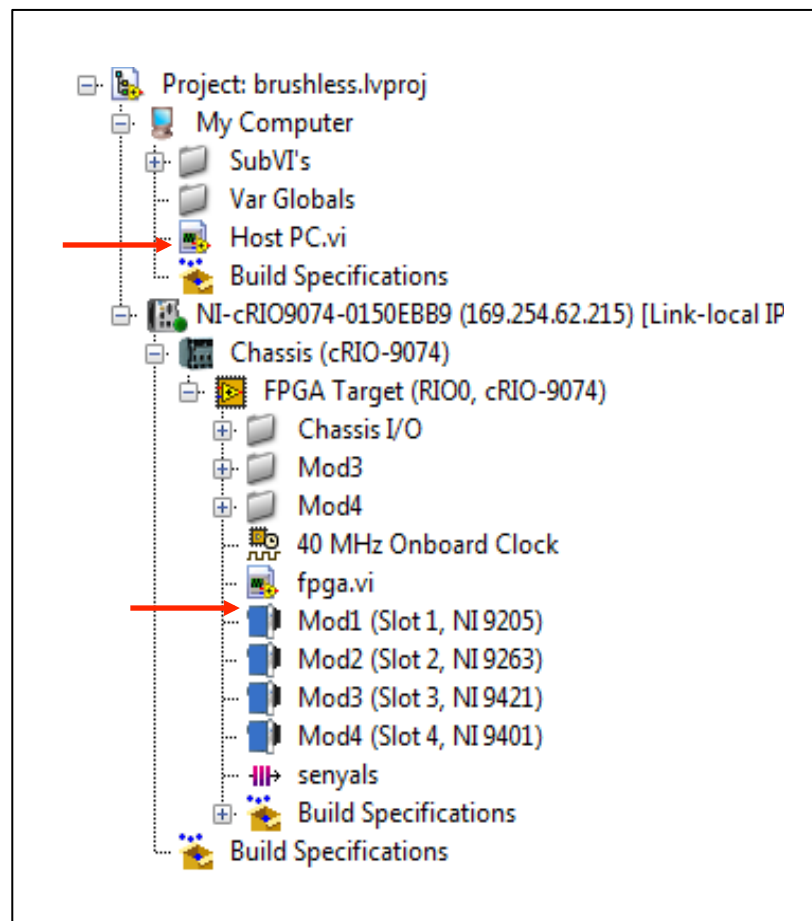


Figura 49. Projecte LabVIEW accionament del brushless

9.1 Programa FPGA

El programa realitzat en FPGA és l'encarregat de llegir la mesura dels sensors hall i determinar quins MOSFETS cal alimentar en cada moment. Per tant, bàsicament aquest programa FPGA es dedicarà a realitzar lògica combinacional. Un cop realitzats els càlculs s'enviaran els senyals digitals cap al programa principal per tal de que l'usuari pugui monitoritzar i controlar el funcionament de tot el conjunt.

Aquestes operacions lògiques es porten a terme a un ritme de 200 microsegons per cicle que correspon a una freqüència de mostreig de 5 kHz. Tenint en compte que quan el motor gira a la seva velocitat màxima s'ha estimat que els sensors hall generen una senyal inferior a 500 Hz, es pot concloure que aquest període de mostreig és suficient per realitzar l'accionament del motor brushless. Per tant, cada 200 us el programa FPGA fa una lectura de les tres entrades dels sensors hall, realitza les operacions lògiques corresponents i escriu les sortides de cada MOSFET.

Cal recordar que depenent del sentit de gir del motor brushless trapezoïdal s'hauran de realitzar unes operacions lògiques o unes altres per a cada MOSFET de l'etapa de potència del motor. Per tant, un cop s'han fet les lectures dels tres sensors hall i s'ha determinat la posició actual del rotor, s'ha de decidir quin MOSFET s'ha d'alimentar segons el sentit de gir del motor brushless escollit per l'usuari.

En paral·lel amb el cicle de programa principal, hi ha un petit codi de programa que genera una senyal PWM. Aquesta senyal serà afegida en les senyals lògiques que alimentaran els MOSFETS de les branques inferiors: M4, M5 i M6 per tal de que es pugui variar la tensió en borns del motor i permetre així que l'usuari pugui variar la velocitat de rotació del motor brushless actuant sobre el Duty Cycle de la senyal PWM generada.

Les sis senyals lògiques que intervenen en aquest programa FPGA (H1, H2, H3, M1, M2, M3, M4, M5 i M6) seran enviades al programa principal a on l'usuari tindrà accés per tal de visualitzar-ne el seu estat.

L'organigrama general del programa FPGA es mostra continuació.

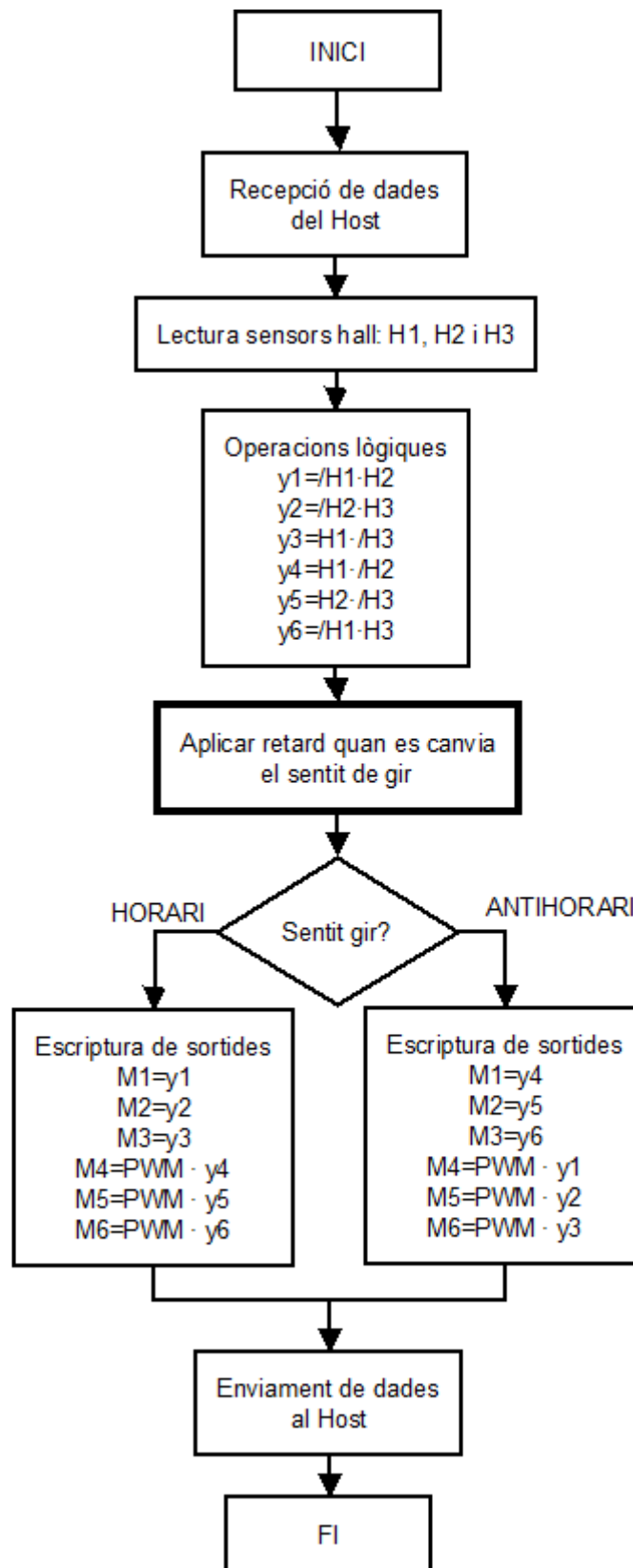


Figura 50. Organigrama programa FPGA

El primer pas a realitzar és rebre les dades provinents del programa principal. Aquestes dades són: període de mostreig (us), retard (cicles), Duty Cycle del PWM i sentit de gir del motor.

Llavors el programa procedeix a llegir els valors lògics dels tres sensors hall. Amb aquesta valors lògics es pot determinar totes les combinacions de valors que intervenen en la taula lògica definida en l'apartat 6. Funcionament del motor brushless. Aquests resultats es guarden en una variable intermèdia "y". Depenent del sentit de gir escollit per l'usuari, la sortida de cada MOSFET (M1...M6) rebrà una combinació lògica o una altra per tal de fer girar el motor en el sentit desitjat.

Cal destacar que els MOSFETS M4, M5 i M6 reben la seva corresponent sortida amb PWM afegit. De tal manera que si la seva sortida té un valor lògic de "1" l'FPGA genera un senyal PWM i l'afegeix a la sortida en qüestió.

Un cop fetes totes les operacions, s'envien les nou senyals lògiques (H1, H2, H3, M1, M2, M3, M4, M5 i M6) cap al programa principal mitjançant una memòria FIFO. D'aquesta manera l'usuari podrà veure en la interfície principal del programa la representació lògica de els diversos senyals que intervenen en l'accionament del motor i com evolucionen al llarg del temps.

En l'organigrama anterior corresponent al funcionament general del programa FPGA hi ha un bloc anomenat "Aplicar retard quan es canvia el sentit de gir". Aquest bloc, com el seu nom indica, detecta quan l'usuari canvia el sentit de gir del motor (flanc de pujada o de baixada en l'interruptor per escollir en sentit de gir del motor) i posa a zero durant un temps determinat els sis MOSFETS de sortida.

Cal recordar que quan es deixa d'alimentar un MOSFET aquest es manté conduint durant uns instants de temps més (fins que la seva intensitat no baixa per sota de la intensitat de manteniment), per tant és necessari aplicar un temps prudencial de retard al canviar de sentit per evitar que dos MOSFETS de la mateixa branca es trobin conduint a la vegada i es provoqui un curtcircuit franc al bus de corrent continu.

Tenint en compte la naturalesa del MOSFET IRF840 i que no és necessari realitzar canvis de sentit bruscos, s'ha decidit posar un temps de retard per defecte de 40 ms.

A continuació hi ha l'organigrama corresponent al bloc del retard al canviar de sentit de gir que es troba en l'organigrama principal del programa FPGA.

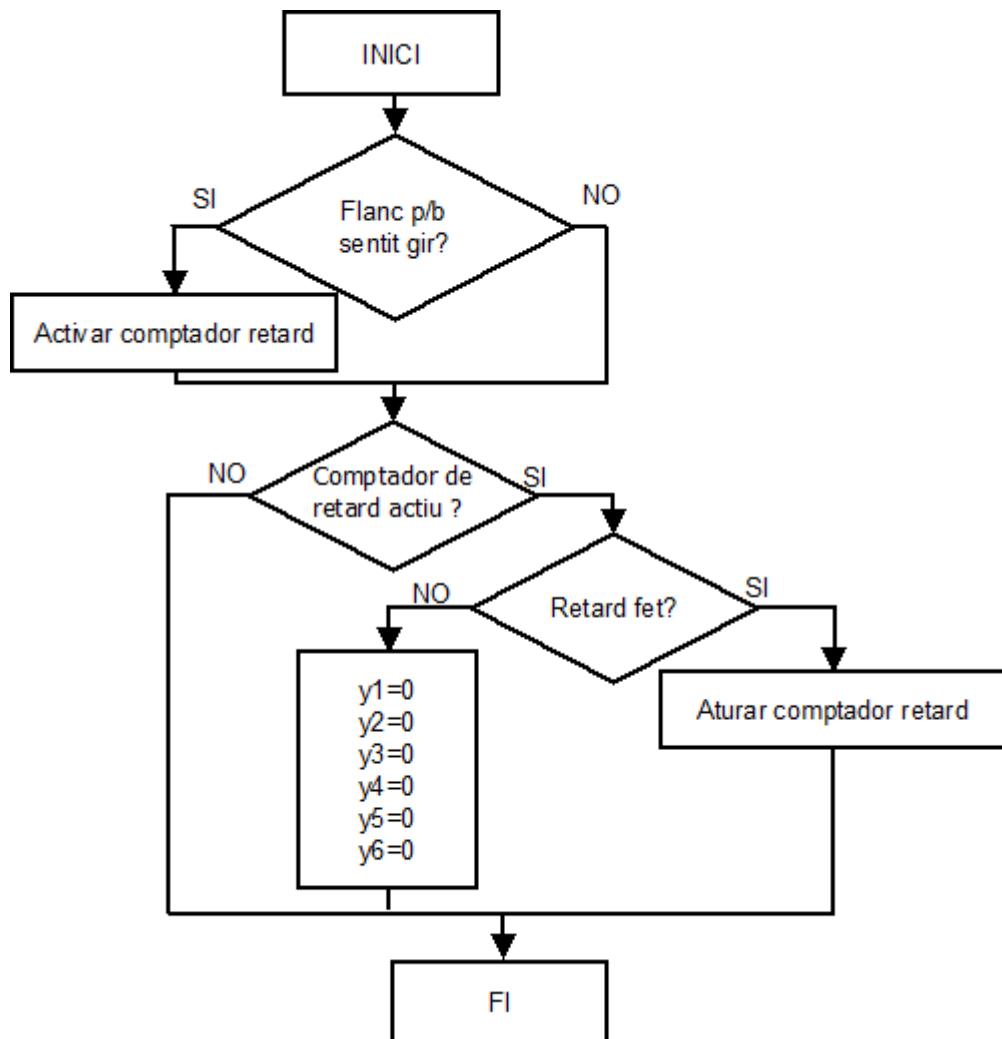


Figura 51. Organigrama retard al canviar de sentit de gir

Veiem com durant el temps de retard es posa a zero les sis variables que anteriorment s'hi havia emmagatzemat les combinacions lògiques de cada MOSFET segons l'estat dels sensors hall. D'aquesta manera, s'assegura que durant el retard els sis MOSFETS estaran inactius.

Tenint en compte que el retard per defecte és de 40 ms i que el temps d'execució del programa és de 200 us, es pot determinar que en canviar de sentit de gir, durant els 200 cicles posteriors d'execució del programa l'etapa de potència del motor estarà inactiva.

A continuació es mostra una figura amb la part de codi on es realitzen les operacions lògiques amb les entrades dels sensors hall per disposar de les sis combinacions presents en la taula lògica de l'accionament.

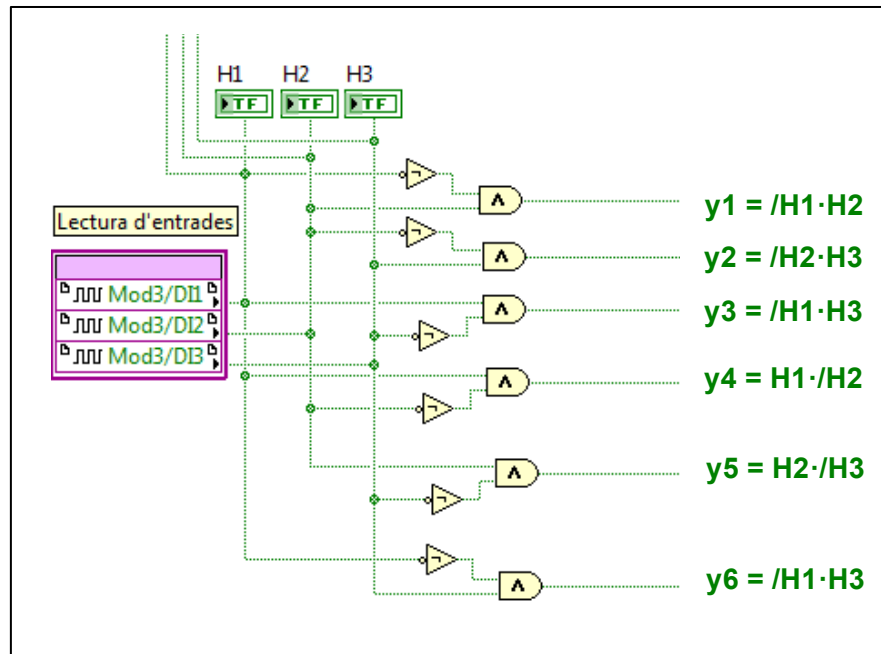


Figura 52. Combinacions lògiques

Pel que fa a l'enviament de dades cap al programa principal (Host PC.vi) s'ha creat un array lògic amb les nou dades d'interès i s'ha utilitzat una memòria FIFO per transmetre aquestes dades cap al programa principal. A continuació hi ha una figura on es mostra l'enviament.

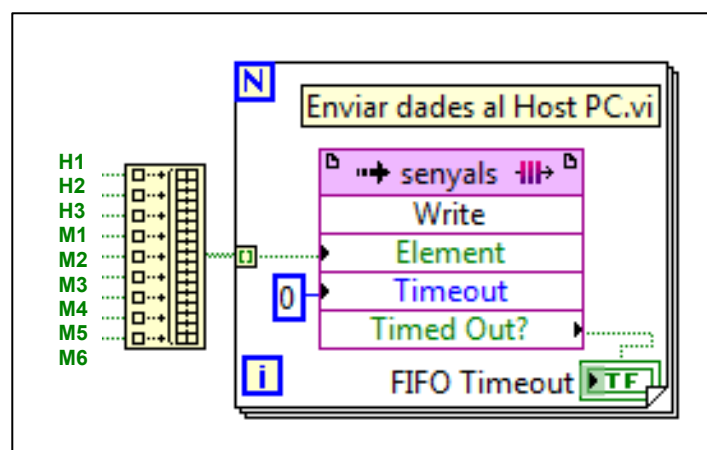


Figura 53. Enviament de dades al Host PC

Un cop el programa ha estat compilat amb èxit per part de les eines de compilació Xilinx, cal analitzar els informes per tal de determinar si l'ús de recursos que es fa de l'FPGA és coherent.

Reports			
Final device utilization (map)			
Device Utilization	Used	Total	Percent
Slice Registers	2453	40960	6,0
Slice LUTs	3331	40960	8,1
Mult18X18s	4	40	10,0
Block RAMs	1	40	2,5

Figura 54. Informe de recursos utilitzats

En la figura anterior es pot veure com tots els recursos utilitzats per implementar el programa en FPGA són inferiors als recursos totals de què disposa l'FPGA, per tant en principi, en aquest aspecte, el programa compleix amb les limitacions del sistema. Els percentatges d'ús de cada recurs indiquen que el programa FPGA encara permet futures ampliacions del codi de programació sense tenir problemes de recursos.

Pel que fa als temps d'execució, en la figura següent es poden veure les freqüències en MHz utilitzades i es pot comprovar com sempre són inferiors a les freqüències màximes de funcionament.

Reports		
Final timing (place and route)		
Clocks	Requested (MHz)	Maximum (MHz)
MiteClk (Used by non-diagram components)	33,00	64,52
40 MHz Onboard Clock	40,00	55,81

Figura 55. Informe de les freqüències de funcionament

Un cop analitzada la informació del compilador, es pot dir que el programa s'ajusta de forma coherent als recursos de què disposa l'FPGA i deixa recursos suficients per a possibles ampliacions en el sistema d'accionament del motor brushless.

9.2 Programa principal

El programa principal (Host PC.vi) executat dins el sistema operatiu Windows del propi ordinador és a on l'usuari tindrà accés al sistema d'accionament del motor brushless i on es podran visualitzar totes les variables d'interès.

A continuació hi ha una figura del panell frontal d'aquest programa.

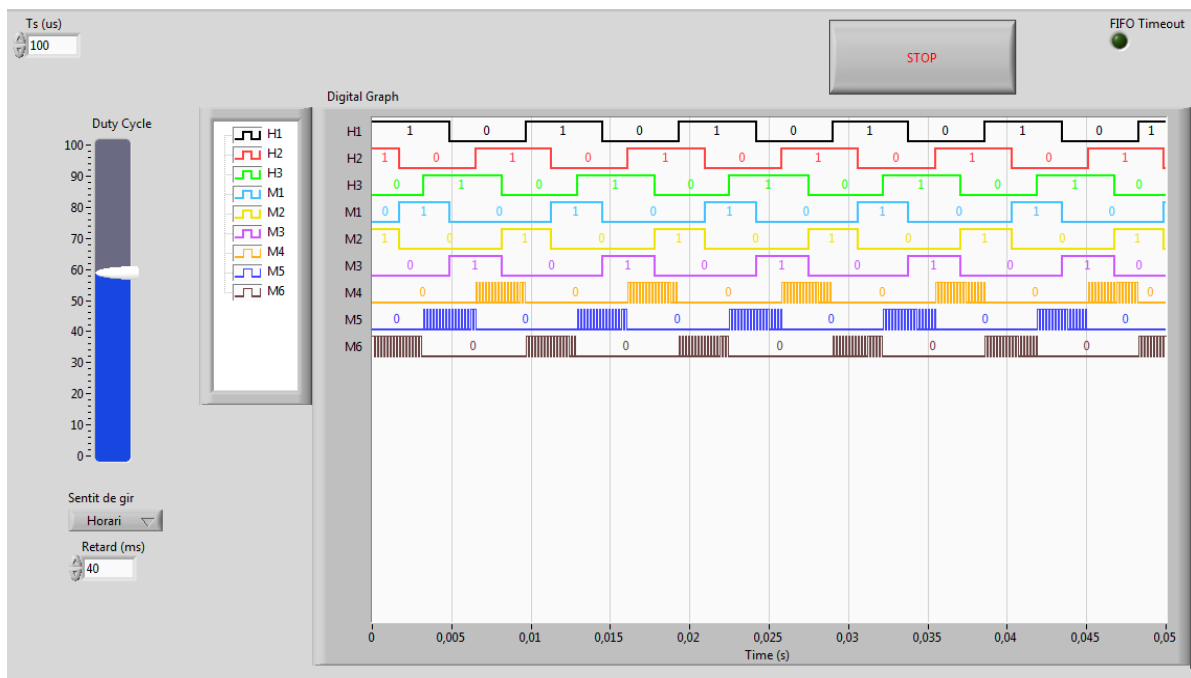


Figura 56. Panell frontal del programa principal de l'accionament del brushless

Aquest programa s'executa a una velocitat de 100 ms per cicle. Al tractar-se només de representacions gràfiques i controls per l'usuari, no és necessària una velocitat d'execució superior.

Aquest programa principal permet a l'usuari variar el Duty Cycle de la senyal PWM generada al programa FPGA per tal de variar la velocitat del motor brushless trapezoïdal. També permet escollir el sentit de gir del motor i especificar el temps de retard al canviar de sentit de gir.

Llavors es mostra per pantalla una representació gràfica dels valors lògics que van prenent totes les senyals que intervenen en l'accionament.

A cotinuació hi ha un organigrama que especifica el funcionament del programa principal.

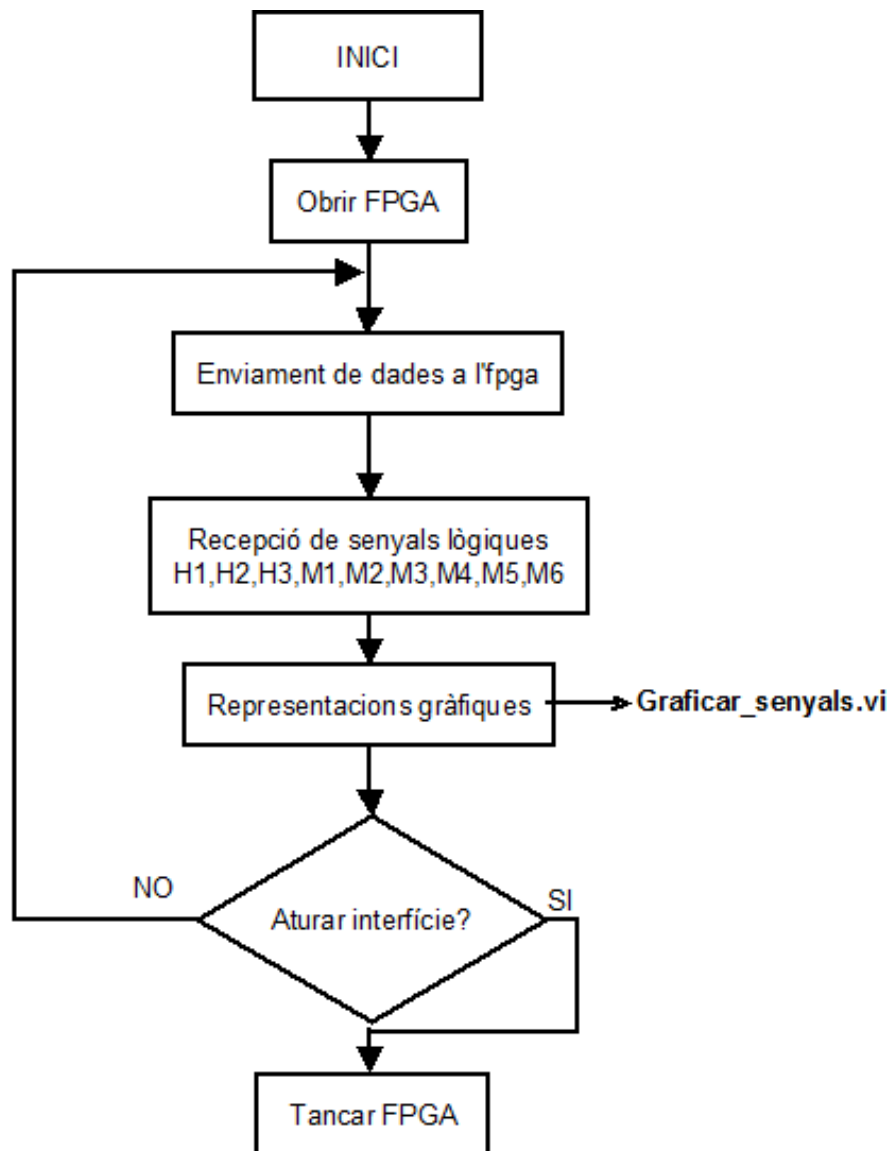


Figura 57. Organigrama del programa principal

Aquest programa principal conté un sol subprograma (subVI) corresponent a la representació gràfica dels senyals (Graficar_senyals.vi). Aquest subVI llegeix l'array de valors lògics provinent de la memòria FIFO i els tracta correctament per tal de representar cada variable lògica en un canal diferent del gràfic que surt per pantalla.

A continuació hi ha una figura del programa que es troba a l'interior de l'estructura While Loop del programa principal amb una petita identificació de cadascuna de les parts del programa.

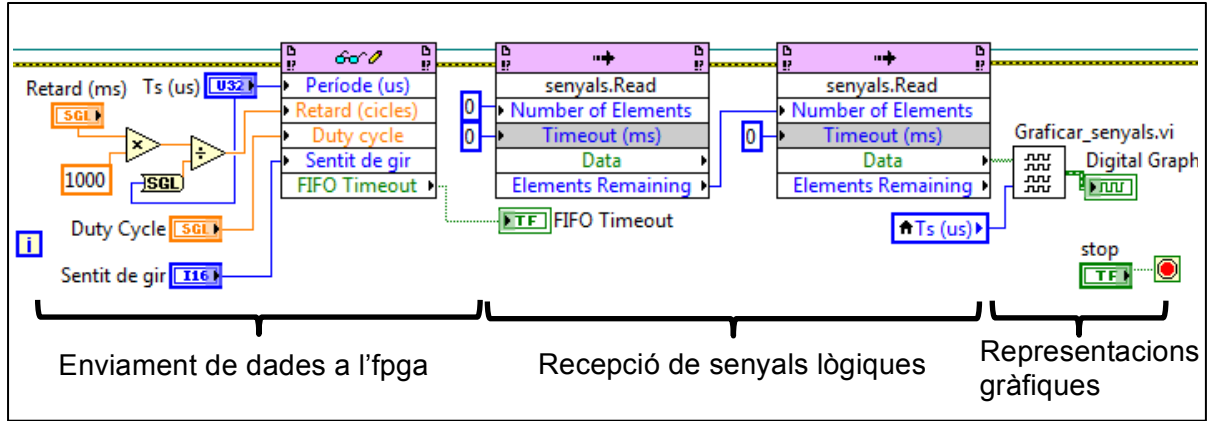


Figura 58. Codi del programa principal

10 RESUM DEL PRESSUPOST

El valor estimat de les aplicacions didàctiques amb NI CompactRIO pel Laboratori de Màquines Elèctriques és de cinc mil noranta tres euros amb setanta quatre cèntims, sense IVA.

11 CONCLUSIONS

Mitjançant les eines de programació que ofereix LabVIEW i gràcies a l'arquitectura CompactRIO i a la programació FPGA s'ha pogut assolir els dos objectius fonamentals que es marcaven en aquest projecte.

Per una banda, s'ha realitzat satisfactòriament una estació que permet la lectura de tensions i intensitats per ser utilitzada en els muntatges del laboratori. D'aquesta manera el laboratori disposa d'un equip de mesura flexible i fiable que permet llegir simultàniament fins a quatre intensitats i vuit tensions. S'incorpora una interfície gràfica senzilla i funcional que permet la visualització de les mesures i dona tota la informació rellevant per l'usuari.

Per altra banda, s'ha dissenyat una aplicació per l'accionament del motor brushless trapezoïdal de laboratori que substitueix l'actual lògica de control implementada amb circuits lògics no programables. Aquesta aplicació llegeix la posició del rotor del motor mitjançant els sensors hall i acciona l'etapa de potència de forma coherent segons la posició del rotor. S'ha aconseguit un accionament estable i fiable gràcies a la utilització de l'FPGA que ha permès una lectura i escriptura de dades a gran velocitat. La interfície gràfica dissenyada permet a l'usuari variar la velocitat del motor i visualitzar totes les variables digitals que intervenen en l'accionament.

S'ha aconseguit per tant dotar el laboratori amb un equipament nou i adequat als recursos tecnològics actuals que millorarà les activitats docents que s'hi portin a terme a partir d'ara.

Jordi Suy Ollé

Graduat en Enginyeria Elèctrica

Girona, 1 de juny de 2015

12 RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present projecte consta dels següents documents: memòria, plànols, plec de condicions, estat d'amidaments i pressupost.

13 BIBLIOGRAFIA

FAIRCHILD SEMICONDUCTORS. Reguladors de tensió LM. (<http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/>, 29 d'abril de 2015).

FAIRCHILD SEMICONDUCTORS. Transistor BC547C. (<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/BC/BC547.pdf>, 29 d'abril de 2015).

EMERSON. Font d'alimentació 12V 1A. (www.artesyn.com/power/assets/da12-m_series_ds_06-04-14_79cfb80a76.pdf, 13 de maig de 2015).

LEM. Transductor d'intensitat. (www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf, 29 d'abril de 2015).

MURATA. Convertidor dc-dc. (power.murata.com/data/power/ncl/kdc_nmh.pdf, 1 de maig de 2015).

NATIONAL INSTRUMENTS. CompactRIO i mòduls e/s (<http://www.ni.com/compactrio/esa/>, 21 de febrer de 2015).

NATIONAL INSTRUMENTS. Font d'alimentació 24V (www.ni.com/pdf/manuals/372911a.pdf, 22 de febrer de 2015).

NATIONAL INSTRUMENTS. Llenguatge de programació (<http://spain.ni.com/>, 29 d'abril de 2015).

PALLÁS, RAMÓN, Sensores y Acondicionadores de Señal. Ed. Marcombo.Barcelona. 2003

PÉREZ GARCÍA, MIGUEL A., et al. Instrumentación Electrónica. Ed. Paraninfo. Madrid.2011

PUIGMAL, JOAN. Apunts Control de màquines elèctriques, Control del motor brushless. Publicació UdG 2013.

RS-ONLINE. Catàleg i relació de preus. (<http://es.rs-online.com/web/>, 29 d'abril de 2015).

TEXAS INSTRUMENTS. Integrat TL074. (<http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=tl074-ep&fileType=pdf>, 29 d'abril de 2015).

THALHEIM. Sensor hall. (<http://pat63.ru/files/files/baumerthalheim-catalog-kratkiy.pdf>, 1 de maig de 2015).

TRACOPOWER. Convertidor dc-dc. (www.tracopower.com/products/tma.pdf, 29 d'abril de 2015).

14 GLOSSARI

DMA: Direct Memory Access

FIFO: First In, First Out

FPGA: Field Programmable Gate Array

OPAMP: Operational Amplifier

PCB: Printed Circuit Board

PWM: Pulse Width Modulation

USB: Universal Serial Bus

A DIAGRAMES DE BLOCS DEL LABVIEW

En aquest capítol de l'annex es mostren tots els diagrames de blocs de LabVIEW realitzats en el projecte i es donaran les taules amb totes les variables utilitzades en cadascun dels programes.

A.1 Programa principal de l'estació de mesura

La figura següent mostra el programa principal de l'estació de mesura.

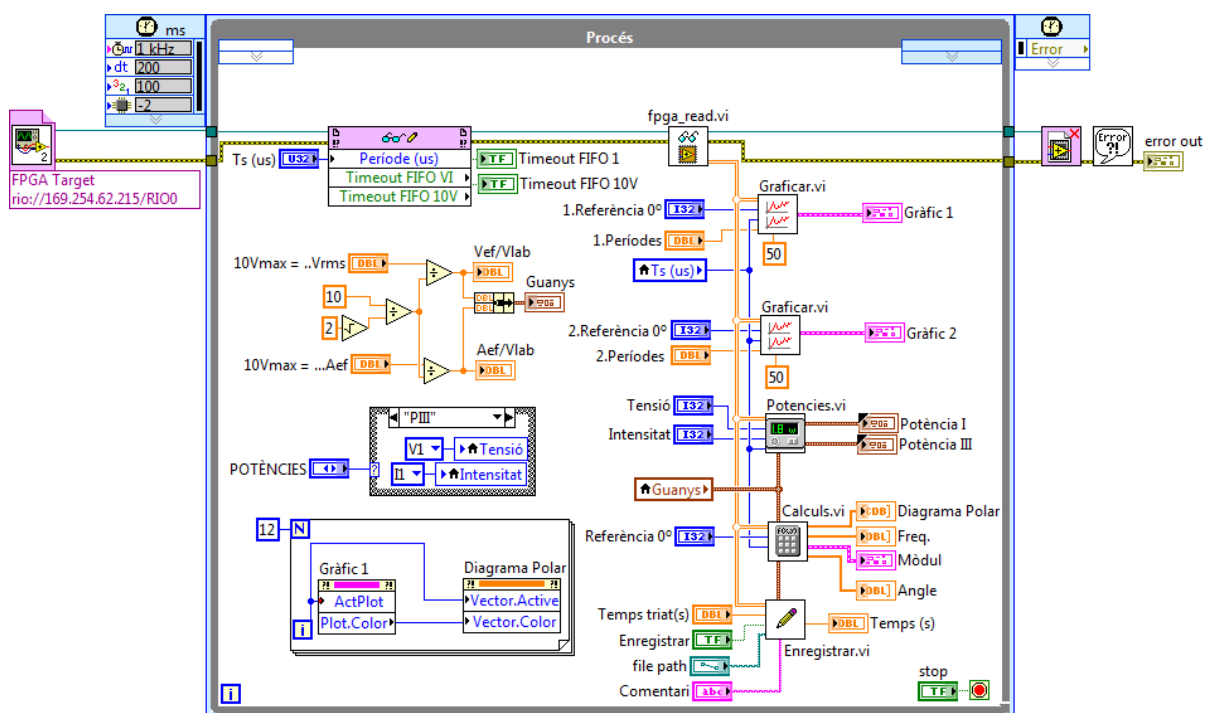


Figura 59. Codi LabVIEW de l'estació de mesura

A continuació hi ha la taula de variables del programa.

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Booleà	Control	Enregistrar	Polsador per iniciar l'enregistrament de senyals
	Indicador	Timeout FIFO 1	LED que indica buffer memòria FIFO 1 ple
		Timeout FIFO 10V	LED que indica buffer memòria FIFO 10V ple

Taula 16. Variables del programa estació de mesures 1a part

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Double	Control	1.Períodes	Número de períodes de la senyal que es vol graficar en el gràfic 1
		2.Períodes	Número de períodes de la senyal que es vol graficar en el gràfic 2
		10Vmax=...Aef	Ajust de guany de la mesura d'intensitat (8A per defecte)
		10Vmax=...Vrms	Ajust de guany de la mesura de tensió (230V per defecte)
		Temps triat (s)	Temps en segons que es vol que duri l'enregistrament
	Indicador	Angle	Array d'angles de desfasament de cada senyal
		Mòdul	Array de mòduls de cada senyal
		Freq.	Array de freqüències de cada senyal
		Temps (s)	Buffer indicador de temps durant l'enregistrament
Integer	Control	1.Referència 0°	Senyal de referència a partir de la qual es representaran tota la resta en el gràfic 1
		2.Referència 0°	Senyal de referència a partir de la qual es representaran tota la resta en el gràfic 2
		Referència 0°	Senyal de referència a partir de la qual es representaran tota la resta en el diagrama polar
		Ts (us)	Temps de mostreig de l'FPGA
		Tensió	Tensió que es vol escollir per calcular la potència
		Intensitat	Intensitat que es vol escollir per calcular la potència
		Clúster	Indicador
Potència I	P,Q,S i fdp monofàsic		
Potència III	P,Q,S i fdp trifàsic		
String	Control	Comentari	String per entrar-hi un comentari pel capçal de l'arxiu de text de l'enregistrament

Taula 17. Variables del programa estació de mesures 2a part

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
File path	Control	File path	Control per especificar la direcció on es guardarà l'arxiu de text de l'enregistrament
Graph	Indicador	Gràfic 1	Representació temporal de les lectures
		Gràfic 2	Representació temporal de les lectures
	Indicador	Diagrama Polar	Representació polar de les senyals
Tab	Control	POTÈNCIES	Tab per escollir potència monofàsica o trifàsica

Taula 18. Variables del programa estació de mesures 3a part

A.2 Programa FPGA de l'estació de mesura

La figura següent mostra el programa FPGA de l'estació de mesura.

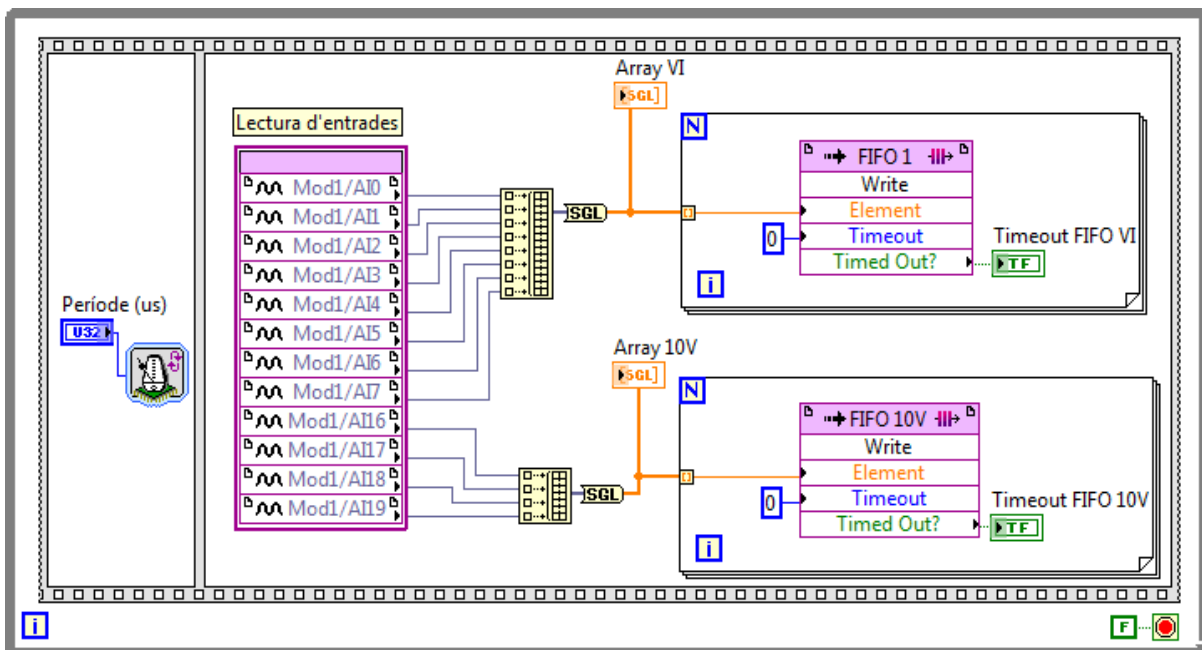


Figura 60. Codi LabVIEW FPGA de l'estació de mesura

A continuació hi ha la taula de variables del programa.

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Integer	Control	Període (us)	Període de mostreig de l'FPGA
Array Single	Indicador	Array VI	Array de lectures de senyals de tensió i intensitat
		Array 10V	Array de lectures de senyals de tensió de 10V
Booleà	Indicador	Timeout FIFO 1	LED que indica buffer memòria FIFO 1 ple
		Timeout FIFO 10V	LED que indica buffer memòria FIFO 10V ple

Taula 19. Variables del programa FPGA estació de mesures

A.3 Programa principal de l'accionament del motor brushless

La figura següent mostra el programa principal de l'accionament del motor brushless.

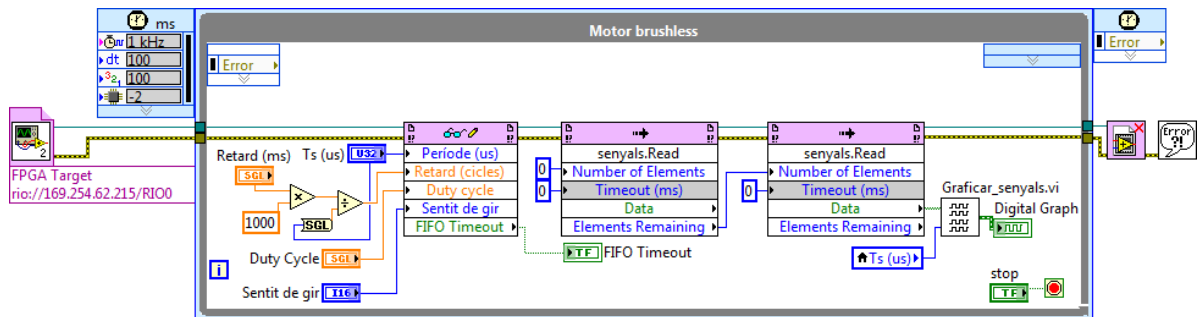


Figura 61. Codi LabVIEW de l'accionament brushless

A continuació hi ha la taula de variables del programa.

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Booleà	Indicador	FIFO Timeout	LED que indica buffer memòria FIFO ple
Single	Control	Retard (ms)	Retard en ms al canviar de sentit de gir
		Duty Cycle	Duty Cycle en % del PWM
Integer	Control	Sentit de gir	Sentit de gir del motor brushless
		Ts (us)	Període de mostreig de l'FPGA
Digital Graph	Indicador	Digital Graph	Gràfic digital per representar totes les senyals de l'accionament

Taula 20. Variables del programa de l'accionament brushless

A.4 Programa FPGA de l'accionament del motor brushless

La figura següent mostra el programa FPGA de l'accionament del motor brushless

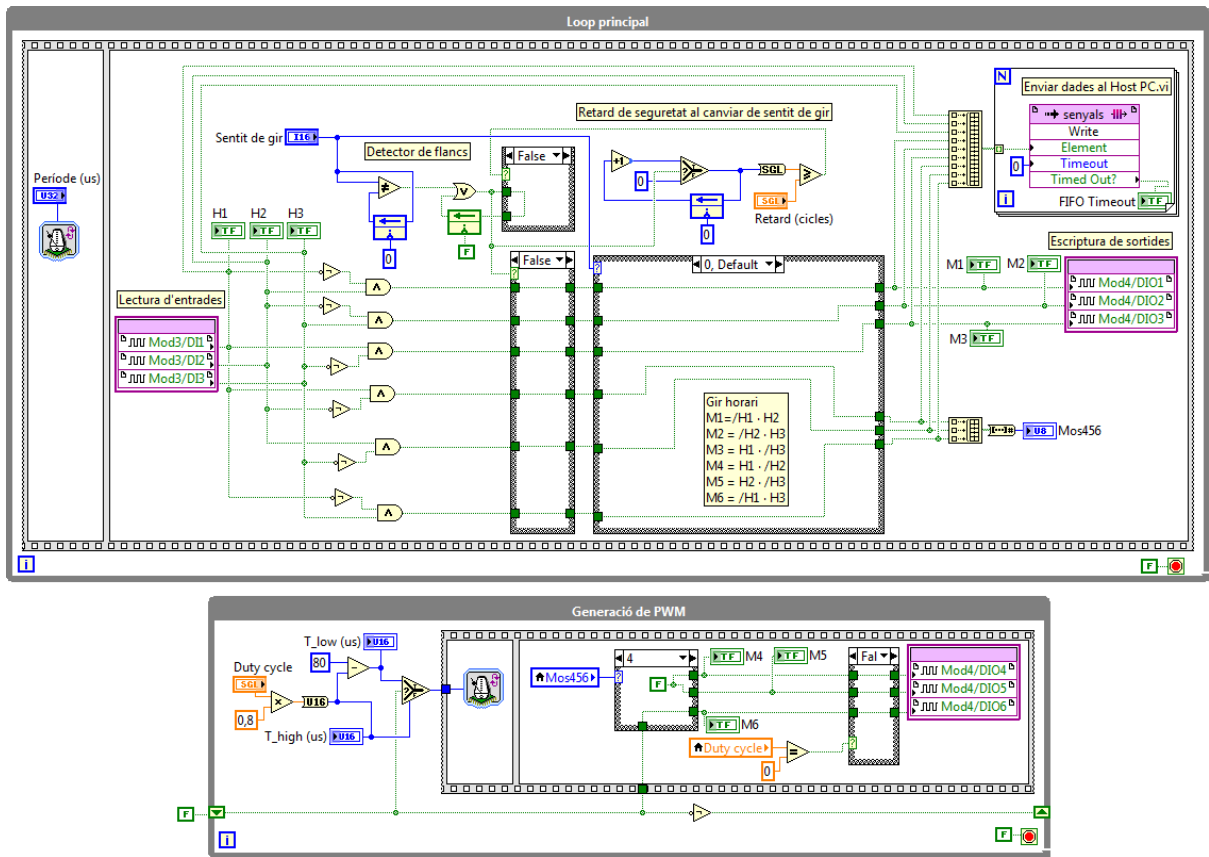


Figura 62. Codi LabVIEW FPGA de l'accionament brushless

A continuació hi ha la taula de variables del programa.

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Booleà	Indicador	H1	Sensor hall 1
		H2	Sensor hall 2
		H3	Sensor hall 3
		M1	MOSFET 1
		M2	MOSFET 2
		M3	MOSFET 3
		M4	MOSFET 4
		M5	MOSFET 5
M6	MOSFET 6		

Taula 21. Variables del programa FPGA de l'accionament brushless 1a part

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Booleà	Indicador	FIFO Timeout	LED que indica buffer memòria FIFO ple
Single	Control	Retard (ms)	Retard en ms al canviar de sentit de gir
		Duty Cycle	Duty Cycle en % del PWM
Integer	Control	Sentit de gir	Sentit de gir del motor brushless
		Període (us)	Període de mostreig de l'FPGA
	Indicador	Mos456	MOSFETS amb PWM Si Mos456 = 1 → MOS 4 actiu Si Mos456 = 2 → MOS 5 actiu Si Mos456 = 4 → MOS 6 actiu
		T_low (us)	Temps a zero del PWM
		T_high (us)	Temps a u del PWM

Taula 22. Variables del programa FPGA de l'accionament brushless 2a part

B MANUAL D'USUARI

En aquest apartat es descriu les interfícies d'usuari que es troben disponibles en cada un dels programes desenvolupats amb LabVIEW per tal de que l'usuari pugui realitzar les accions necessàries sobre cada un dels sistemes controlats per cada interfície.

B.1 Interfície de l'estació de mesura

La interfície d'usuari de l'estació de mesura ofereix tota la informació rellevant de les variables a mesurar.

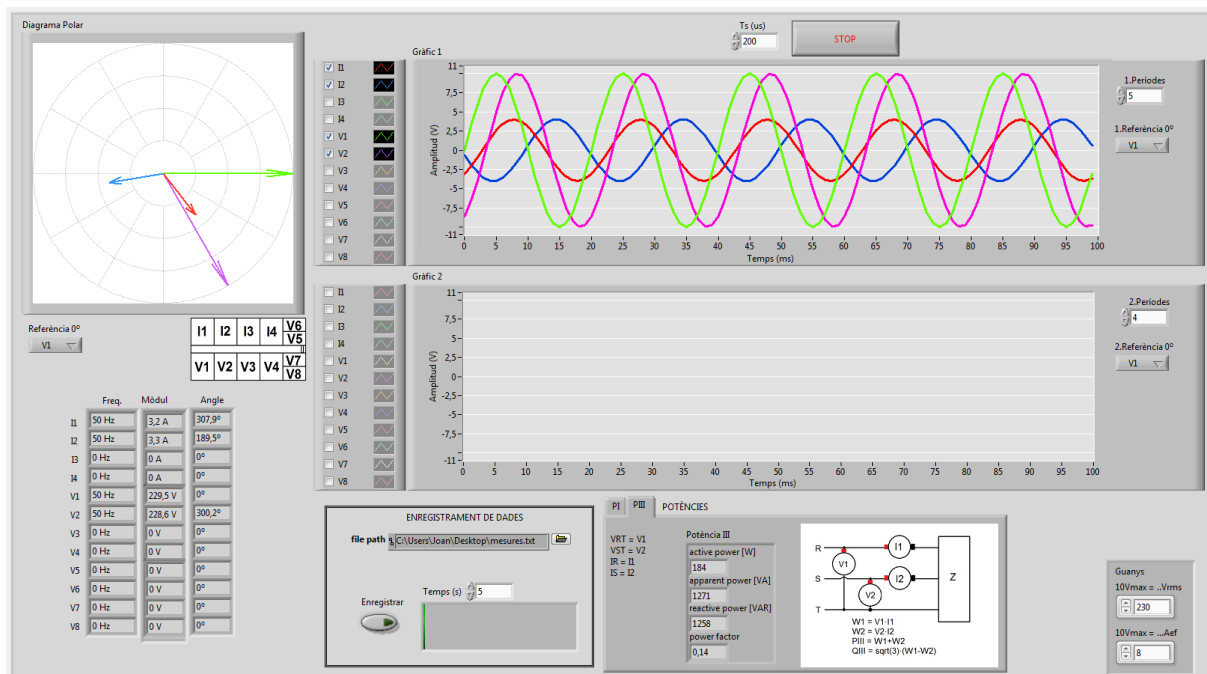


Figura 63. Panell frontal de l'estació de mesura

Hi ha dos gràfics temporals en la part central que permeten a l'usuari escollir quines senyals vol veure en cada un d'ells mitjançant els ticks en la llegenda per habilitar o deshabilitar una lectura. Per cada gràfic es pot escollir els períodes de senyal a mostrar i quina es vol que sigui la senyal de referència (0°) a partir de la qual es representin les altres.

L'altre gràfic que ofereix la interfície és el diagrama polar de totes les senyals que s'estan mesurant. Aquest diagrama es troba situat en la part superior esquerra i també permet

escollir la senyal de referència (0°). Sota seu, es troben els mòduls i les fases de totes les senyals que permet mesurar l'estació. També es mostra la seva freqüència.

Per altra banda, en la part inferior de la interfície hi ha l'enregistrament de dades que l'usuari pot iniciar en qualsevol moment tot accionant el polsador Enregistrar. També es pot escollir el temps en segons que es vol que duri l'enregistrament. També cal indicar la direcció de l'arxiu de text resultant.

L'usuari també pot fer càlculs de potència elèctrica en la part inferior de la pantalla. Hi ha dues pestanyes per escollir entre potència monofàsica o trifàsica. En el cas d'escollir potència monofàsica l'usuari té dos menús desplegable per escollir quina intensitat i quina tensió són les que es volen utilitzar per calcular la potència. En el cas de la potència trifàsica, s'indica a l'usuari quines connexions ha de fer per tal de que el programa utilitzi el mètode Aron per determinar-ne la potència elèctrica. Els resultats obtinguts sempre són: potència activa en W , potència reactiva en VAr , potència aparent en VA i factor de potència.

Per últim, a l'extrem inferior dret de la interfície hi ha els guanys de tensió i intensitat que l'usuari pot escollir per tal de obtenir diferents resolucions dels circuits de mesura. Cal recordar que aquests ajustos han d'anar en sintonia amb els ajustos realitzats en els potenciòmetres de guany de les etapes de condicionament de cada circuit de mesura.

B.2 Interfície de l'accionament del motor brushless

La interfície d'usuari de l'accionament del motor brushless és molt senzilla i intuïtiva. L'usuari té accés a tres controls bàsics. El control principal és el Duty Cycle de l'FPGA que permetrà variar la velocitat de gir del motor. Per altra banda l'usuari pot canviar el sentit de gir amb el desplegable corresponent i pot escollir quin temps de retard vol al fer el canvi de sentit de gir.

Per aturar l'accionament del brushless cal prémer el botó d'Stop. Al prémer el botó es deixa d'alimentar la part de potència del motor i s'atura la interfície d'usuari.

En la part superior esquerra es pot modificar el temps de mostreig del programa FPGA.

El gràfic digital mostra l'evolució temporal de les senyals lògiques tant dels sensors hall com dels MOSFETS de l'etapa de potència. Es pot canviar el color de cada senyal fent click a sobre el seu dibuix de la llegenda.

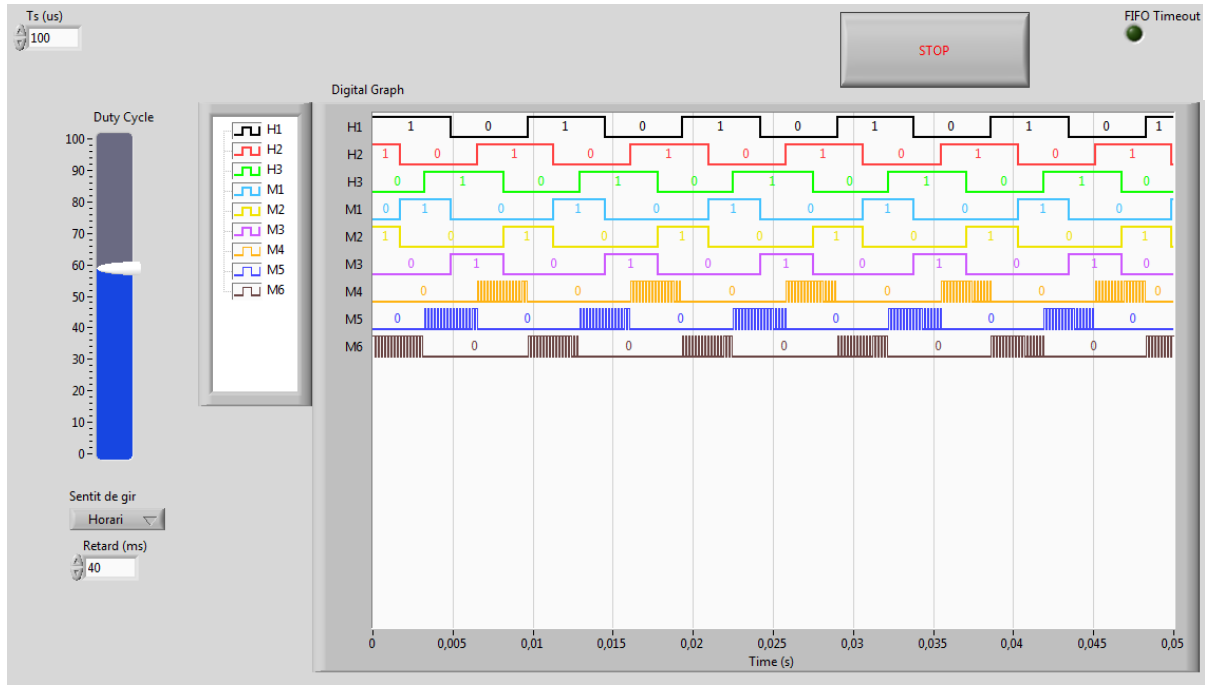


Figura 64. Panell frontal de l'accionament brushless

C PRÀCTICA DE L'ACCIONAMENT DEL MOTOR BRUSHLESS

En aquest capítol de l'annex s'adjunta un CD amb l'enunciat de la pràctica en .pdf que realitzaran els alumnes amb la plataforma dissenyada en aquest projecte. L'enunciat correspon a la pràctica de l'accionament del motor brushless trapezoïdal de l'assignatura Control de Màquines Elèctriques.