

## **Treball final de grau**

**Estudi: Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica**

**Títol: Disseny d'una plataforma amb NI CompactRIO per la regulació de velocitat en cascada d'un motor de corrent continu**

**Document:** I. Memòria

**Alumne:** Jordi Suy Ollé

**Director/tutor:** Joan Puigmal Pairot

**Departament:** Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica

**Àrea:** Enginyeria de Sistemes i Automàtica

**Convocatòria (mes/any) febrer/2015**

## ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ .....	4
1.1	Antecedents .....	4
1.2	Objecte .....	4
1.3	Abast .....	6
2	FUNCIONAMENT DEL CONTROL EN CASCADA .....	7
2.1	Principi teòric .....	7
2.2	Funcionament en els quatre quadrants .....	11
2.3	Conducció discontinua .....	13
2.4	Estructures de control necessàries .....	14
2.4.1	Llaç obert .....	14
2.4.2	Llaç en cascada .....	15
2.4.3	Llaç d'intensitat .....	15
3	INSTAL·LACIÓ .....	17
3.1	Motor de corrent continu .....	18
3.2	Equip de disparament de tiristors .....	21
3.3	Motor brushless .....	26
3.4	Sensors .....	33
3.4.1	Dinamo tacomètrica .....	33
3.4.2	Transductor d'intensitat .....	34
4	LÒGICA DE CONTROL .....	36
4.1	Arquitectura NI CompactRIO .....	36
4.2	Mòduls d'entrades i sortides .....	39
4.2.1	Mòdul NI 9205 d'entrades analògiques .....	39
4.2.2	Mòdul NI 9263 de sortides analògiques .....	40
4.2.3	Mòdul NI 9401 d'entrades/sortides digitals .....	41
5	INTERFÍCIE DE CONDICIONAMENT DE SENYALS .....	43

5.1	Adquisició d'entrades analògiques .....	43
5.1.1	Mesura de velocitat.....	43
5.1.2	Mesura d'intensitat.....	44
5.2	Condicionament de sortides analògiques .....	47
5.3	Adquisició d'entrades digitals.....	48
5.3.1	Polsador d'emergència .....	49
5.3.2	Detecció de l'alimentació de l'excitació.....	49
5.4	Condicionament de sortides digitals .....	51
5.5	Alimentació .....	53
5.6	Panell d'usuari .....	54
5.7	Cablejat d'interconnexió.....	55
5.7.1	Cables d'interconnexió interfície – mòdul d'entrades analògiques .....	56
5.7.2	Multicable mòdul de sortides analògiques – interfície .....	57
5.7.3	Multicable interfície – mòdul d'entrades/sortides digitals .....	58
5.7.4	Cables d'interconnexió interfície – equip de tiristors.....	58
5.7.5	Multicable interfície – driver Infranor .....	59
6	PROGRAMARI .....	60
6.1	Programes de funcionament manual .....	60
6.1.1	Motor brushless manual.....	61
6.1.2	Funcionament manual als quatre quadrants.....	63
6.2	Programa de regulació en cascada .....	67
6.2.1	Programa FPGA .....	68
6.2.2	Programa principal.....	77
7	SINTONIA DELS CONTROLADORS .....	86
7.1	PI d'intensitat .....	86
7.2	PI de velocitat .....	90
8	MOSTRA DE RESULTATS DE LA REGULACIÓ EN CASCADA .....	94
9	RESUM DEL PRESSUPOST .....	98

10	CONCLUSIONS .....	99
11	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	100
12	BIBLIOGRAFIA.....	101
13	GLOSSARI .....	103
A	DIAGRAMES DE BLOCS DEL LABVIEW .....	104
A.1	Programa brushless manual.....	105
A.2	Programa funcionament manual als quatre quadrants.....	106
A.3	Programa principal de regulació en cascada .....	107
A.4	Programa FPGA de regulació en cascada .....	111
B	MANUAL D'USUARI .....	113
B.1	Interfície de funcionament manual del motor brushless .....	113
B.2	Interfície de funcionament manual als quatre quadrants.....	114
B.3	Interfície de regulació en cascada.....	115
C	ENUNCIAT DE LA PRÀCTICA .....	120



## **1 INTRODUCCIÓ**

El motor de corrent continu (DC) ha estat un dels motors més utilitzats per accionaments on era necessari variar o regular la velocitat. Tot i que avui en dia existeixen altres alternatives més eficients, el motor de corrent continu segueix present en determinades aplicacions. A més, la seva regulació de velocitat serveix com a base per entendre sistemes de control més complexos.

### **1.1 Antecedents**

Al llarg d'aquests últims anys, en el Laboratori de Màquines Elèctriques s'han anat desenvolupant projectes que tenien com a objectiu regular la velocitat del motor de corrent continu utilitzant una lògica de control analògica. Actualment, es vol actualitzar el sistema de control utilitzant eines més potents i flexibles com és la plataforma CompactRIO de National Instruments. També es vol millorar la representació gràfica de les diferents variables que intervenen en el sistema.

Per a la realització d'aquest projecte es disposa dels següent equipament: un motor de corrent continu Vascot d'excitació independent, l'arquitectura CompactRIO de National Instruments amb mòduls d'entrades i sortides analògiques i digitals, un doble pont de tiristors Semikron trifàsic totalment controlat amb la seva electrònica de control d'angle de fase i un motor brushless Infranor amb el seu driver de control i el seu eix acoblat a l'eix del motor de corrent continu.

### **1.2 Objecte**

La plataforma dissenyada en aquest projecte s'utilitzarà en l'assignatura de "Control de Màquines Elèctriques" en dues pràctiques de laboratori, la pràctica corresponent al motor brushless i la pràctica de control del motor de corrent continu en cascada. També es podria utilitzar en altres assignatures, com per exemple les relacionades amb la regulació automàtica.

En aquest context, mitjançant l'arquitectura CompactRIO i la programació amb el software LabVIEW es vol assolir tres objectius.

El primer objectiu és dissenyar un sistema de control manual de la màquina brushless que li permeti funcionar com a motor o com a fre. Aquest sistema s'utilitzarà en la pràctica del motor brushless.

Com a segon objectiu es vol implementar un sistema d'estudi en llaç obert del funcionament en els quatre quadrants de la màquina de corrent continu, fent treballar la màquina brushless com a motor o com a fre segons convingui, tot visualitzant les mesures que es creguin adequades des del punt de vista didàctic. Aquesta utilitat s'utilitzarà en la primera part de la pràctica de control del motor de corrent continu en cascada.

Finalment, el tercer objectiu i el més important aplicat a la pràctica de control del motor de corrent continu és el de desenvolupar un sistema de regulació de la velocitat en cascada del motor de corrent continu on la màquina brushless simuli la càrrega mecànica. El sistema controlarà el nivell de frenat de la màquina brushless i permetrà un parell de fre constant o variable amb la velocitat, simulant així el comportament de diferents tipus de màquines accionades. També amb aquest sistema de fre es podran provocar pertorbacions de parell per tal de poder estudiar la resposta del control de velocitat del motor de corrent continu davant unes condicions de funcionament reals. S'ha d'incloure un sistema de consigna de velocitat de referència amb la possibilitat de generació de graons i rampes. El sistema permetrà l'ajust dels paràmetres dels controladors PI i els seus limitadors així com també els ajustos associats als sistemes de mesura. Per altra banda, es realitzarà una visualització de l'evolució temporal de les variables d'interès així com una representació en temps real de la situació de l'accionament en els quatre quadrants.

Per satisfer tots els objectius es dissenyarà una interfície d'adquisició i condicionament de senyals que ha de contemplar la possibilitat de desconnectar la plataforma CompactRIO i l'equip de tiristors, per tal de que es puguin utilitzar de forma independent en altres pràctiques del laboratori. Es contemplarà també la implementació de sistemes de seguretat davant incidències que pugin malmetre l'equipament.

La finalitat d'aquest projecte és que serveixi com a material didàctic pels estudiants que estan treballant aquest sistema de control. Es tracta de tenir una plataforma de demostració en el Laboratori de Màquines Elèctriques que permeti als alumnes estudiar de forma pràctica els conceptes vistos a teoria.

### **1.3 Abast**

L'abast d'aquest projecte és a nivell de laboratori i no contempla la possible utilització del motor de corrent continu amb una càrrega que no sigui la del motor brushless. 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 FUNCIONAMENT DEL CONTROL EN CASCADA

S'entén la regulació del motor de corrent continu com un control automàtic de la velocitat per part del sistema de control a partir d'un valor de velocitat desitjat (consigna de velocitat) i una mesura de velocitat real, de tal manera que el control fa les actuacions convenientes sobre la màquina motriu per aconseguir que la velocitat real de gir sigui en tot moment igual a la de consigna.

### 2.1 Principi teòric

Habitualment per variar la velocitat d'un motor de corrent continu s'actua sobre la tensió d'alimentació del debanat d'induït o d'armadura ( $V_a$ ). Tanmateix, per aconseguir una bona resposta dinàmica (precisió i rapidesa) cal també regular el parell.

Per justificar la necessitat de regular el parell quan es fa una regulació de velocitat s'ha de partir de l'equació mecànica que defineix el comportament del conjunt motor elèctric + càrrega mecànica en règim transitori.

$$a = \frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T - T_L) \quad (\text{Eq. 1})$$

Ens podem trobar tres casos, el primer dels quals seria un període transitori d'acceleració on l'acceleració ( $a$ ) seria positiva, o sigui que el sistema guanya velocitat. Això es compleix si el parell del motor ( $T$ ) és superior al parell de la càrrega ( $T_L$ ).

El segon cas seria un període transitori de desacceleració on el sistema mecànic perd velocitat i té acceleració ( $a$ ) negativa. En aquest cas el parell del motor ( $T$ ) ha de ser inferior al parell de la càrrega ( $T_L$ ).

El tercer cas és de règim permanent o estable i es dona quan l'acceleració ( $a$ ) és igual a zero i per tant el sistema mecànic té velocitat constant. Això es compleix si el parell del motor ( $T$ ) és igual al parell de la càrrega ( $T_L$ ).

Per tant, en qualsevol accionament elèctric, es farà una bona regulació de velocitat si el sistema de regulació regula el parell. En el cas del motor de corrent continu d'aquest

projecte, regular el parell implica regular la intensitat del debanat d'induït ( $I_a$ ) ja que si es manté constant la intensitat del debanat d'excitació, el parell és proporcional a la intensitat d'induït  $I_a$  tal com es mostra en la següent equació del parell intern total del motor:

$$T_i = K \cdot \Phi \cdot I_a \quad (\text{Eq. 2})$$

On  $K$  és una constant que depèn de característiques constructives de la màquina,  $\Phi$  és el flux útil que travessa l'induït que amb excitació constant té un valor fix, i  $I_a$  és la intensitat d'induït. Aquesta expressió demostra que el parell del motor és directament proporcional a la intensitat d'induït.

La tensió o f.e.m. interna induïda en el debanat d'induït es pot calcular de la següent manera:

$$E_a = 0,1047 \cdot K \cdot \Phi \cdot n \quad (\text{Eq. 3})$$

On  $K$  és una constant que depèn de característiques constructives de la màquina,  $\Phi$  és el flux útil que travessa l'induït i  $n$  és la velocitat de rotació en rpm. Aquesta expressió mostra que la velocitat del motor és directament proporcional a la f.e.m. interna i per tant directament relacionada amb la tensió d'alimentació.

Per tant, per regular la velocitat serà necessari controlar la tensió d'alimentació de l'induït del motor. Si es desitja que a més es pugui invertir la polaritat de la tensió, serà necessària una electrònica de potència adequada per alimentar l'induït del motor permetent una circulació d'intensitat en els dos sentits i amb possibilitat de retorn d'energia a la xarxa per poder treballar així en els 4 quadrants. Una opció és utilitzar un doble pont de tiristors totalment controlat tal com es mostra a la figura següent.

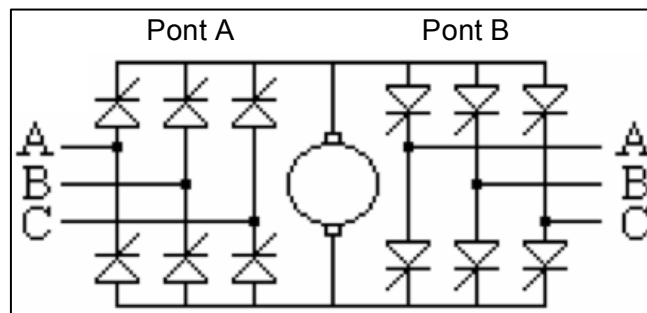


Figura 1. Ponts de tiristors

El sistema de regulació de velocitat implantat en aquest projecte es denomina regulació de velocitat en cascada, ja que el sistema té dos llaços de regulació, un llaç intern de regulació d'intensitat (o de parell) i un llaç extern de regulació de velocitat.

En la figura següent es mostra l'estructura de regulació del llaç en cascada.

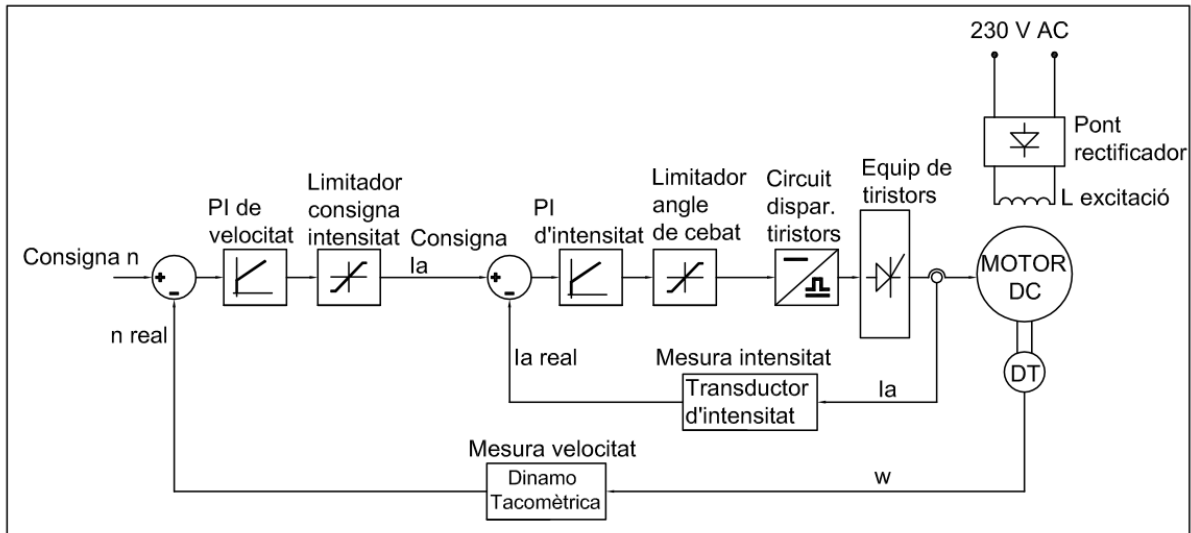


Figura 2. Llaç de regulació en cascada

En la figura es pot veure com la consigna de velocitat escollida per l'usuari es compara amb la mesura de velocitat que ofereix un sensor de velocitat, com podria ser una dinamo tacomètrica. Aquesta mesura de velocitat ha estat condicionada en l'etapa de condicionament de senyal. La diferència entre les dues velocitats (error de velocitat) entra al regulador de velocitat que calcula la consigna d'intensitat (o de parell). El limitador de consigna d'intensitat limita el valor d'intensitat en períodes transitoris. Normalment el valor d'ajust d'aquest limitador ha de permetre no superar en cap cas el doble de la intensitat nominal. En el cas d'aquesta aplicació didàctica s'ajustarà per no superar la intensitat nominal del motor en períodes transitoris.

La consigna d'intensitat es compara amb la mesura d'intensitat del transductor i la diferència entre les dues intensitats entra al regulador d'intensitat (o de parell). Aquest regulador proporciona un senyal analògic de referència per l'equip de tiristors. A partir d'aquest senyal, el circuit de control de l'equip de tiristors determina quin angle de disparament cal aplicar al pont de tiristors per aconseguir una tensió d'induït ( $V_a$ ) que aconsegueixi igualar la velocitat real i la de consigna en tot moment. El senyal analògic de referència per l'equip de tiristors

es pot limitar per evitar arribar als angles límits de cebat dels tiristors. D'aquesta manera s'aconsegueix una regulació de velocitat ràpida i efectiva del motor de corrent continu.

Es pot deduir que per la realització d'aquest control serà necessari utilitzar dos elements sensors capaços de donar una lectura ràpida i fiable tant de la velocitat de rotació de l'eix del motor com de la intensitat que circula pel debanat d'induït del motor. En aquest projecte s'utilitzarà una dinamo tacomètrica i un transductor d'intensitat d'efecte Hall.

Per saber quin dels dos ponts ha de treballar s'ha de agafar com a referència el signe d'una variable del sistema. Seguint l'exemple de controladors d'equips industrials, s'utilitza el signe de la consigna d'intensitat ( $I_a$ ) per determinar quin dels dos ponts treballa. Si el signe és positiu, treballa el pont A i si és negatiu, treballa el pont B.

Pel que fa als reguladors, regulador de velocitat i regulador d'intensitat, es poden basar en reguladors PID. A continuació es mostra la fórmula típica per calcular la sortida del regulador ( $u$ ) en funció de la senyal d'error ( $e$ ).

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + \frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(t) dt + K_P \cdot T_D \cdot \frac{d e(t)}{dt} \quad (\text{Eq. 4})$$

On  $K_P$  és la constant proporcional,  $T_I$  és la constant de temps integral i  $T_D$  és la constant de temps derivatiu.

Això significa que si hi ha una senyal d'error a l'entrada del controlador, la sortida d'aquest variarà proporcionalment a aquesta senyal d'error (acció proporcional P) per tal d'intentar corregir aquest error en estat estacionari. Si segueix existint aquesta senyal d'error actuarà la part integral I per aconseguir fer aquest error igual a zero, corregint així l'estabilitat en règim transitori. La part derivativa D intenta anticipar-se a l'error observant l'evolució que té l'error al llarg del temps per corregir possibles variacions o pertorbacions del sistema.

Tanmateix, en sistemes de control de parell o velocitat del motor de corrent continu, per la dinàmica del sistema no es precisa de l'acció derivativa. En fer els càlculs amb senyals adquirides que tenen cert soroll i interferències (com són els senyals de la dinamo tacomètrica i del transductor d'intensitat) pot donar-se el cas de que davant un pic de soroll puntual la part derivativa es satura (la derivada d'un pic vertical és infinit) i afecti

negativament al control de velocitat. Per aquesta raó, en general, els fabricants d'equips de regulació industrials en els dos llaços del sistema de regulació del motor de corrent continu utilitzen reguladors PI prescindint de l'acció derivativa. Per tant, la fórmula utilitzada per calcular la sortida queda reduïda a l'expressió següent:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (\text{Eq. 5})$$

## 2.2 Funcionament en els quatre quadrants

Quan es parla del funcionament d'un accionament format per un motor de corrent continu i una càrrega mecànica es fa servir la nomenclatura dels quatre quadrants. Això significa que intensitat d'induit i velocitat de rotació del motor de corrent continu poden prendre valors positius o negatius de tal manera que es determinen quatre zones de funcionament (tots dos positius, tots dos negatius, un positiu i l'altre negatiu o un negatiu i l'altre positiu). En la figura següent s'exemplifica aquestes quatre zones de funcionament.

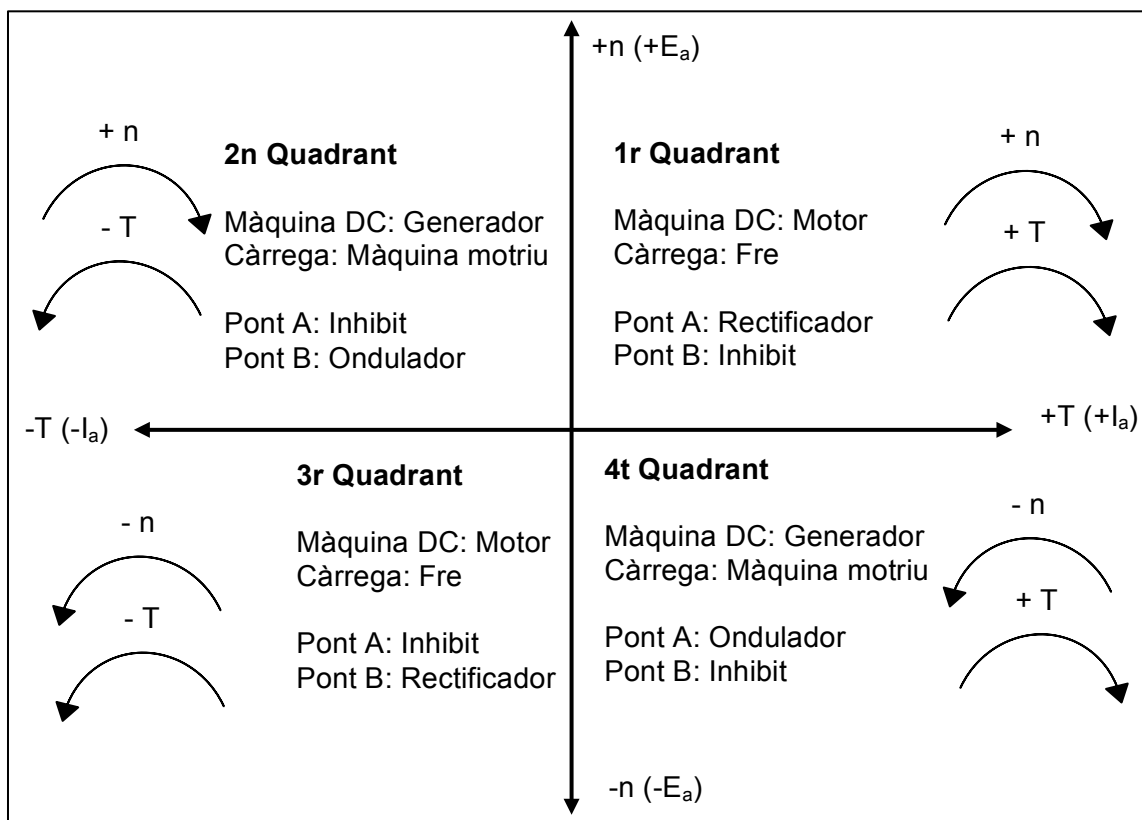


Figura 3. Explicació dels quatre quadrants



Es pot veure com per fer treballar en un quadrant o altre la màquina de corrent continu ha de treballar com a motor o com a generador. Cal dir que en l'aplicació principal d'aquest projecte la màquina de corrent continu treballa sempre com a motor, per tant això significa que en règim permanent sempre treballarà en el primer o en el tercer quadrant. Tanmateix, la màquina pot passar a treballar en el segon o en el quart quadrant en períodes de règim transitori quan, per exemple, es vol frenar ràpidament (frenat elèctric). Això és degut a que la càrrega emmagatzema energia mecànica i pot exercir durant uns instants de màquina motriu.

Un exemple de frenat elèctric seria que la màquina de corrent continu treballés com a motor en el primer quadrant (consigna de 1000 rpm) i la consigna de velocitat canviés de sobte a un valor negatiu (-1000 rpm). Per poder fer ràpidament la transició, el sistema de control deixaria de fer treballar el pont A i faria treballar el B, provocant una intensitat d'induit negativa que donaria lloc a un parell negatiu de fre. Tanmateix, la velocitat començaria a reduir-se de forma més lenta a causa de la inèrcia del sistema mecànic, de manera que en velocitat encara positiva la intensitat ja seria negativa (zona del segon quadrant) ajudant així a frenar més ràpidament i fer una transició cap al tercer quadrant on treballaria en règim permanent.

En la figura següent hi ha una explicació gràfica d'aquest fenomen.

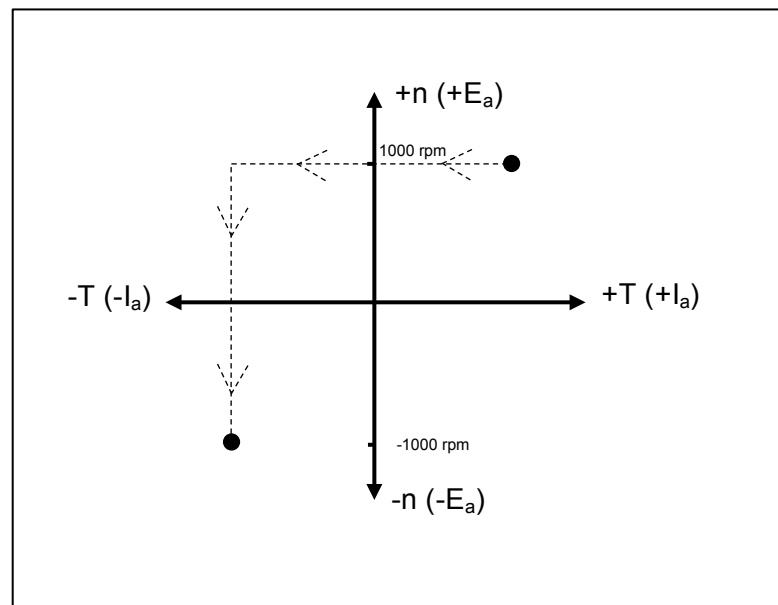


Figura 4. Pas pel segon quadrant

### 2.3 Conducció discontinua

En el marge de treball d'un motor de corrent continu accionat per un pont de tiristors si el parell sol·licitat per la càrrega és molt baix i per tant dona lloc a valors d'intensitat d'induït baixos, pot aparèixer una zona de conducció discontinua. El nivell del corrent crític, o punt de pas de conducció contínua a conducció discontinua, ve determinat per la constant de temps de l'induït del motor i per el nombre d'impulsos del convertidor dels tiristors. Per això el fenomen de la conducció discontinua disminueix en ponts controlats trifàsics. Tot i això, quan s'utilitzen ponts trifàsics totalment controlats poden aparèixer també zones de funcionament amb conducció discontinua. En els següents oscil·logrames visualitzats en el laboratori es mostra un cas on hi ha conducció discontinua i un cas on hi ha conducció contínua. En el canal A es mostra la tensió en borns d'induït del motor ( $V_a$ ) i en el canal B es mostra la intensitat d'induït ( $I_a$ ).

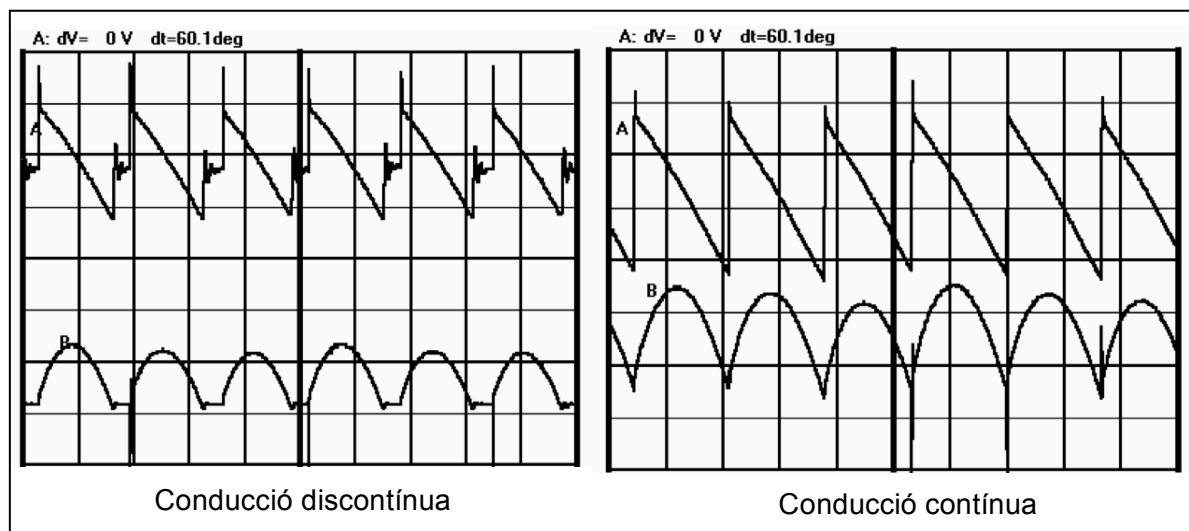


Figura 5. Conducció discontinua vs contínua

En conducció discontinua la dinàmica del sistema canvia i afecta a la resposta de la regulació per tant, s'ha d'evitar que el motor de corrent continu treballi en la zona de conducció discontinua.

En el projecte es simula el comportament de la càrrega a través del control del sistema de fre (motor brushless) de tal forma que sempre hi hagi un nivell mínim de parell de fre que doni lloc a una intensitat mínima d'induït que eviti la conducció discontinua. Aquest comportament de la càrrega és el que tenen la majoria d'accionaments.

## 2.4 Estructures de control necessàries

Aquest projecte pretén realitzar una plataforma didàctica per ajudar a l'alumne a entendre el concepte de regulació en cascada del motor de corrent continu de forma pràctica, per tant s'ha considerat necessari oferir a l'usuari de la plataforma diverses estructures de control. Es pretén permetre que l'usuari pugui realitzar de forma experimental els ajustos de sintonització dels PI's. Per aquesta raó, la interfície de condicionament de senyals així com el programa principal desenvolupat amb LabVIEW ofereixen aquesta possibilitat.

L'usuari podrà escollir entre tres estructures: llaç obert, llaç en cascada o llaç d'intensitat. A continuació hi ha una explicació de cada una d'aquestes estructures.

### 2.4.1 Llaç obert

El llaç obert prescindeix del càlcul dels PI's i directament passa la consigna de velocitat a la sortida del controlador. Aquest llaç no regula la velocitat i serveix per a comprovar que totes les lectures dels sistemes de mesura tinguin la polaritat correcta i que tot el sistema funciona de forma estable. La següent figura mostra com queda el llaç de regulació en aquest cas en concret.

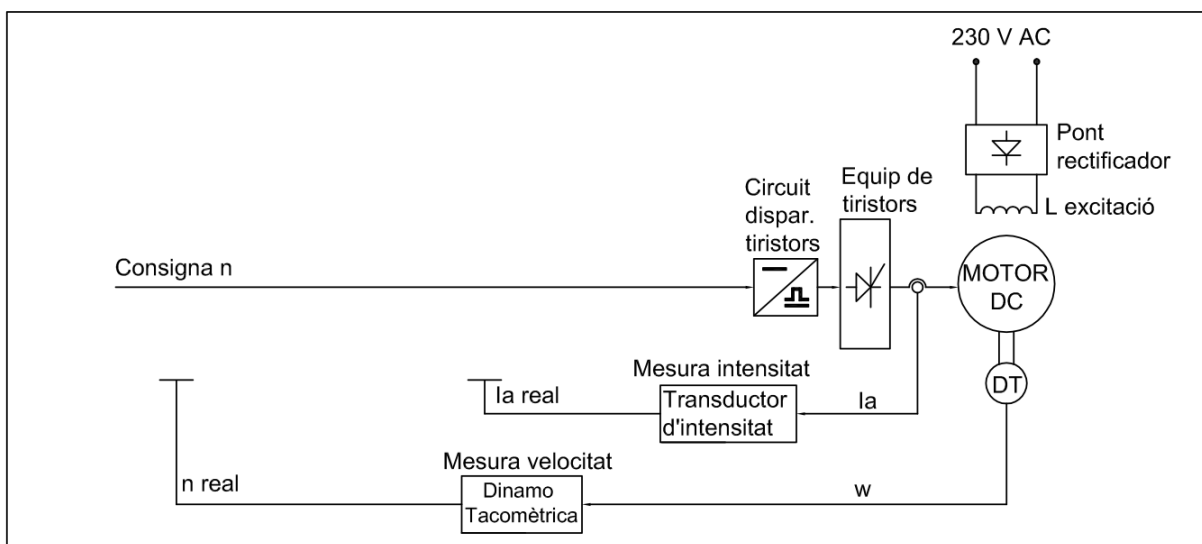


Figura 6. Llaç obert

### 2.4.2 Llaç en cascada

El llaç en cascada és el funcionament habitual que permet la regulació en cascada de la velocitat del motor de corrent continu. Quan l'usuari escull aquest llaç, es comencen a realitzar tots els càlculs necessaris per determinar la sortida del controlador que permeti igualar consigna de velocitat i velocitat real en tot moment. A continuació hi ha la figura que representa el funcionament del llaç en cascada.

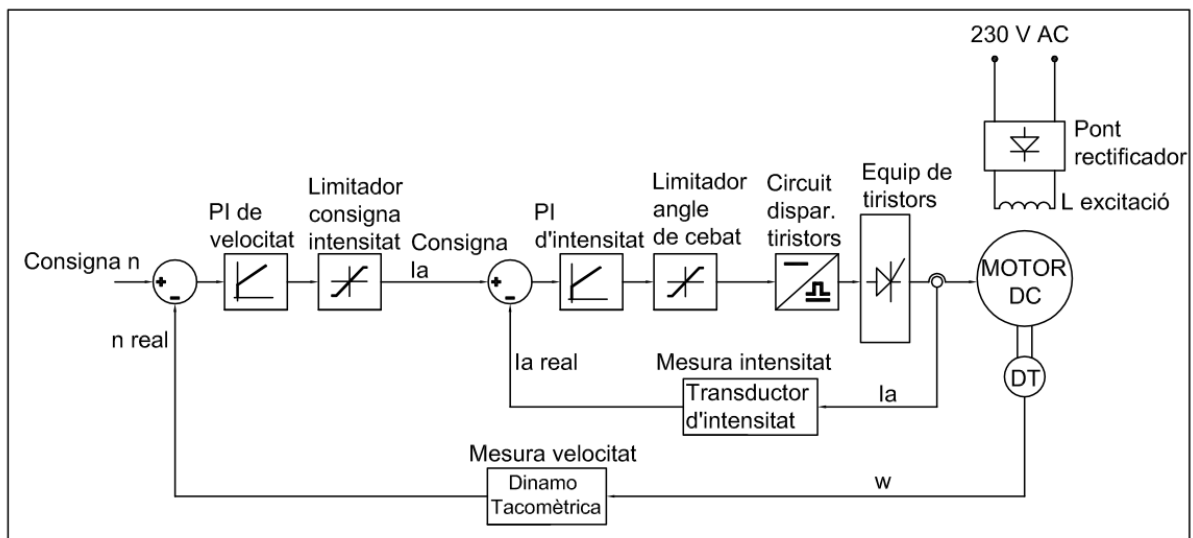


Figura 7. Llaç en cascada

### 2.4.3 Llaç d'intensitat

El llaç d'intensitat és el llaç que permet a l'usuari realitzar la sintonització del PI intern d'intensitat. S'elimina el regulador extern de velocitat de tal manera que la consigna de velocitat es converteix directament en la consigna de intensitat.

L'ajust del llaç de regulació intern d'intensitat depèn exclusivament del comportament de la constant de temps del debanat d'induït, o sigui dels valors de  $R_a$  i  $L_a$ . Per això els fabricants d'equips de regulació de velocitat de motors de corrent continu industrials indiquen en els seus manuals d'usuari que la forma de sintonitzar empíricament el regulador PI d'intensitat és desconnectant l'alimentació del debanat d'excitació. Sense intensitat d'excitació el flux és nul i per tant no hi ha f.e.m. interna ( $E_a$ ). El circuit equivalent del debanat d'induït queda reduït així a un circuit sèrie RL. En els moderns equips de regulació digital que incorporen la

possibilitat d'autotuning del regulador PI d'intensitat, s'indica també en els manuals que aquest ajust es realitza sense alimentació del debanat d'excitació.

Al realitzar l'ajust del PI en aquestes circumstàncies, sense  $E_a$ , amb valors relativament baixos de tensió d'induït tindrem valors elevats d'intensitat. Per això és molt important que en aquesta estructura el limitador de consigna d'intensitat segueixi treballant per evitar sobrepassar la intensitat d'induït del motor. Independentment dels ajustos de l'alumne, com a mesura complementària, en aquesta estructura la plataforma ajusta de forma automàtica el limitador d'angle de cebat a un valor baix, per assegurar que la tensió d'induït no pugui prendre valors perillosos.. Cal recordar que aquest llaç té sentit utilitzar-lo només quan no es té alimentada l'excitació i es vulgui sintonitzar el PI intern del controlador. Al tenir l'excitació desconnectada cal procurar operar de forma correcta per evitar sobreintensitats elevades que puguin danyar el motor. En el funcionament normal (amb excitació alimentada) aquest llaç no té aplicació pràctica.

A continuació hi ha una figura que mostra el funcionament del llaç d'intensitat. Com que aquesta estructura s'utilitzarà exclusivament per sintonitzar el regulador PI d'intensitat sense alimentació d'excitació, el motor no girarà perquè no hi haurà flux i per tant la realimentació de mesura de velocitat no serà operativa.

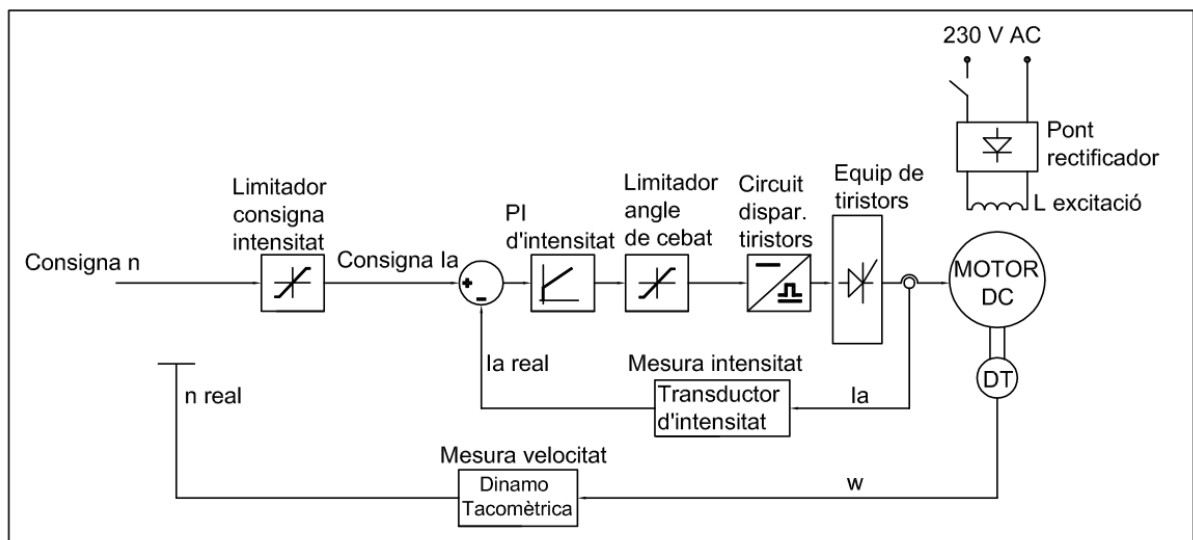


Figura 8. Llaç d'intensitat

### 3 INSTAL·LACIÓ

En aquest capítol es definiran tots els elements físics que formen part del projecte 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. Per la seva importància, l'arquitectura CompactRIO i la interfície de condicionament de senyals tenen cadascun un capítol sencer d'aquest projecte dedicat.

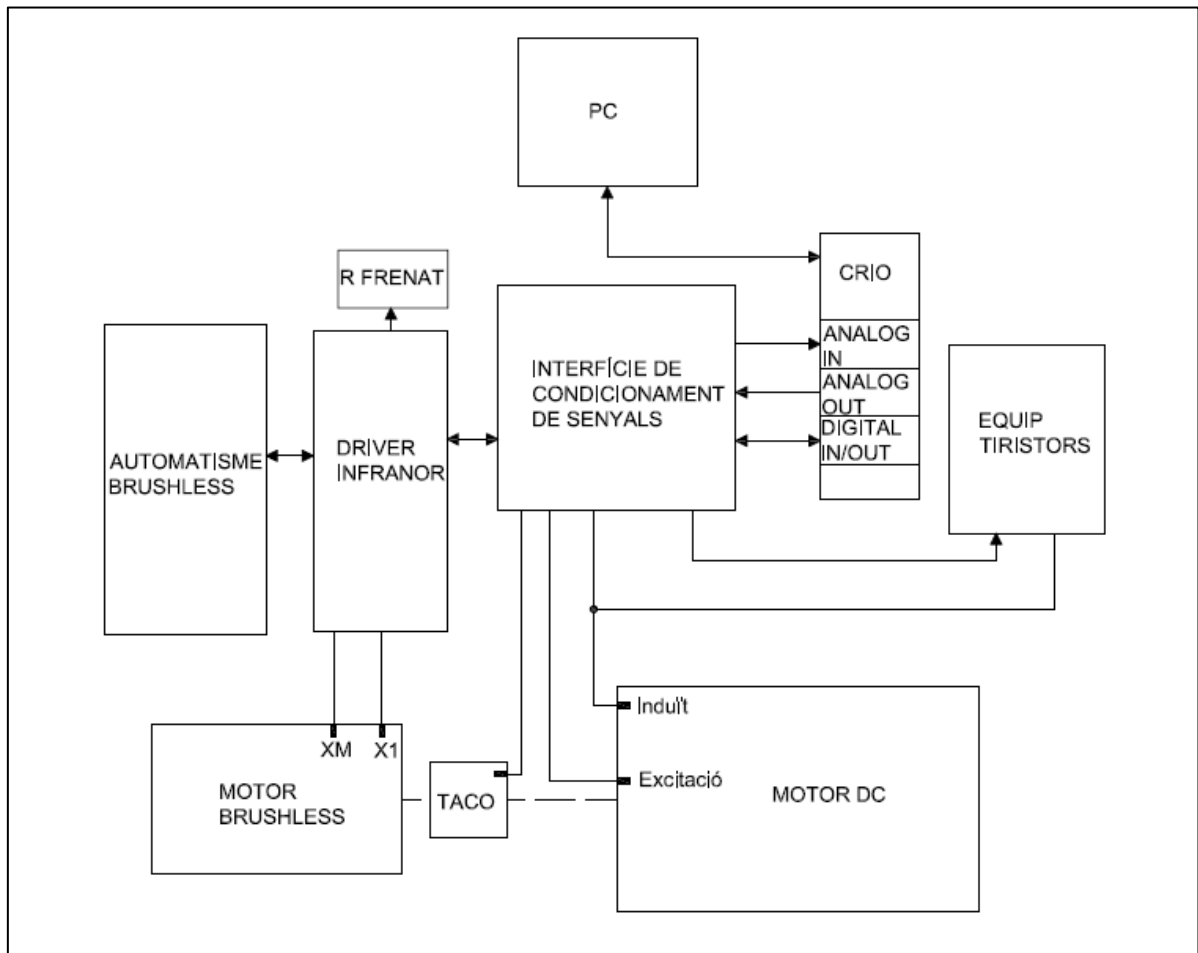


Figura 9. Elements de la instal·lació

### 3.1 Motor de corrent continu

El motor de corrent continu és l'equip fonamental i el que dona sentit al projecte, ja que es tracta de la màquina elèctrica rotativa de la qual es vol regular la seva velocitat.

El motor de corrent continu d'aquest projecte és d'excitació independent i té les següents característiques:

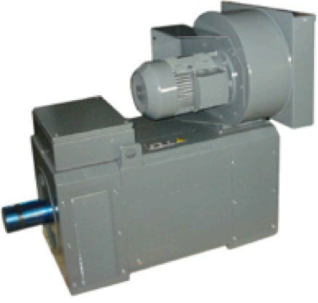
	<b>Marca i model</b>	VASCAT VD 100 M
	<b>Tipus</b>	DC
	<b>Potència</b>	3,7 kW
	<b>V induït</b>	310 V
	<b>I induït</b>	15 A
	<b>Classe de servei</b>	S-1 (servei continu)
	<b>IP</b>	23
	<b>Velocitat</b>	2700 rpm
	<b>V excitació</b>	195 V
	<b>I excitació</b>	0,4 A
	<b>Tipus d'excitació</b>	IND

Figura 10. Característiques motor de corrent continu

És important destacar dos paràmetres màxims de funcionament com són la seva velocitat de rotació de 2700 rpm i la seva intensitat màxima d'induït de 15A ja que aquests dos paràmetres indiquen els valors màxims que han de ser capaços de assolir els dos sensors de mesura.

Per a la seva correcta refrigeració, el motor disposa d'un ventilador instal·lat a la part superior del xassís que cal endollar a 230V per ajudar a evacuar la calor generada en l'interior del motor quan aquest es troba treballant a un règim de funcionament proper a la plena càrrega durant llargs períodes de temps.

Pel que fa a l'excitació del motor, el fabricant indica que la tensió d'alimentació ha de ser de 195V de tal manera que circulin 400 mA. En aquest projecte, l'excitació està alimentada mitjançant la tensió rectificada provinent de la xarxa elèctrica de 230V.

En la figura següent es mostra l'alimentació de l'excitació.

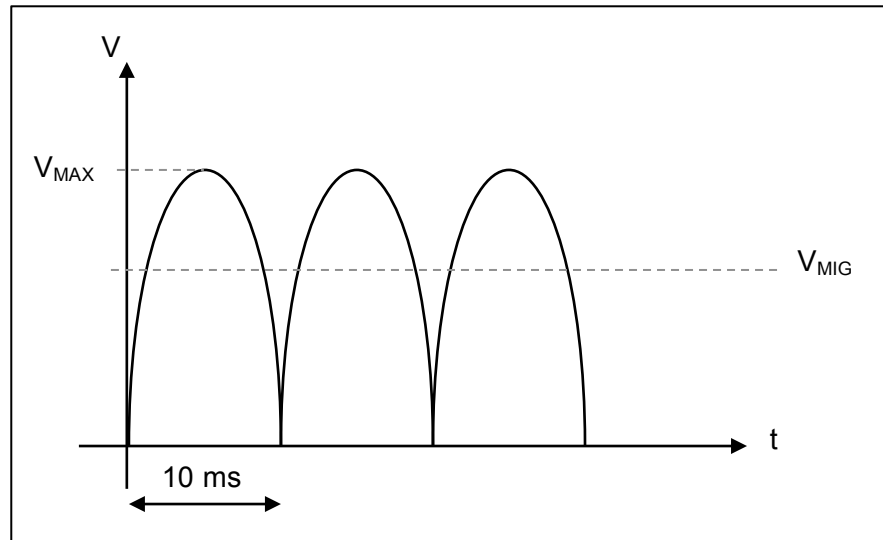


Figura 11. Tensió de l'excitació

La tensió màxima  $V_{MAX}$  es calcula com:

$$V_{MAX} = V_{ef} \cdot \sqrt{2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Amb l'equació anterior i sabent que el valor eficaç és de 230V, es troba que el valor màxim de la tensió és de 325,3V. Tanmateix, la tensió que veurà la bobina de l'excitació serà el valor mig d'aquesta tensió rectificada. El valor mig d'aquest tipus de senyals polsants es calcula de la següent manera:

$$V_{MIG} = \frac{2 \cdot V_{MAX}}{\pi} \quad (\text{Eq. 7})$$

Amb l'equació anterior i sabent el valor màxim, es troba que la tensió mitja aplicada a l'excitació és d'aproximadament 207 V. Per tant, la tensió aplicada s'ajusta bastant a la tensió nominal de 195 V que indica el fabricant del motor.



A continuació hi ha una figura que mostra l'alimentació de l'excitació del motor de corrent continu.

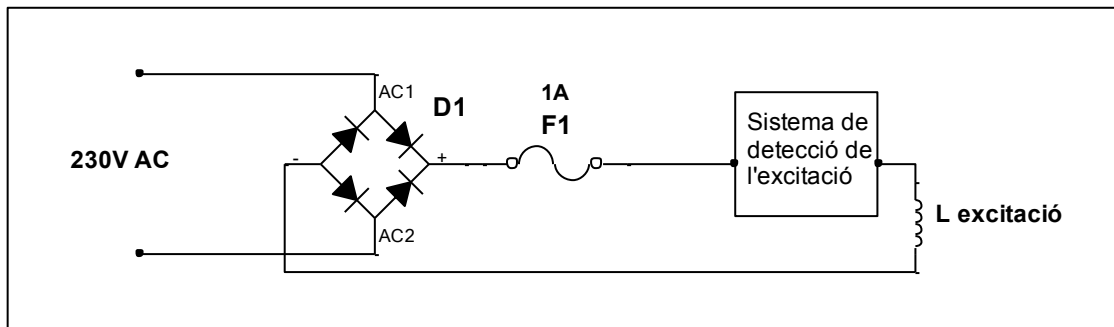


Figura 12. Alimentació de l'excitació

El bloc que representa el sistema de detecció de presència d'intensitat d'excitació s'explica en detall a l'apartat 5.3.2 Detecció de l'alimentació de l'excitació. S'ha col·locat un fusible d'1 A (el doble de la intensitat nominal) com a sistema de protecció contra sobreintensitats en l'alimentació de l'excitació.

A la pràctica, s'ha pogut comprovar que la tensió aplicada al motor mitjançant la tensió de 230V rectificada pràcticament fa passar els 400 mA d'intensitat nominal, per la qual cosa es pot considerar que l'excitació treballa en valors nominals de funcionament.

Sabent que la potència nominal del motor de corrent continu és de 3,7 kW i que la seva velocitat nominal és de 2700 rpm es pot calcular el parell nominal del motor mitjançant la següent expressió.

$$T = \frac{P}{0,1047 \cdot n} \quad (\text{Eq. 8})$$

Amb l'equació anterior es troba que el parell nominal del motor és de uns 13 Nm, per tant s'haurà de procurar que la càrrega del motor (en aquest projecte serà el motor brushless) no exerceixi un parell de fre superior en l'eix.

### 3.2 Equip de disparament de tiristors

Pel Laboratori de Màquines Elèctriques s'ha adquirit un nou equip de tiristors amb la seva lògica de control per tal d'alimentar a tensió variable l'induït del motor de corrent continu. Gràcies a aquest equip, es pot realitzar el control de la velocitat del motor, ja que variant la tensió en borns d'induït podem variar la velocitat de rotació del motor de corrent continu.

L'electrònica que forma el mòdul de disparament dels tiristors ha estat adquirida amb les següents característiques:

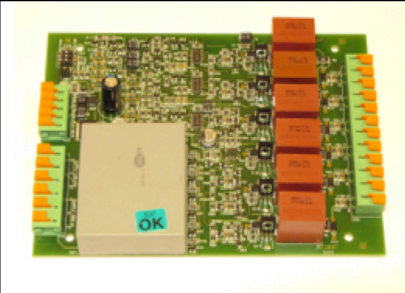
	<b>Marca i model</b>	RT380T 230/400 PCB RoHS
	<b>Tipus</b>	Mòdul de disparament analògic de tiristors
	<b>Alimentació</b>	230 VAC o 400 VAC
	<b>Aïllament</b>	4000 V d'aïllament galvànic
	<b>Pes</b>	525 g
	<b>Temperatura de treball</b>	Entre 5 i 50 °C

Figura 13. Característiques placa de disparament de tiristors

Es disposa de dues plaques com l'anterior per tal de controlar els angles de cebat de cada un dels dos ponts de tiristors totalment controlats de què es disposa per alimentar l'induït de la màquina de corrent continu (Ponts A i B) podent invertir així la polaritat de la tensió en borns de l'induït i per tant permetent la rotació del motor de corrent continu en els dos sentits de gir.

Val a dir que en el laboratori ja es disposa d'un muntatge de la lògica de control i els dotze tiristors de la marca SEMIKRON per tal de controlar l'induït del motor de corrent continu. La tasca d'aquest projecte és automatitzar aquest equip per tal que realitzi la seva tasca mitjançant les ordres que li doni el control en cascada del CompactRIO.

S'ha de permetre la utilització independent de l'equip de tiristors per a altres pràctiques del laboratori, per tant s'han de tenir en compte aquesta premissa a l'hora de realitzar el connexionat de l'equip.

L'equip consta de dues plaques que contenen la lògica de disparament (una per cada pont), els dotze tiristors correctament interconnectats i protegits amb una sèrie de fusibles i els punts de connexió necessaris en la part inferior. L'equip també disposa d'un magnetotèrmic de seguretat.

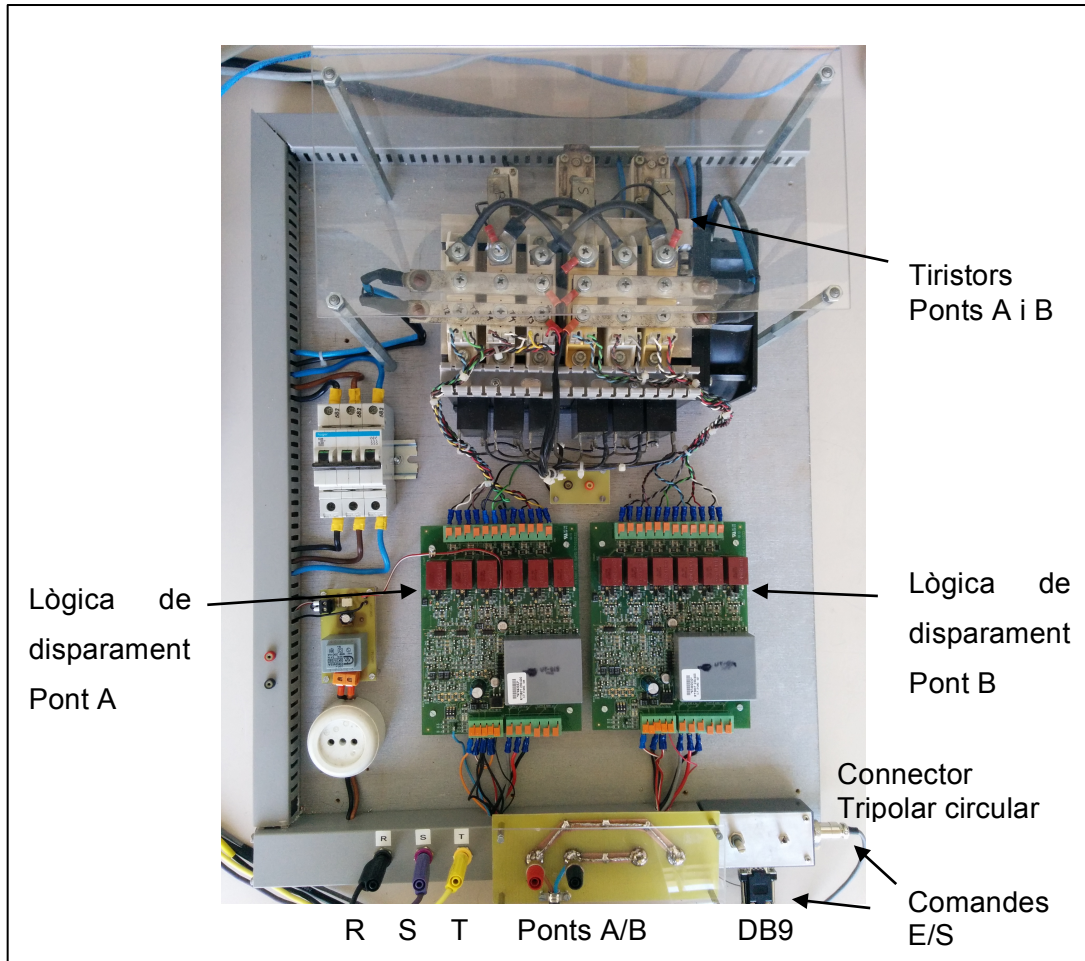


Figura 14. Equip de disparament de tiristors

Pel que fa a la part de potència, cal connectar tensió trifàsica de 230 VAC (connexions R, S i T) en la part inferior de l'equip per tal d'alimentar els ponts de tiristors. Els ponts de tiristors A i B es troben connectats permanentment en antiparal·lel mitjançant un PCB que evita que es pugui canviar la polaritat i per tant només és necessari connectar l'induït del motor de corrent continu als dos connectors habilitats de l'equip de tiristors. La polaritat de l'induït queda indicada amb els colors vermell i negre en els connectors del PCB.

Pel que fa a la part de control, en la part inferior dreta hi ha dos connectors de comandes E/S que permeten comunicar la lògica de disparament de cada pont de tiristors amb un element de control extern com pot ser el CompactRIO. L'equip de tiristors pot funcionar manualment si no s'endollen els dos connectors de comandes E/S i es connecta un connector DB9 cec o bé funcionar de forma remota amb els dos connectors de comandes endollats. En aquest projecte el CompactRIO serà l'encarregat de donar les ordres a l'equip de tiristors, per tant sempre serà necessari endollar els dos connectors.

L'equip disposa d'un endoll per permetre la connexió d'un oscil·loscopi en cas de que sigui necessari. Per visualitzar els polsos que envia una de les plaques de disparament de tiristors a un dels tiristors del pont hi ha una etapa optoacoblada que aïlla les masses de l'equip i de l'oscil·loscopi per poder fer les mesures dels dispars simultàniament amb la tensió d'induit sense perill.

A continuació hi ha una taula resum de les diferents senyals que el CompactRIO ha de gestionar.

CONNECTOR	PIN	NOM	CONCEPTE
<b>DB9</b>	3	+12V	12V de la lògica de disparament de tiristors
	5	INHA	Inhibició del pont A ( si 12V inhibit)
	6	INHB	Inhibició del pont B (si 12V inhibit)
<b>Tripolar circular</b>	2	VB	Consigna de tensió del pont B
	1	VA	Consigna de tensió del pont A
	3	GND	Comú del mòdul

Taula 1.Connectors equip de tiristors

Es pot veure com s'han separat senyals digitals i analògiques en dos connectors diferents. Pel que fa a les entrades analògiques, es tracta només de les dos tensions de consigna dels ponts A i B per determinar-ne l'angle de cebat dels tiristors i arriben a l'equip mitjançant un connector tripolar circular.

En el connector DB9 hi ha les senyals digitals com són les inhibicions dels ponts. Aquestes inhibicions necessiten una tensió de 12V quan es vol inhibir els ponts i es deixen sense alimentar per desinhibir-los. La tensió de 12V encarregada de alimentar aquestes inhibicions

és una tensió que proporciona una de les plaques de la lògica de disparament de tiristors (en aquest cas la placa de disparament del pont A) i la decisió de quan aquesta tensió s'aplicarà o no a les inhibicions serà presa pel CompactRIO.

La part d'electrònica de potència amb els seus corresponents tiristors conformant els dos ponts en antiparal·lel (pont A i pont B) es pot assimilar a l'esquema que es mostra en la següent figura.

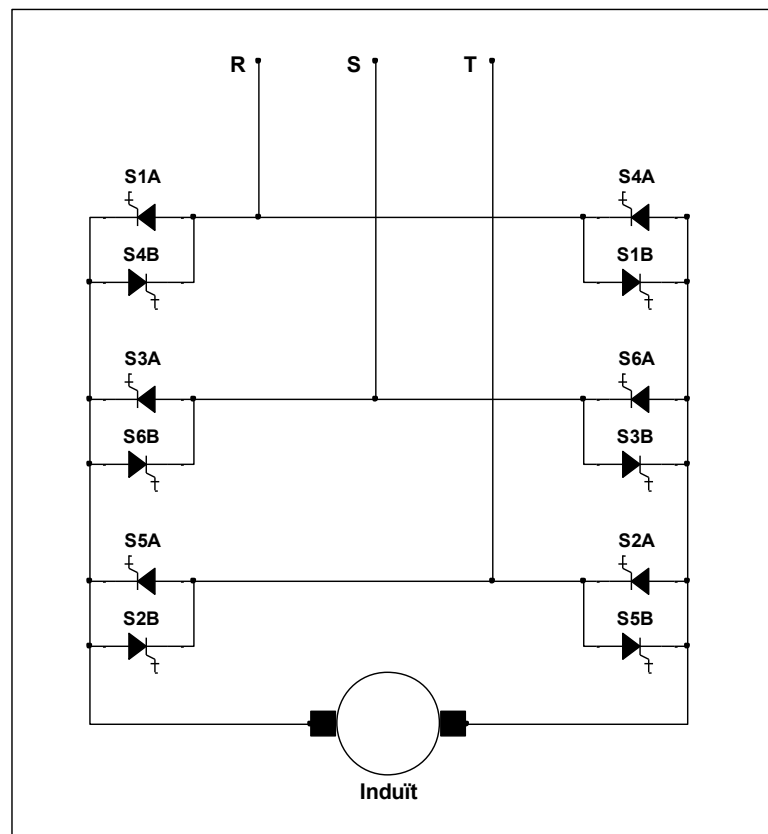


Figura 15. Connexió ponts A i B

D'aquesta manera quan s'accionin els sis tiristors del pont A (des de S1A fins a S6A) la tensió aplicada a l'induït del motor tindrà una polaritat determinada que farà circular intensitat d'acord amb aquesta polaritat i el motor girarà en un sentit determinat. Quan es faci treballar el pont B (des de S1B fins a S6B) aquesta tensió s'invertirà fent girar el motor en sentit contrari.

Pel que fa a la relació que hi ha entre l'angle de disparament dels tiristors ( $\alpha$ ) i la tensió d'induït del motor de corrent continu es pot determinar que la relació no és lineal i segueix la següent equació:

$$\overline{V_a} = \overline{V_{a\_max}} \cdot \cos \alpha \quad (\text{Eq. 9})$$

A continuació, hi ha una figura on es mostra gràficament la relació entre l'angle de cebat dels ponts de tiristors i la tensió d'induït de la màquina de corrent continu.

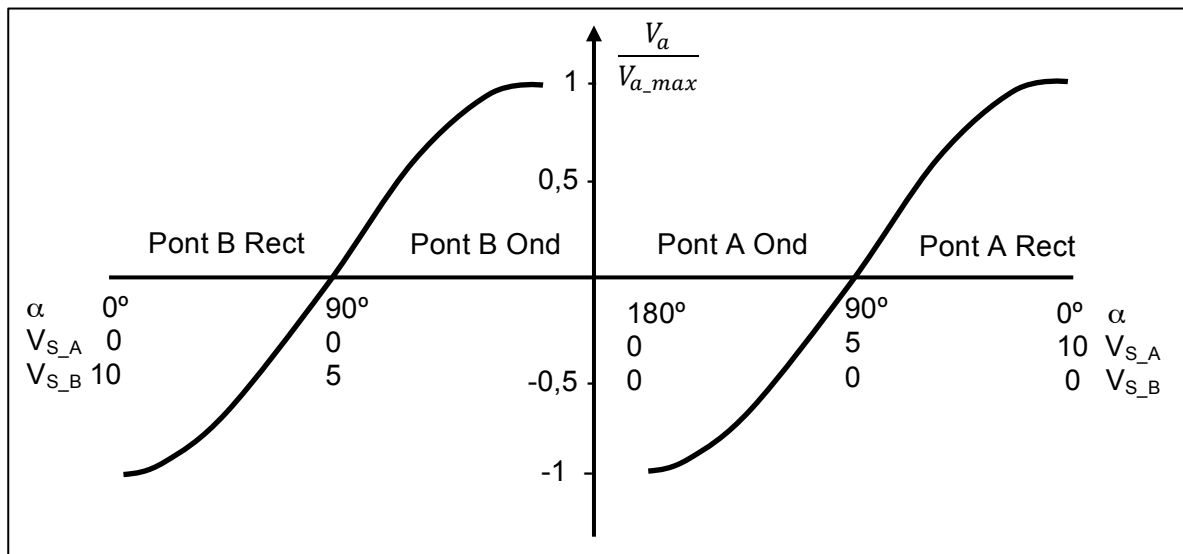


Figura 16. Angle de disparament dels tiristors

En aquesta figura es mostra l'angle de disparament en funció les dues entrades de tensió de 0-10V ( $V_{S_A}$  i  $V_{S_B}$ ) tot indicant quin pont treballa i si és rectificador o ondulator.

Val a dir que aquesta conversió la porta a terme la pròpia lògica de control de l'equip de tiristors, per tant en aquest projecte caldrà donar la consigna de tensió de 0-10V a un dels dos ponts per tal d'alimentar l'induït del motor de corrent continu. Tal com es veu en la figura anterior, una tensió de 5V representa un angle de 90° mentre que la tensió màxima de 10V representa un angle de 0°.

És evident que mai es poden alimentar els dos ponts simultàniament ja que s'estaria curtcircuitant els borns de l'induït del motor, per tant sempre que un pont es troba alimentat, l'altre ha de rebre 0V de consigna de tensió.

### 3.3 Motor brushless

Les tres aplicacions desenvolupades en aquest projecte impliquen la necessitat de disposar, acoblada a l'eix de la màquina de corrent continu, d'una màquina elèctrica rotativa que pugui treballar en els quatre quadrants. Per aquesta funció es disposa d'un servomotor brushless sinusoïdal que es descriurà en aquest apartat.

Les característiques d'aquest servomotor són les següents:


	<b>Marca i model</b>	MAVILOR MOTORS BLS114A
	<b>Tipus</b>	Brushless sinusoïdal
	<b>Parell nominal</b>	10,6 Nm
	<b>Parell de pic</b>	63,7 Nm
	<b>Intensitat nominal</b>	13,1 A
	<b>Kt</b>	0,81 Nm/A
	<b>IP</b>	65
	<b>Resolver</b>	2T8
	<b>Velocitat màxima</b>	8500 rpm

Figura 17. Característiques motor brushless

La gran diferència entre el parell de pic (63,7 Nm) i el parell nominal (10,6 Nm) indica que aquest motor permet realitzar grans acceleracions i frenades arribant a pics transitoris de sis vegades el parell nominal.

Aquest motor està equipat amb un resolver que determina la posició i la velocitat de l'eix del motor. Aquesta informació l'utilitza el seu driver de control per poder operar segons convingui.

El driver que controla aquest motor es tracta del controlador SMT-BD1 de la casa INFRANOR. Aquest controlador és capaç de fer una regulació de velocitat del brushless amb la informació provinent del resolver i aplicant un sistema de control vectorial amb limitació interna tant de velocitat com d'intensitat. Cal destacar que gràcies al control vectorial la intensitat i el parell són directament proporcionals, i la seva relació segons el fabricant del motor brushless és de 0,81 Nm/A.

La següent figura indica el quadrant de treball del motor brushless en funció de quin quadrant estigui treballant la màquina de corrent continu. Això és aplicable a la consecució de la segona aplicació (funcionament manual als quatre quadrants) i a la tercera aplicació (regulació en cascada de la velocitat del motor de corrent continu).

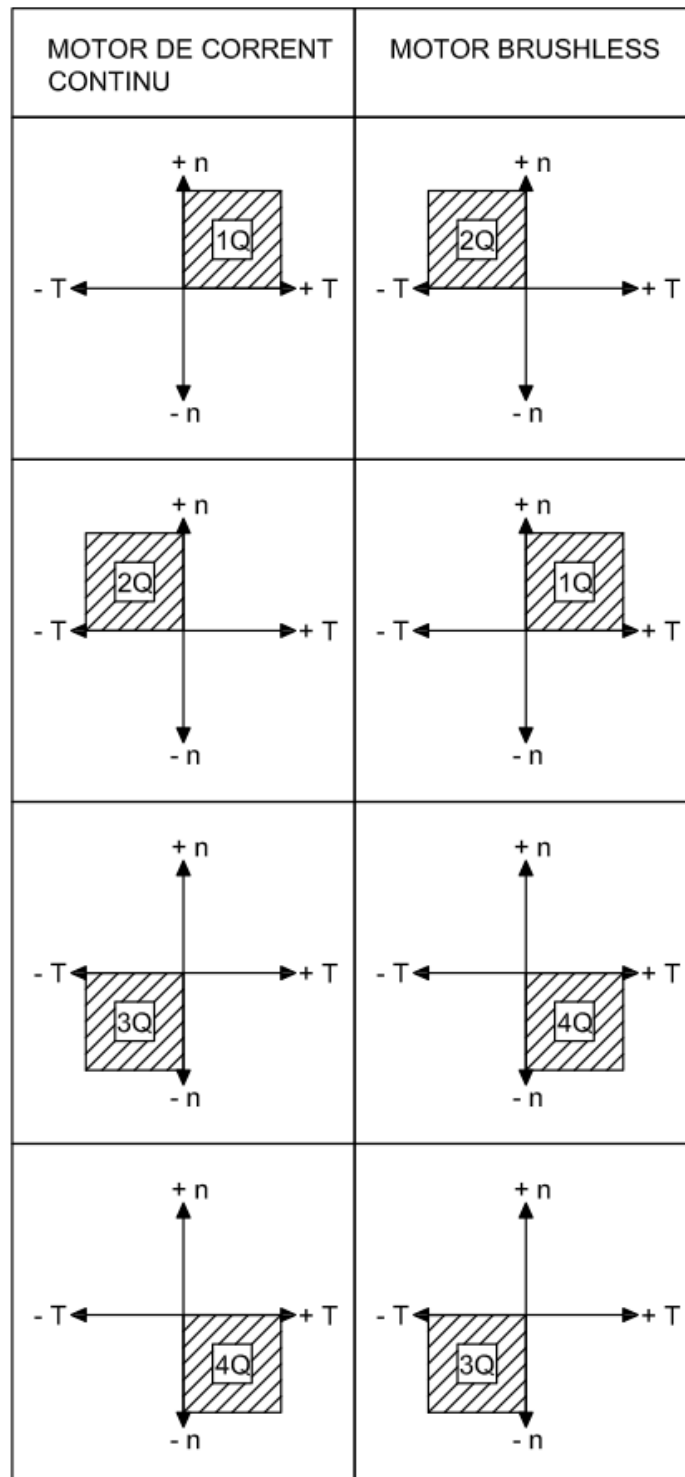


Figura 18. Quadrants de treball motor brushless



En el cas concret del sistema de regulació de velocitat en cascada del motor de corrent continu, la màquina brushless simula el comportament d'una càrrega mecànica. A través de les ordres del sistema de control implementat en el CompactRIO el driver de control d'aquest motor brushless el farà treballar com a generador en el 2n o 4t quadrant constituint així un sistema de fre de parell ajustable.

És necessària la utilització d'aquest sistema de fre per tal de poder realitzar un control real de la velocitat del motor de corrent continu. És evident que en un motor de corrent continu treballant en buit té poc sentit estudiar la regulació de la velocitat ja que la regulació és precisament la capacitat per mantenir una mateixa velocitat de rotació tot i variar la càrrega aplicada sobre l'eix. Per aquest raó, és imprescindible la utilització del motor brushless en aquest projecte.

El driver que incorpora aquest motor és l'encarregat d'alimentar el motor brushless amb un senyal sinusoidal amb freqüència modulada mitjançant PWM. Com més alta sigui la freqüència, més ràpid girarà el motor brushless.

A continuació hi ha les característiques bàsiques del driver de control del motor brushless sinusoidal:


	<b>Marca i model</b>	INFRANOR SMT-BD1
	<b>Tipus</b>	Controlador per a motor brushless
	<b>Alimentació</b>	220 VAC III
	<b>Tensió bus DC</b>	310 VDC
	<b>Freqüència PWM</b>	10 kHz
	<b>Rang de velocitats</b>	Ajustable de 100 rpm a 14000 rpm

Figura 19. Característiques driver Infranor

En aquest projecte s'utilitza el controlador per fer treballar el motor brushless en dos sistemes d'operació diferents. El primer sistema és fer treballar el brushless com a motor, de tal manera que es pot escollir externament velocitat de rotació i parell. Aquest sistema de funcionament només es farà servir en l'aplicació per estudiar el funcionament de la màquina de corrent continu en els quatre quadrants.

El segon sistema d'operació és el de fer treballar el brushless com a fre. Per això el sistema dissenyat dóna una consigna de velocitat igual a zero al controlador del brushless i es regula el parell de fre fixant mitjançant un senyal analògic d'entrada la intensitat límit de la màquina brushless. Si es determina una intensitat límit petita, la màquina brushless no podrà oposar gaire parell de fre en l'eix solidari amb el motor de corrent continu, en canvi si es permet una intensitat límit alta, el brushless serà capaç de generar un gran parell de fre. Aquest sistema és el que s'utilitzarà en l'aplicació de regulació de velocitat en cascada ja que la màquina brushless sempre farà de càrrega (parell de fre) i mai farà de motor.

Tot seguit es mostra una imatge de tots els connectors que té el controlador del motor brushless per poder realitzar el control de forma efectiva.

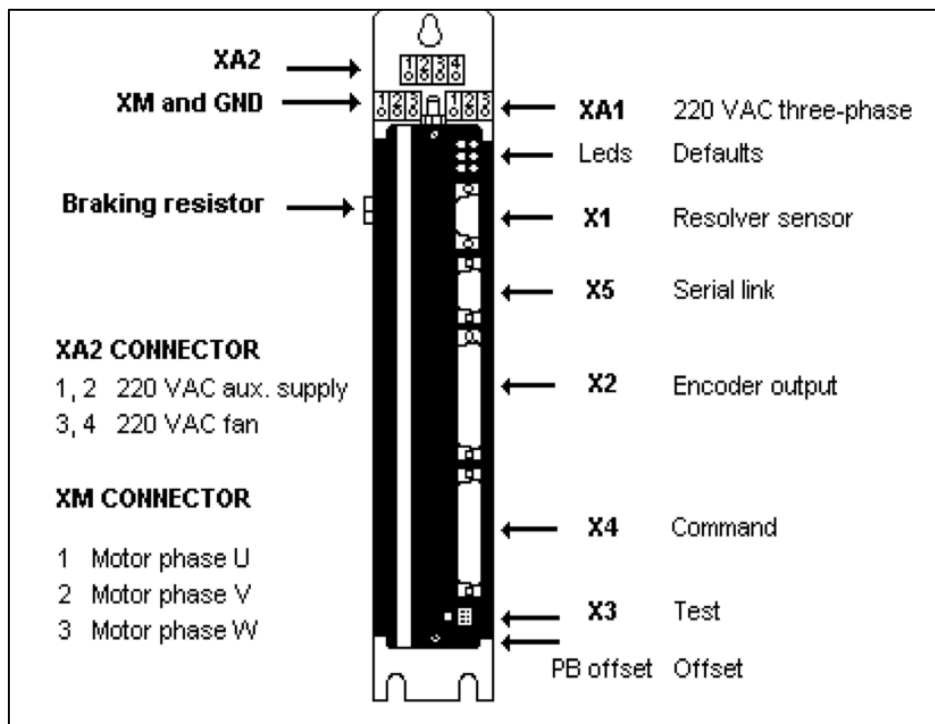


Figura 20. Connectors driver Infranor

El connector XM és el que alimenta el motor brushless (fases U,V,W) i el connector X1 rep la informació del sensor resolver que incorpora el motor brushless. Cal connectar el conductor de protecció de la instal·lació al GND del driver tal com indica el seu fabricant.

El connector XA1 és l'alimentació trifàsica de 230V del driver que el fabricant aconsella que provingui d'un transformador 230/230V que aïlli galvànicament el connexionat del driver amb la línia d'alimentació.

El connector XA2 és una alimentació auxiliar que requereix el driver de 220 VAC també provinent d'un transformador per tenir un aïllament galvànic alhora que alimenta un ventilador de refrigeració del propi controlador.

El connector X4 permet intercanviar informació entre el driver i un sistema de control extern. Incorpora entrades i sortides tant digitals com analògiques per poder donar i rebre instruccions amb el driver. Serà el connector utilitzat per comunicar el driver amb l'arquitectura NI CompactRIO.

El connector X5 és el port sèrie que permet la comunicació entre el driver i un ordinador extern. Amb el software instal·lat a l'ordinador es poden donar ordres al motor brushless mitjançant aquest connector. Al tractar-se d'un programa només compatible amb Windows 98 el seu ús ha quedat completament obsolet. Per altra banda, els connectors X2 i X3 del driver tampoc s'utilitzen en aquest projecte.

Hi ha un connector per a les resistències de frenat (Braking resistor), ja que el sistema de fre del motor brushless en casos de frenades fortes ha de dissipar l'energia generada amb les resistències per evitar sobreescalfaments del controlador. A diferència del motor de corrent continu, el motor brushless no retorna mai energia de frenat a la xarxa.

En aquest projecte s'utilitzen resistències de frenat instal·lades dins d'una xapa metàl·lica per tal de dissipar l'energia generada en el seu funcionament com a generador o fre evitant així el sobreescalfament de l'equip.

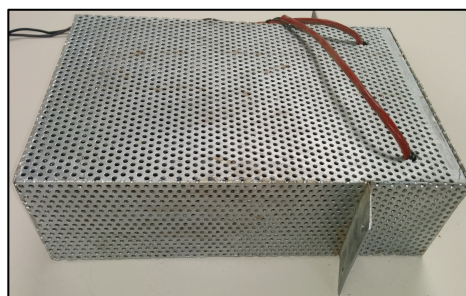


Figura 21. Resistències de frenat

Val a dir que un projectista anterior va dissenyar els circuits de potència i de maniobra que presenta el fabricant del driver en el seu manual d'usuari per tal de garantir el bon funcionament del controlador. Per tant, totes les connexions necessàries del driver ja estan realitzades i en aquest projecte s'utilitza el connector X4 per donar i rebre ordres del driver. A continuació, hi ha una figura que mostra l'automatisme que es va dissenyar en un projecte anterior per fer treballar el motor brushless amb el seu driver.

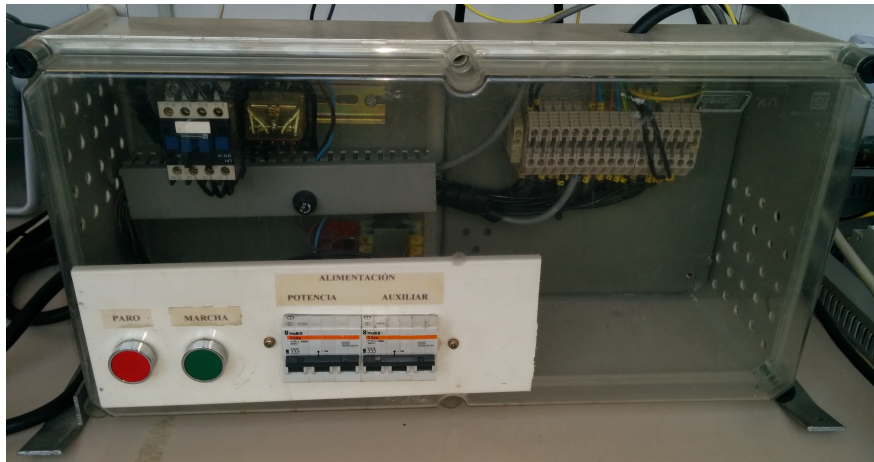


Figura 22. Automatisme brushless

Per fer treballar el motor brushless cal pujar el magnetotèrmic de l'automatisme i prémer el pulsador verd. Si tot està correcte, es tancarà un relé de verificació del propi driver i es posarà en marxa el motor al cap d'uns segons. Per ordenar al driver que aturi el motor cal prémer el pulsador vermell.

Com ja s'ha comentat prèviament, el connector que permet interaccionar entre el controlador i el programa del LabVIEW és el connector X4 (Command). Aquest connector té una sèrie d'entrades i sortides que es poden escriure o llegir externament per tal de controlar el funcionament del motor brushless des d'un dispositiu extern, en aquest cas el dispositiu serà el NI CompactRIO.

El connector X4 és un connector tipus DB25 per la qual cosa té un multicable també de vint-i-cinc conductors cadascun dels quals amb una funció determinada. Tanmateix, en aquest projecte només s'utilitzen dotze d'aquests conductors, per tant es deixa la resta sense connectar.

A continuació es mostra totes les entrades i sortides del connector X4 del driver que s'utilitzen en aquest projecte.

Pin	Color	Connectat	Funció	E/S	D/A	Comentaris
1	Marró-Groc	GND	Final de cursa +	E	D	OFF: Atura la rotació en sentit horari del motor
14	Vermell	GND	Final de cursa -	E	D	OFF: Atura la rotació en sentit antihorari del motor
24	Blanc-Gris	GND	0V finals de cursa	E	D	
20	Marró	GND	Marxa/Parada	E	D	ON: Marxa / OFF: Parada
7	Blau	Relé	CV0	E	D	Comanda de velocitat zero ON: fre / OFF: motor
17	Blanc-Negre	GND	CV+	E	A	± 10V entrada de velocitat -10V màx. Antihorari / 0V 0rpm / 10V màx. horari
16	Blanc-Marró	A02 (4)	CV-	E	A	
15	Groc-Blau	GND	0V Comanda CV	E	A	
3	Rosa	A03 (6)	I limit	E	A	Limitació de corrent externa 0V = parell màx. / 10V = parell mín.
10	Groc-Gris	AI0 (1)	Sortida del monitor de velocitat	S	A	± 8V per ± 14000 rpm; linealitat 10%; càrrega màx. 10 mA
18,19	Groc i Groc-Verd	Automatisme	Contacte del relé	S	D	Tancat si tot OK

Taula 2. E/S connector X4

Els més destacats són el pin CV0 que determina si el brushless actua com a fre (nivell alt) o com a motor (nivell baix) i les dues entrades analògiques de consigna de velocitat (CV) quan treballa com a motor i consigna de parell (I limit) quan treballa com a fre. També serà d'utilitat la sortida analògica del monitor de velocitat, per tal de tenir una mesura de velocitat de rotació de l'eix que es podrà comparar amb la de la dinamo tacomètrica i comprovar així el seu bon funcionament.

### 3.4 Sensors

En aquest apartat es descriuran les propietats dels dos sensors presents en la instal·lació. La informació d'aquests sensors resulta imprescindible per al funcionament del sistema i es requereixen unes mesures acurades i fiables. Aquests sensors poden introduir soroll al llaç de control de velocitat, per tant és interessant aconseguir unes mesures netes i lliures d'interferències per millorar el comportament del llaç de regulació en cascada de la velocitat del motor de corrent continu.

#### 3.4.1 Dinamo tacomètrica

El sistema de regulació necessita una mesura de la velocitat de rotació real de l'eix del motor, així que es disposa d'una dinamo tacomètrica solidària a l'eix i que donarà una tensió proporcional a la velocitat de rotació.

La dinamo està instal·lada en la part posterior del motor, acoblada a l'eix a través d'un sistema adequat per mantenir una bona transmissió del moviment i evitar qualsevol tipus de vibració i/o ressonància del mateix que pugui perjudicar el senyal que proporciona l'aparell. Les característiques més rellevants de la dinamo tacomètrica utilitzada són les següents:


	<b>Marca i model</b>	Telmag DT44E
	<b>Tipus</b>	Dinamo tacomètrica
	<b>Sortida</b>	60V DC per 1000 rpm
	<b>Grau de protecció</b>	IP 50

Figura 23. Característiques dinamo tacomètrica

Segons el fabricant, aquesta dinamo dona 60 V de tensió contínua per 1000 rpm per tant, doncs que el motor de corrent continu arriba fins a 2700 rpm, la tensió màxima que donarà la dinamo serà de 162 V.

S'ha comprovat experimentalment la relació V/rpm que indica el fabricant mitjançant les mesures preses per un tacòmetre per assegurar que aquest sensor realitza una lectura de velocitat fiable i real en tot moment.

### 3.4.2 Transductor d'intensitat

El sistema de regulació requereix una mesura d'intensitat d'induit ( $I_a$ ) i per tant és necessari utilitzar un transductor d'intensitat. Aquest transductor té les següents característiques:

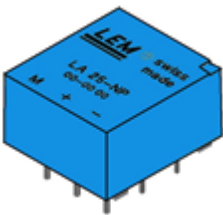
	<b>Marca i model</b>	LA 25-NP
	<b>Tipus</b>	Transductor d'intensitat d'efecte Hall
	<b>Alimentació</b>	$\pm 15$ VDC
	<b>Ratio conversió</b>	1-2-3-4-5 : 1000
	<b>Intensitat pr. nominal r.m.s. (<math>I_{PN}</math>)</b>	25 A
	<b>Intensitat sec. nominal r.m.s. (<math>I_{PN}</math>)</b>	25 mA
	<b>Precisió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

Figura 24. Característiques transductor d'intensitat

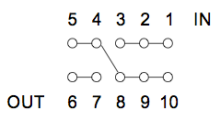
Aquest sensor requereix una alimentació simètrica de  $\pm 15$  VDC per tant serà necessari crear aquestes tensions en l'electrònica del sistema. També serà necessari condicionar la senyal de tensió que dona el sensor fins als rangs de tensió d'entrada dels mòduls d'adquisició de senyals analògiques del CompactRIO.

Aquest transductor compleix perfectament amb els requeriments del projecte, ja que es tracta d'un transductor precís per obtenir mesures d'intensitat fiables, però també és ràpid (amb un temps de resposta inferior al microsegon) per tal de permetre prendre mesures molt ràpidament per fer el càlcul de la senyal de control.

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, com que la intensitat nominal del motor de corrent continu és de 15 A s'ha decidit fer la connexió que permet una intensitat nominal de 12 A i una intensitat màxima de 18 A per tal de aprofitar tot el rang de mesures i millorar la resolució del transductor.

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 $K_N$	Resistè- ncia primari $R_P$ (m $\Omega$ )	Inductà- ncia primari $L_P$ ( $\mu$ H)	Connexionat
	Nominal $I_{PN}$ (A)	Màxima $I_P$ (A)					
2	12	18	24	2/100 0	1,1	0,09	

Taula 3. Paràmetres del sensor d'intensitat



## 4 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.

### 4.1 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 quatre mòduls: un mòdul d'entrades analògiques (NI 9205), un mòdul de sortides analògiques (NI 9263), un mòdul d'entrades digitals (NI 9421) i un mòdul de sortides digitals (NI 9401).


	<b>Marca i model</b>	NI CompactRIO 9074
	<b>Tipus</b>	Controlador integrat en Temps Real + FPGA
	<b>Alimentació</b>	19 – 30 VDC
	<b>Comunicació</b>	Ethernet
	<b>Freqüència CPU</b>	400 MHz
	<b>Sistema Operatiu</b>	Real-Time
	<b>FPGA</b>	Spartan-3
	<b>Consum de potència</b>	20 W
	<b>Pes</b>	929 g

Figura 25. característiques NI CompactRIO

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


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

Figura 26. Característiques font d'alimentació

La comunicació entre l'equip CompactRIO i l'ordinador s'estableix mitjançant un cable Ethernet que connecta directament els dos elements. També s'han configurat correctament les IP's d'ambdós aparells per tal de permetre una connexió satisfactòria.

En aquest projecte s'ha determinat que l'ús del nucli FPGA és imprescindible per aconseguir una bona regulació del motor. En Real-Time només es pot arribar a executar un codi de programa en períodes de pocs mil·lisegons. En el cas de la regulació en cascada del motor de corrent continu, la resposta del sistema de control ha de ser molt ràpida i requereix un càlcul del PID amb un període d'execució inferior al mil·lisegon (de l'ordre de 200 microsegons). Per aquesta raó, només en Real-Time el projecte no s'ha pogut desenvolupar i ha estat necessari implementar el càlcul del PID en 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 arxiu de bits que implementi físicament en FPGA el codi corresponent.

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


	<b>Marca i model</b>	NI PS-15
	<b>Tipus</b>	Spartan 3 2000
	<b>Cel·les lògiques equivalents</b>	46.080
	<b>LUTs/FFs</b>	40.960
	<b>Multiplicadors</b>	40
	<b>RAM (Kb)</b>	720

Figura 27. Característiques FPGA

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

Resumint, només s'ha de 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.

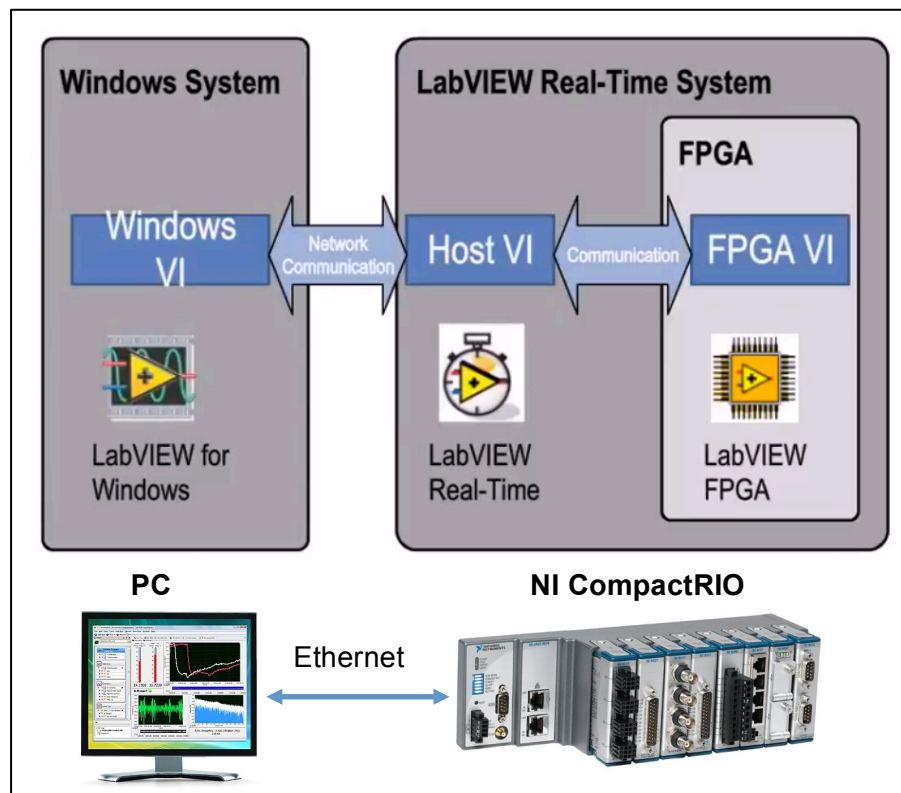


Figura 28. Interfície Windows + Real-Time

En aquest projecte, es té un programa executant-se dins el sistema operatiu Windows (Windows VI) i un programa 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.

## 4.2 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.

### 4.2.1 Mòdul NI 9205 d'entrades analògiques

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

	<b>Marca i model</b>	NI 9205
	<b>Tipus</b>	Mòdul d'entrades analògiques
	<b>Núm. d'entrades</b>	16 diferencials o 32 comunes
	<b>Resolució</b>	16 bits
	<b>Freq. de mostreig</b>	250 kS/s
	<b>Rangs d'entrada</b>	$\pm 200 \text{ mV}$ , $\pm 1 \text{ V}$ , $\pm 5 \text{ V}$ i $\pm 10 \text{ V}$

Figura 29. Característiques mòdul d'entrades analògiques

El mòdul d'entrades analògiques s'ha configurat per tenir entrades diferencials de manera que s'eliminin possibles interferències introduïdes en les mesures. Aquest mòdul permet obtenir una lectura de velocitat de rotació del motor de corrent continu gràcies a la senyal que dona la dinamo tacomètrica. També permet saber la intensitat que circula per l'induït mitjançant el transductor d'intensitat. Atès que el rang més gran de tensions d'entrada és de  $\pm 10 \text{ V}$ , caldrà condicionar el senyal provinent d'aquests dos sensors per tal d'aprofitar al màxim tot el rang de tensions. El controlador del motor brushless dona una sortida analògica

de velocitat de rotació a través del seu connector X4, de tal manera que es llegirà també aquesta senyal amb el mòdul NI 9205 per tal de comparar el seu valor amb la velocitat que indica la dinamo.

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

Canal	PIN	Funció
0	+ AI0 (1)	Sortida de monitor de velocitat del motor brushless
	- AI8 (19)	
1	+ AI1 (2)	Lectura de corrent d'induit del motor DC (transductor d'intensitat)
	- AI9 (20)	
2	+ AI2 (3)	Lectura de la velocitat de rotació del motor DC (dinamo tacomètrica)
	- AI10 (21)	
COM	17	Comú del mòdul

Taula 4. Relació d'entrades analògiques

#### 4.2.2 Mòdul NI 9263 de sortides analògiques

A continuació s'explicarà el mòdul de sortides analògiques NI9263.

	<b>Marca i model</b>	NI 9263
	<b>Tipus</b>	Mòdul de sortides analògiques
	<b>Núm. de sortides</b>	4 sortides actualitzades simultàniament
	<b>Resolució</b>	16 bits
	<b>Freq. de mostreig</b>	100 kS/s
	<b>Rang de sortida</b>	$\pm 10$ V

Figura 30. Característiques mòdul de sortides analògiques

El mòdul de sortides analògiques és l'encarregat de donar senyals de control a la lògica de control de l'equip de tiristors. Hi ha dues sortides analògiques que van de 0 a 10V cadascuna i corresponen a la tensió de control dels tiristors per tal de determinar quin dels dos ponts treballa i quin és l'angle de disparament. També calen dues sortides analògiques

per determinar dos paràmetres del motor brushless: la seva velocitat de rotació quan treballa com a motor i el seu parell de fre quan treballa com a fre. Aquests dos valors corresponen a dos entrades analògiques del connector X4 del seu controlador.

A continuació, hi ha una taula que mostra les sortides analògiques utilitzades i la seva funció. Cal remarcar que en aquest mòdul s'utilitza la totalitat de les sortides que ofereix (quatre sortides analògiques).

Canal	PIN	Funció
AO0	0	Tensió Vset del pont de tiristors A
AO1	2	Tensió Vset del pont de tiristors B
AO2	4	Velocitat de rotació del motor brushless (CV)
AO3	6	Parell del motor brushless (I límit)
COM	9	Comú del mòdul

Taula 5. Relació de sortides analògiques

#### 4.2.3 Mòdul NI 9401 d'entrades/sortides digitals

El tercer i últim mòdul utilitzat és el d'entrades i sortides digitals.


	<b>Marca i model</b>	NI 9401
	<b>Tipus</b>	Mòdul d'entrades/sortides digitals
	<b>Núm. d'entr/sort</b>	8
	<b>Nivells lògics de sortida</b>	OFF: 0,4 V màx ON: 4,30 – 5,25 V
	<b>Consum màxim</b>	580 mW màx

Figura 31. Característiques mòdul d'entrades/sortides digitals

El mòdul NI 9401 agrupa les entrades/sortides en dos grups (de 0 a 3 i de 4 a 7) de tal manera que permet configurar aquests grups de forma independent. Atès que en aquest projecte es necessiten entrades i sortides digitals, s'han configurat com a sortides digitals de la 0 a la 3 i com a entrades digitals de la 4 a la 7.

En quant a les sortides digitals, se'n necessiten dues per controlar les dues inhibicions dels ponts A i B de l'equip de disparament de tiristors. Com que el nivell alt del mòdul és d'aproximadament 5 V i segons el fabricant de l'equip de tiristors per activar les inhibicions és necessària una tensió de 7 a 16 VDC, serà necessària una etapa d'adaptació de senyals intermèdia.

Una altra sortida digital permet canviar el mode de funcionament del motor brushless entre motor i fre mitjançant una entrada digital del connector X4.

Pel que fa a les entrades digitals, s'ha de permetre la incorporació d'un polsador d'emergència normalment tancat. Aquest polsador de seguretat dona l'ordre d'aturar tot el procés i anar cap a un estat de seguretat quan l'usuari el premi. D'aquesta manera, s'incorpora un sistema físic de seguretat en el sistema de control. Per altra banda, també s'utilitza una entrada digital per detectar si l'excitació del motor de corrent continu està alimentada o no. En cas negatiu, l'entrada digital permet al programa actuar de forma ràpida i anar cap a un estat de seguretat.

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

Canal	E/S	PIN	Funció
DIO0	S	14	Contacte CV0 del motor brushless
DIO1	S	16	Inhibidor del pont de tiristors A
DIO2	S	17	Inhibidor del pont de tiristors B
DIO4	E	20	Polsador d'emergència NC
DIO5	E	22	Detector d'intensitat d'excitació
COM	-	1	Comú del mòdul

Taula 6. Relació d'entrades/sortides digitals

## 5 INTERFÍCIE DE CONDICIONAMENT DE SENYALS

En aquest capítol es descriurà tota l'electrònica necessària per permetre la comunicació entre els diferents equips de la instal·lació i el sistema de control CompactRIO que és l'encarregat de governar el funcionament de tot el conjunt.

### 5.1 Adquisició d'entrades analògiques

L'adquisició de senyals analògiques fa referència a les mesures de velocitat i d'intensitat que donen els respectius sensors i que es necessiten condicionar per tal de poder ser llegides pel mòdul d'entrades analògiques del CompactRIO que permet un rang d'entrada de tensions de  $\pm 10\text{V}$ .

#### 5.1.1 Mesura de velocitat

Pel que fa la a mesura de velocitat, la dinamo donarà una tensió entre  $162\text{V}$  i  $-162\text{V}$  que caldrà condicionar. La figura següent mostra les etapes de condicionament de la mesura de velocitat.

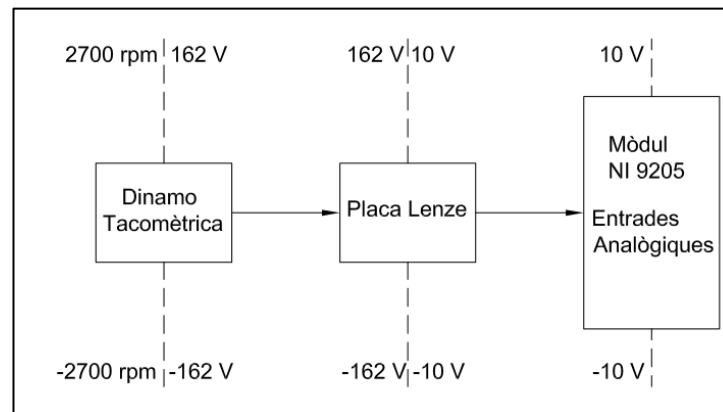


Figura 32. Etapes de condicionament mesura velocitat

S'ha decidit aprofitar una placa electrònica de la casa Lenze per a realitzar el condicionament de la senyal provinent de la dinamo tacomètrica. Aquesta placa s'ha utilitzat durant molts anys per a condicionar la senyal de la dinamo tacomètrica i els resultats sempre han estat satisfactoris. La placa converteix l'entrada de tensió de la dinamo en una tensió entre  $-10$  i  $10\text{V}$  mitjançant una etapa d'optoacobladors linealitzada que ofereix un



aïllament galvànic entre l'entrada i la sortida. Aquesta placa necessita alimentació de 230V per a funcionar. A continuació hi ha una figura on es destaquen les seves principals característiques.


	<b>Marca i model</b>	Lenze 2008
	<b>Tipus</b>	Placa de condicionament amb aïllament galvànic
	<b>Alimentació</b>	230 VAC
	<b>Tensions d'entrada</b>	Desde $\pm 10V$ fins a $\pm 180 V$
	<b>Tensions de sortida</b>	Fins a $\pm 10V$
	<b>Corrent màxim de sortida</b>	5 mA
	<b>Amplificació</b>	Guany desde 1/20 fins a 1'2

Figura 33. Característiques placa de condicionament Lenze

Per a l'ajust del guany es disposa de dos potenciòmetres (un d'ajust gruixut i l'altre d'ajust fi) per ajustar el guany de la placa a un valor desitjat. En aquest projecte, per ajustar el guany d'aquesta etapa s'ha fet girar el motor a la seva velocitat nominal de 2700 rpm (es mesura la velocitat de rotació de l'eix amb un tacòmetre) i s'ha vist que la dinamo donava 162V de tensió. Amb aquesta entrada de tensió a la placa de condicionament Lenze, s'han ajustat els potenciòmetres per tal de que la sortida fos de 10V. D'aquesta manera, s'aprofita tot el rang d'entrada de tensió ( $-10V$  a  $10V$ ) del mòdul d'entrades digitals en la mesura de la velocitat de rotació.

Aquesta placa de condicionament amb aïllament galvànic es situarà dins la interfície de condicionament de senyals juntament amb la resta de circuits electrònics.

### 5.1.2 Mesura d'intensitat

La mesura d'intensitat d'induït ( $I_a$ ) realitzada pel sensor d'intensitat per efecte Hall LA25NP necessita un condicionament de senyal per amplificar-la fins al rang de tensions d'entrada del mòdul d'entrades analògiques del CompactRIO.

El sensor d'efecte Hall LA25NP genera una tensió proporcional a la intensitat que circula pel seu circuit primari. En el capítol 3.4.2 Transductor d'intensitat s'expliquen les característiques d'aquest sensor i les connexions necessàries en els seus terminals per tenir una resolució d'intensitat adequada per a mesurar la intensitat de l'induït del motor.

La figura següent mostra les etapes de condicionament de la mesura d'intensitat.

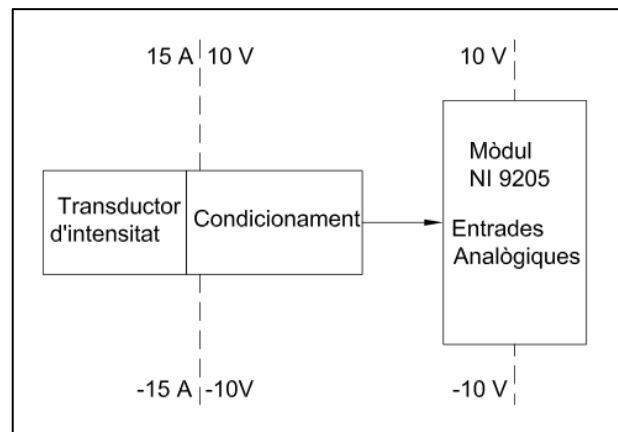


Figura 34. Etapes de condicionament mesura intensitat

A continuació es mostra el circuit de condicionament dissenyat per tenir una lectura de tensió proporcional a la intensitat i que sigui de 10V per 15A i de -10V per -15A.

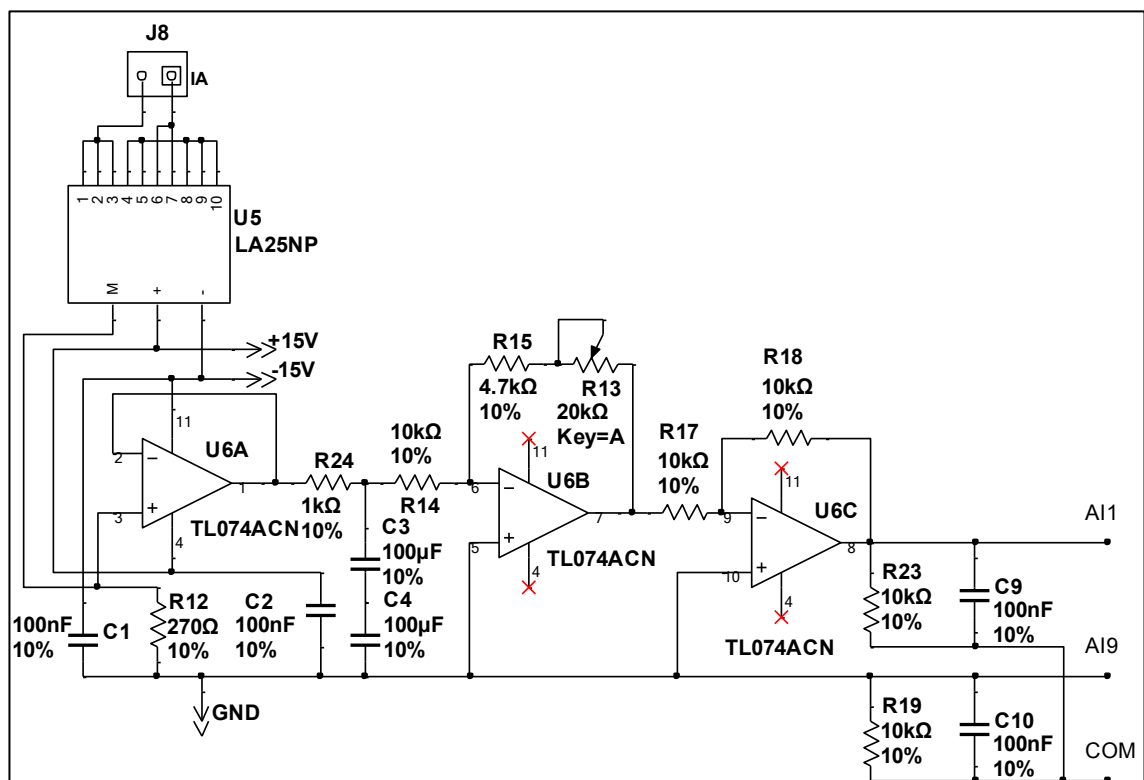


Figura 35. Esquemàtic condicionament mesura d'intensitat

Inicialment es col·loca un circuit seguidor U6A per augmentar la impedància d'entrada de l'etapa. A continuació, hi ha un filtre RC pas baix per filtrar la senyal polsant que mesura el sensor d'efecte Hall i convertir-la en una tensió contínua. Aquest filtre està format per dos condensadors electrolítics en antiparal·lel (C3 i C4) per tal de poder filtrar la senyal polsant en les dues polaritats.

Finalment es troba amb un amplificador inversor de guany variable U6B. Aquest guany es varia mitjançant el potenciòmetre R13 de tal manera que permet variar el guany per sobre i per sota la unitat. Per acabar, hi ha un inversor de guany unitari U6C 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 $\Omega$  i un condensador de 100 nF.

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

Per ajustar el potenciòmetre de guany s'ha fet circular 15 A per l'induït del motor mesurats amb un amperímetre. 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 en poques ocasions s'arribarà a fer circular els 15 A nominals d'intensitat d'induït, per tant s'ha optat per una configuració del transductor d'intensitat que mesuri fins a 12 A nominals amb màxims de fins a 18 A és adequada per aquesta aplicació.

Cal destacar que el transductor d'intensitat ha d'estar en sèrie amb el circuit d'induït, per tant la connexió entre el pont de tiristors i l'induït del motor ha de contemplar aquesta possibilitat. En la figura que hi ha a continuació, s'exemplifica aquesta situació.

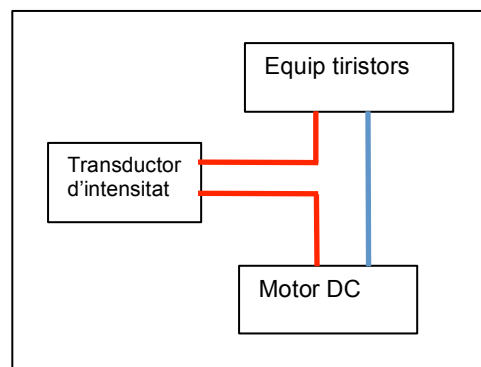


Figura 36. Connexió transductor d'intensitat

## 5.2 Condicionament de sortides analògiques

Les sortides analògiques del mòdul NI 9263 del CompactRIO (0-10V) van directament als elements de destí sense cap condicionament intermedi. Això és degut al fet que, tant les senyals analògiques de referència de cada placa de disparament de tiristors (VA i VB) com les entrades de consigna de velocitat (CV) i parell (I LIM) del driver del motor brushless tenen un rang de funcionament de 0 a 10V. Per tant, atès que les sortides analògiques del mòdul permeten aquest rang de tensions, s'aprofita tot el rang de sortida sense necessitat d'etapes amplificadores de tensió.

En aquest cas doncs, la interfície de condicionament i adaptació de senyals no realitza cap més funció que la de conduir les senyals analògiques que li entren cap a la sortida corresponent. D'aquesta manera, connectant el mòdul NI 9263, l'equip de tiristors i el driver Infranor a la interfície les connexions queden realitzades satisfactòriament.

A continuació hi ha una figura que mostra com queden connectades les sortides analògiques d'aquest projecte.

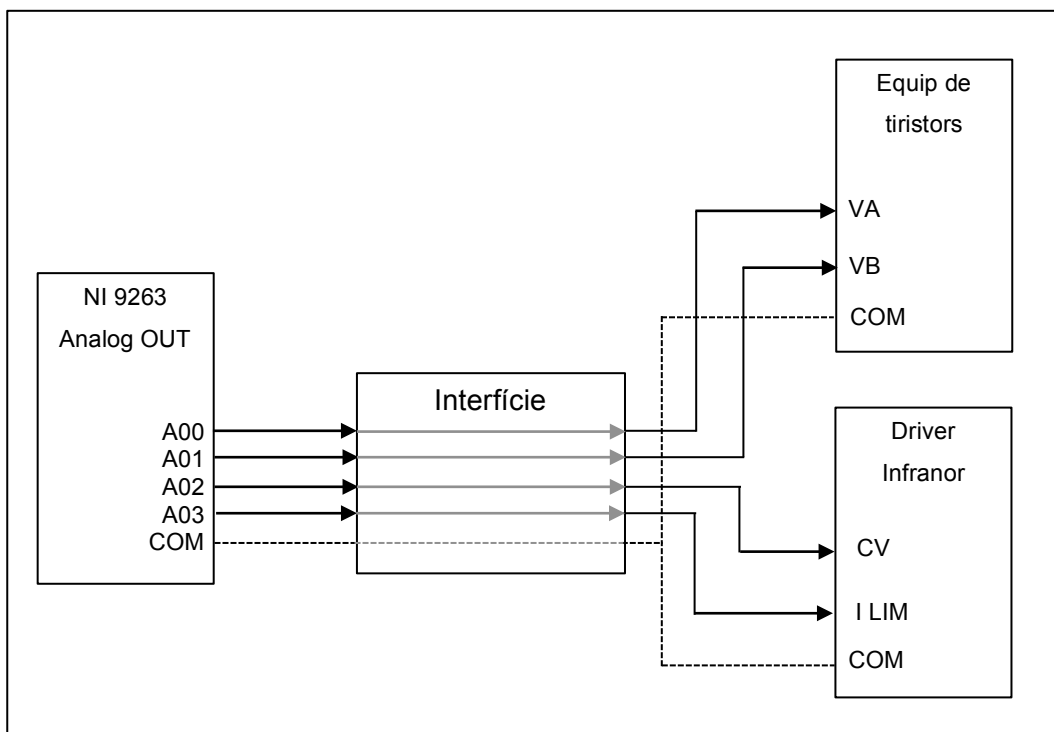


Figura 37. Connexions sortides analògiques

### 5.3 Adquisició d'entrades digitals

Les entrades digitals d'aquest projecte són dues: el pulsador d'emergència normalment tancat i el relé que detecta quan l'excitació està alimentada.

El mòdul d'entrades/sortides digitals considera que una entrada digital està a nivell alt quan la tensió que té es troba entre 2 i 5,25V. Per aquesta raó, cal un sistema amb font d'alimentació que proporcioni una tensió dins d'aquest rang. HI ha la tensió proporcionada per la font d'alimentació de la placa, de +15V, però s'ha de mantenir l'aïllament galvànic entre la massa de la font i la massa del mòdul d'entrades/sortides digitals, ja que sinó el sistema d'optoacobladors dissenyat per a les sortides digitals que s'explica en l'apartat 5.4 perdria el seu aïllament al quedar les dues masses ajuntades. Davant d'aquesta necessitat, s'ha decidit incorporar un petit convertidor contínua-contínua que s'alimenta a 15V i dóna una sortida de 5V amb una massa aïllada de la massa de la font d'alimentació.

Les dues entrades tenen una resistència en paral·lel per referenciar l'entrada a massa quan el contacte està obert i fer treballar el convertidor amb certa intensitat quan es tanquen els contactes.

En la figura següent es mostra un esquemàtic de les entrades digitals al mòdul corresponent.

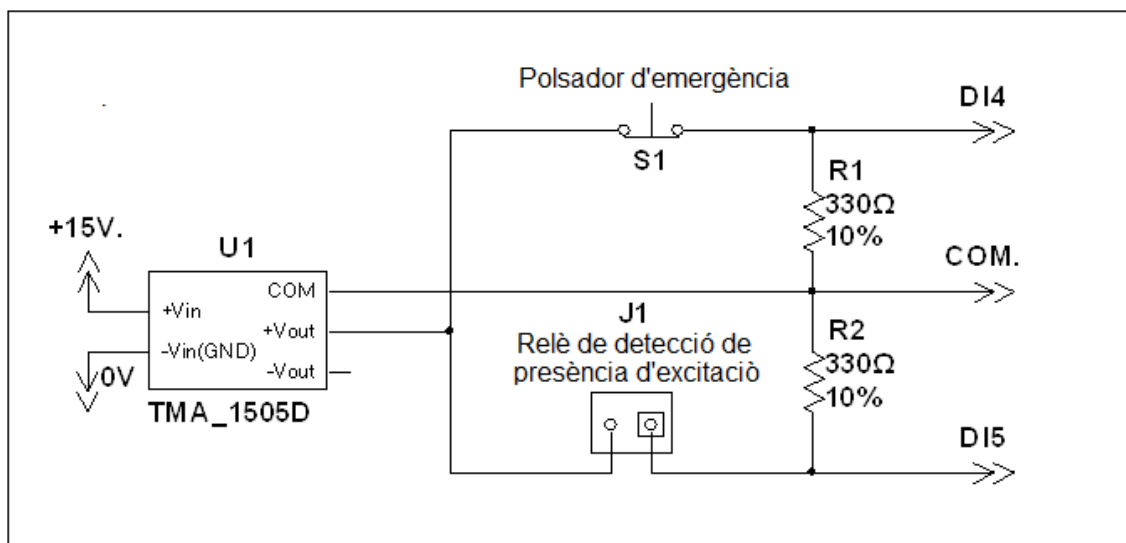


Figura 38. Esquemàtic d'entrades digitals

### 5.3.1 Polsador d'emergència

En el cas del polsador d'emergència, al ser un accionament físic que executa l'usuari al prémer el polsador, l'electrònica associada al polsador queda reduïda a una alimentació de 5V provinent del convertidor contínua-contínua i una resistència per referenciar l'entrada del mòdul digital a massa.

Cal dir que el polsador d'emergència escollit és normalment tancat, de tal manera que si per alguna raó el polsador no funcionés correctament i quedés obert el sistema quedaria assabentat instantàniament. Tanmateix, també podria quedar malmès el polsador fent contacte i que en polsar no tallés el camí, per tant és aconsellable comprovar el polsador d'emergència el primer cop que s'utilitzi el sistema per assegurar que actuarà correctament en una situació real d'emergència.

### 5.3.2 Detecció de l'alimentació de l'excitació

Cal remarcar que el debanat d'excitació és una part essencial del motor de corrent continu, de tal manera que si en algun moment, per la raó que sigui, l'excitació deixa d'estar alimentada, la intensitat del debanat d'induït serà elevada i l'equip de tiristors i el motor poden patir greus danys si no es bloqueja de forma immediata l'alimentació de l'induït. Per tant, cal dissenyar un sistema de detecció de l'excitació que indiqui si hi ha o no alimentació. Es tracta d'una senyal digital de tot o res indicant si efectivament hi circula o no intensitat per l'excitació.

En la figura de la pàgina anterior es veu que en aquest cas, en comptes de tenir un polsador físic, es té un contacte de relé lliure de potencial. Per tant, l'electrònica utilitzada per indicar-li al mòdul d'entrades digitals de que el relé ha tancat és la mateixa que s'ha utilitzat en el cas del polsador d'emergència: una alimentació de 5V provinent del convertidor contínua-contínua i una resistència per referenciar l'entrada del mòdul digital a massa.

Tanmateix, s'ha dissenyat un sistema de detecció de l'excitació que ha de ser l'encarregat de tancar el contacte del relé quan hi l'excitació del motor de corrent continu estigui alimentada i ha d'obrir el contacte del relé quan no estigui alimentada.

En la figura següent es mostra el circuit d'excitació amb el pont rectificador i es mostra el sistema de detecció de l'excitació.

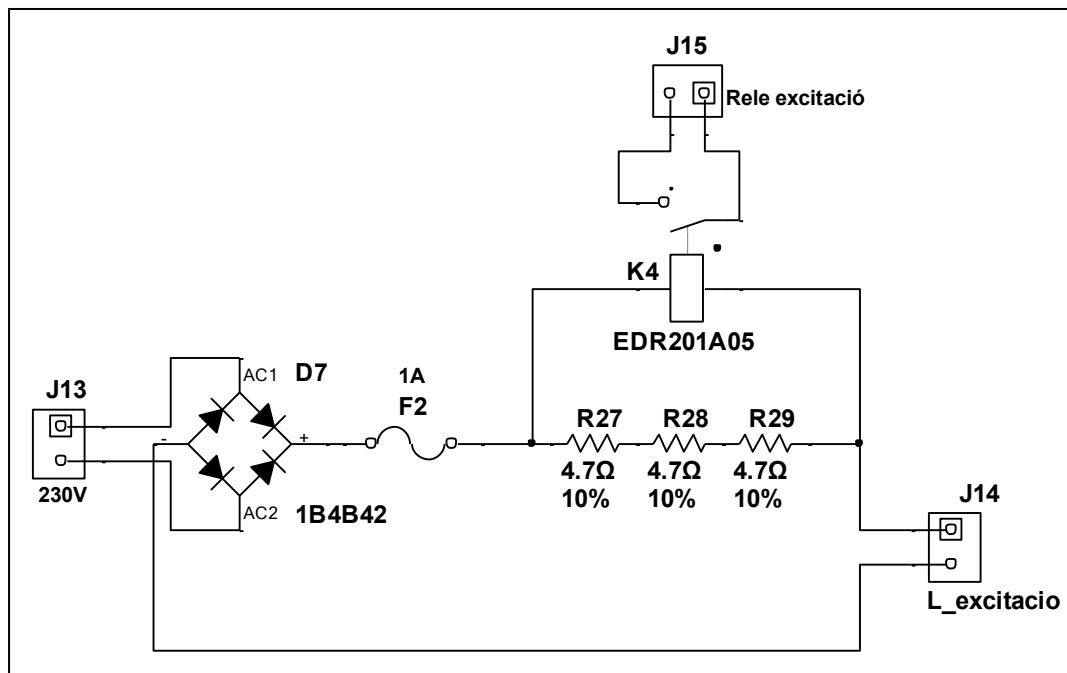


Figura 39. Esquemàtic del sistema de detecció de l'excitació

En la figura anterior es veu com en sèrie amb l'excitació hi ha tres resistències de potència de  $4,7\Omega$  cadascuna, de tal manera que al circular-hi els 400 mA nominal d'intensitat, provoquen una caiguda de tensió total d'aproximadament 6V. Aquesta caiguda de tensió alimenta la bobina d'un relé de 6V de tensió nominal, de tal manera que si circula la intensitat nominal per l'excitació, el relé queda alimentat i tanca el seu contacte. Aquesta senyal digital del relé acaba entrant al mòdul d'entrades digitals del CompactRIO per tenir informació de l'estat de l'excitació.

Cal destacar que s'han utilitzat tres resistències en sèrie de  $4,7\Omega$  en comptes d'una sola resistència de  $15\Omega$  per tal de reduir-ne el seu escalfament. Com més elevada és la resistència, més potència dissipa al passar-hi els 400 mA de l'excitació, per tant, per evitar sobreescalfaments perillosos en la placa de l'excitació, s'ha decidit posar resistències de menys valor òhmic en sèrie. També s'ha valorat quina solució escollir segons la disponibilitat del material del laboratori.

És evident que els 6V de tensió que cauen en les resistències és una tensió que es perd pel que fa a la alimentació de l'excitació. Tanmateix, al tractar-se d'un valor mig de 207V, la pèrdua de 6V de tensió no resulta significativa. És més, segons el fabricant, la tensió nominal de l'excitació és de 195VDC per tant encara ens acostem més a aquest valor nominal de tensió.

#### **5.4 Condicionament de sortides digitals**

Les tres sortides digitals del mòdul NI 9401 corresponen a entrades digitals de l'equip de tiristors i del driver de control del servomotor bushless Infranor, que convenen que siguin activades mitjançant un contacte lliure de tensió. Per això s'ha dissenyat un circuit de condicionament que compta amb un relé per cada una de les tres sortides del mòdul NI 9401 implicades.

Les tres sortides digitals del CompactRIO tenen una electrònica comuna, que consta d'un optoacoblador que aïlla galvànicament el mòdul de sortides digitals de la resta de la electrònica i d'un transistor BC547C que s'encarrega d'alimentar la bobina del relé, alliberant així el mòdul de sortides digitals d'haver de subministrar els 10 mA d'intensitat que consumeix la bobina. Llavors, el contacte del relé tanca en cada cas un circuit diferent. S'ha connectat en antiparal·lel amb la bobina del relé un díode volant per tal d'evitar els sobrepics de tensió (i malmetre el circuit) al desactivar el relé.

En el cas de la sortida DO0 del mòdul, s'encarrega de comandar l'entrada digital CV0 del connector X4 del driver Infranor, de tal manera que al tancar el contacte del relé, el contacte CV0 queda connectat a la massa corresponent del connector Infranor.

Per altra banda, les altres dues sortides digitals del mòdul NI 9401 (DO1 i DO2) controlen les inhibicions del pont de tiristors (INHA i INHB). Com que per activar les inhibicions es necessiten entre 8 i 16V de tensió, s'ha optat per utilitzar les tensions que ens ofereixen les plaques electròniques del disparament de tiristors de tal manera que els relés de cada sortida al tancar-se apliquen la tensió de 12V procedent de l'equip de tiristors a l'entrada d'inhibició corresponent. En activar el relé s'està inhibint el pont de tiristors corresponent, impedit que la placa de tiristors generi polsos de disparament.



A continuació hi ha una figura que mostra l'etapa amb relé descrita anteriorment.

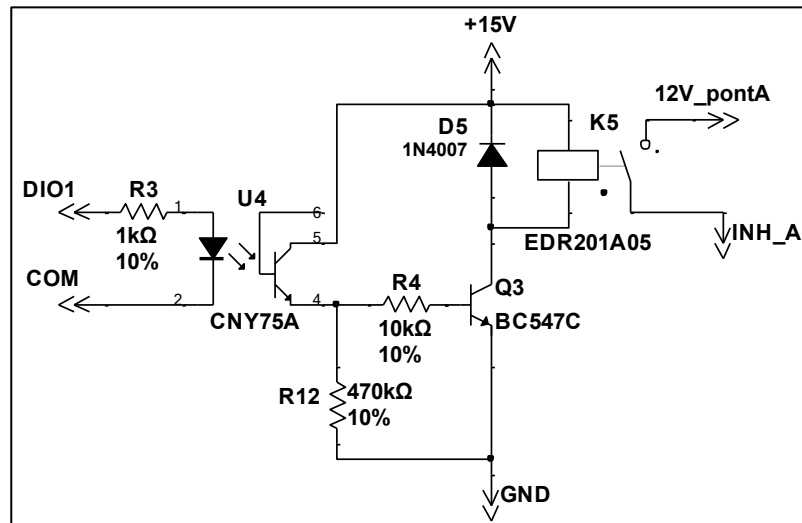


Figura 40. Esquemàtic de l'etapa de sortida digital amb relé

S'ha calculat la resistència del transistor ( $R_4$ ) per tal de fer-lo treballar en saturació o tall (tot o res). Segons els fabricants del transistor i del relé, es sap que  $\beta = 600$  i que la bobina del relé consumeix  $I_C = 10 \text{ mA}$

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad (\text{Eq. 10})$$

$$V_{CC} = I_B \cdot R_4 + 0,7 \quad (\text{Eq. 11})$$

De l'equació 10 es troba que  $I_B = 0,017 \text{ mA}$ . I llavors amb l'equació 11 es troba  $R_4 = 858 \text{ k}\Omega$

Per saturar el transistor la resistència de base  $R_4$  ha de ser inferior a  $858 \text{ k}\Omega$ , per tant s'ha escollit una resistència de  $10 \text{ k}\Omega$ . Cal comentar que en el cas de requerir-se una commutació ràpida del transistor, no seria adequat col·locar una resistència tant baixa, ja que provocaria una saturació excessiva del transistor dificultant la commutació a l'estat de tall. Tanmateix, en aquest cas, al tractar-se de l'activació de les inhibicions on no es necessita commutar ràpidament a l'estat de desinhibició, es considera que la resistència de  $10 \text{ k}\Omega$  no presenta cap inconvenient.

## 5.5 Alimentació

Tota l'electrònica que intervé en el projecte requereix d'alimentació contínua de  $\pm 15$  V, per tant serà necessària la realització d'una font d'alimentació simètrica de 15V que sigui capaç d'alimentar de forma contínua tota l'electrònica del projecte.

A continuació es mostra l'esquemàtic de la font d'alimentació dissenyada.

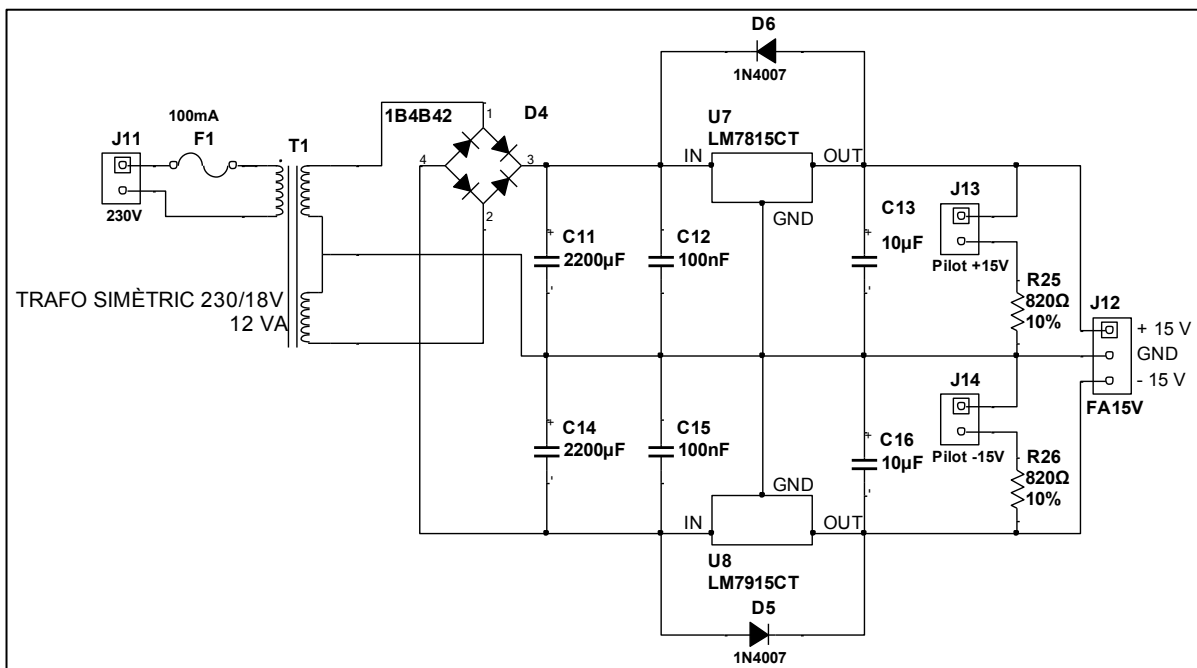


Figura 41. Esquemàtic font d'alimentació

S'ha col·locat un fusible de 100 mA en el primari del transformador simètric com a sistema de protecció contra sobreintensitats en l'alimentació.

S'ha fet una estimació del consum de l'electrònica del projecte utilitzant la informació dels fulls de característiques dels fabricants i mesures de corrent reals realitzades en els propis circuits. S'estima que el consum total arriba fins a 250 mA aproximadament. Per aquesta raó, s'ha escollit un transformador de 12VA que permetria fins a uns 600 mA aproximadament, de tal manera que si és necessària una futura ampliació de l'electrònica del projecte, l'alimentació té marge per alimentar més circuits.

## 5.6 Panell d'usuari

A continuació, hi ha una figura de la cara superior de la caixa de projectes que incorpora totes les interfícies de condicionament de senyals de tal manera que mostra els diferents pulsadors, interruptors, indicadors i connectors de què disposa la plataforma.

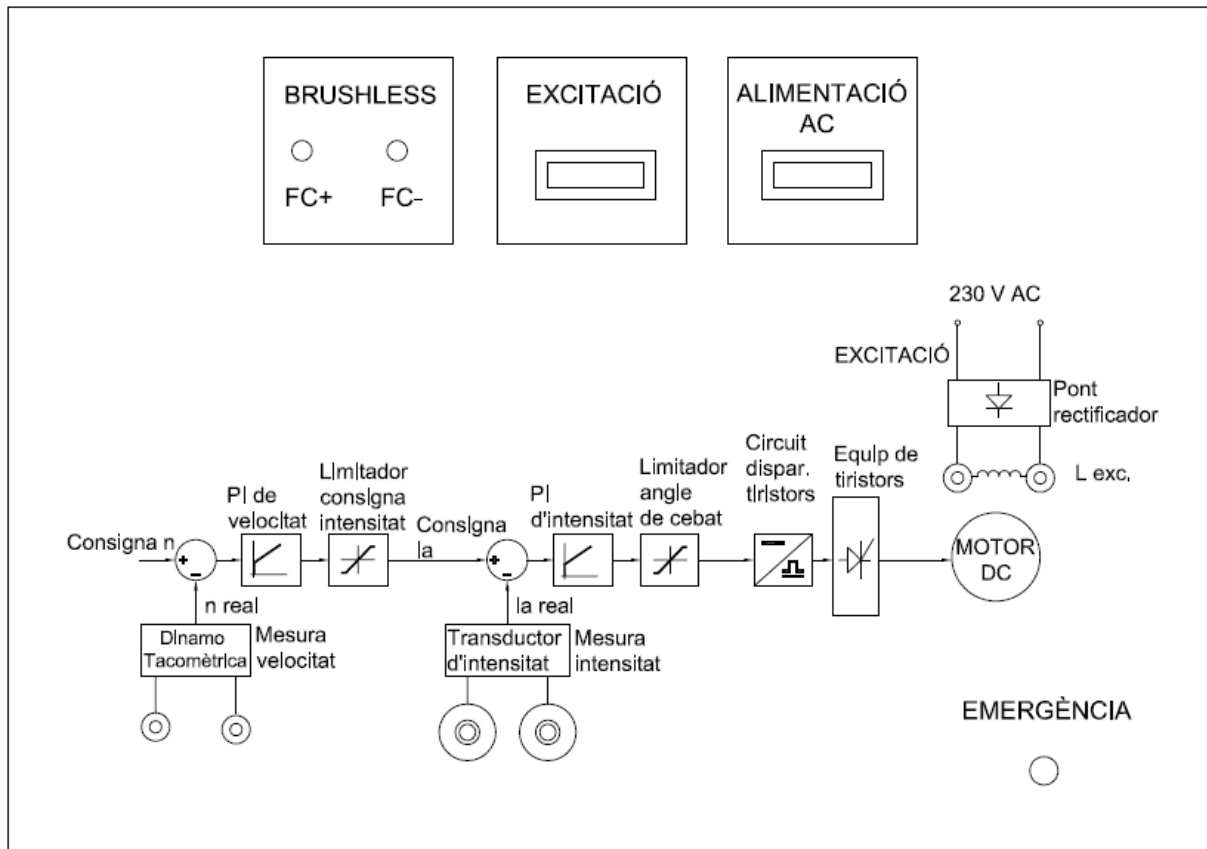


Figura 42. Panell d'usuari

La plataforma requereix que l'usuari faci tres connexions manuals mitjançant els connectors de tipus banana de 2 o 4 mm segons la connexió. Es tracta de la connexió de l'alimentació del debanat de l'excitació i les realimentacions del control en cascada (dínamo tacomètrica i intensitat d'induït).

Pel que fa als cables procedents del motor (excitació i induït), aquests estan directament connectats al motor en la seva caixa de bornes i per tant només caldrà connectar directament l'excitació i la mesura d'intensitat de l'induït on correspongui del panell d'usuari. Els dos cables són cables bifilars amb coberta de plàstic aïllant i secció de 2'5mm<sup>2</sup>.

L'usuari pot activar/desactivar l'alimentació de tota l'electrònica mitjançant un interruptor ON/OFF situat a la part dreta superior de la plataforma. L'altre interruptor ON/OFF de què disposa l'usuari és el que permet desconnectar l'excitació de forma manual. Aquest interruptor s'utilitzarà quan es vulgui fer la sintonització del PI d'intensitat d'induït i permetrà treure l'excitació sense necessitat de desconnectar cap cable. També pot servir per veure com actua la seguretat de detecció d'excitació en funcionament normal del motor. L'usuari pot veure si l'alimentació i/o l'excitació està alimentada mitjançant l'indicador LED lluminós de color verd que incorpora el propi interruptor.

El servomotor brushless s'utilitza molt per sistemes de control d'eixos. En aquest tipus d'accionaments és recomanable disposar d'un sistema de parada que pari immediatament el motor quant en el seu desplaçament lineal l'eix associat al motor ha arribat a qualsevol de les dues posicions extremes. Per això el driver de control del motor brushless té dues entrades digitals que en cas necessari permeten a l'usuari connectar dos fi de cursa. L'activació de qualsevol d'aquestes dues entrades provoca la parada immediata del motor. En el panell d'usuari del projecte es disposa de dos polsadors normalment tancats per simular el comportament d'aquests dos suposats final de cursa en un sentit i en l'altre. Quan es prem un dels polsadors, es simula que el motor brushless ha arribat a un final de cursa i s'atura immediatament. Aquests polsadors només s'utilitzen en el programa de funcionament manual del motor brushless per parar el motor quan l'usuari vulgui. L'objectiu és que en la pràctica del motor brushless es pugui mostrar des del punt de vista didàctic aquesta funció de parada immediata que incorpora el driver del motor brushless.

Finalment, en la part inferior dreta de la plataforma, hi ha el polsador d'emergència normalment tancat que l'usuari pot prémer en cas de situació anòmla o perillosa i que provocarà una aturada immediata de tot el sistema.

## **5.7 Cablejat d'interconnexió**

En aquest apartat es detallarà les diferents connexions de la interfície de condicionament de senyals. En l'apartat anterior ja s'ha esmentat la necessitat de connectar la dinamo tacomètrica, la mesura d'intensitat d'induït i l'excitació del motor en la tapa superior de la caixa. En aquest apartat es parla de les connexions posteriors de la interfície amb la resta d'elements del sistema, com podria ser el CompactRIO, el driver Infranor que controla el motor brushless o l'equip de disparament de tiristors.

A continuació, hi ha una figura que mostra gràficament les connexions que requereix la interfície de condicionament de senyals per funcionar correctament.

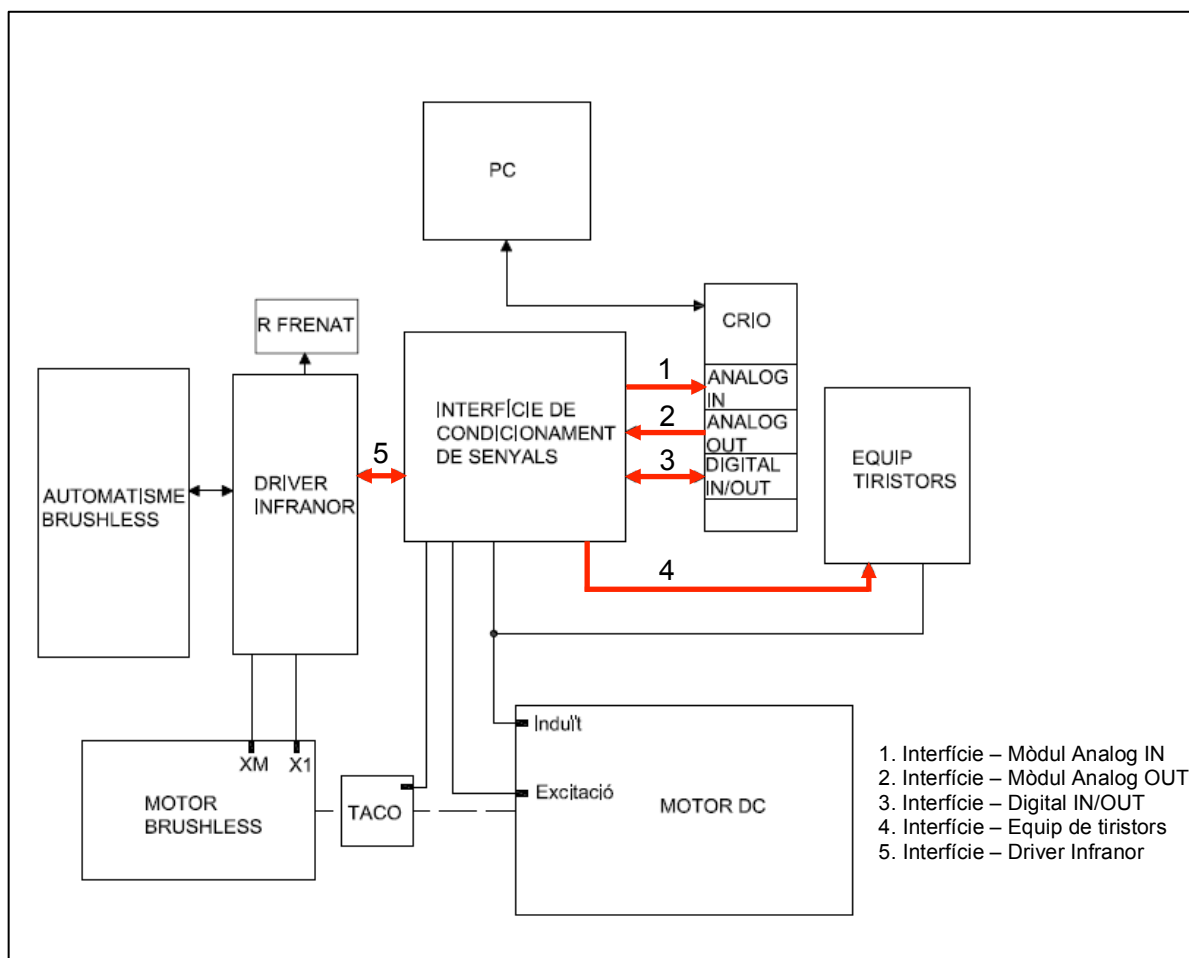


Figura 43. Connexions entre els equips del projecte

### 5.7.1 Cables d'interconnexió interfície – mòdul d'entrades analògiques

Aquesta connexió permet la lectura de senyals analògiques per part del mòdul NI 9205 del CompactRIO. Les tres senyals que llegeix arriben en configuració diferencial i acotades en un rang de  $\pm 10V$ . Aquesta connexió està formada per tres cables apantallats (cada cable té vermell, negre i malla) per portar els tres senyals diferencials i un cable unipolar de color negre de  $1'5 \text{ mm}^2$  per portar el comú del mòdul.

Cal destacar que les malles dels cables apantallats estan connectades amb el comú del mòdul i a la vegada tot està connectat al conductor de protecció (CP) per la banda del CompactRIO (receptor) per tal de reduir les interferències de les senyals i obtenir unes mesures més netes de soroll.

A continuació hi ha una taula que defineix cadascun dels conductors de cada cable.

MÒDUL ANALOG IN		CABLE		CONNECTOR INTERFÍCIE
PIN	NOM	CONCEPTE	COLOR	J10
1	AI0	Monitor de velocitat del brushless (VEL)	Vermell 1	1
19	AI8		Negre 1	2
2	AI1	Intensitat d'induït (Ia)	Vermell 2	3
20	AI9		Negre 2	4
3	AI2	Velocitat de rotació (dinamo)	Vermell 3	8
21	AI10		Negre 3	5
17	COM	Comú del mòdul	Negre	6
17	COM			7

Taula 7. Senyals interfície – mòdul entrades analògiques

### 5.7.2 Multicable mòdul de sortides analògiques – interfície

Aquesta connexió fa arribar a la interfície les sortides analògiques del mòdul NI 9263 del CompactRIO. Aquestes sortides analògiques després van dirigides a l'equip de tiristors i també al mòdul driver Infranor que controla el motor brushless. Està formada per un multicable apantallat de sis conductors. A continuació hi ha una taula que defineix cadascun dels conductors del cable.

MÒDUL ANALOG OUT		CABLE		CONNECTOR PLACA
PIN	NOM	CONCEPTE	COLOR	J6
0	AO0	Tensió pont A	Vermell	1
2	AO1	Tensió pont B	Blau	2
4	AO2	Velocitat brushless (CV)	Gris	3
6	AO3	Parell brushless (l límit)	Marró	4
9	COM	Comú del mòdul	Negre	5

Taula 8. Senyals interfície – mòdul sortides analògiques

### 5.7.3 Multicable interfície – mòdul d'entrades/sortides digitals

Aquesta connexió permet l'intercanvi de senyals digitals entre la interfície i el mòdul de E/S digitals. Està formada per un multicable de nou conductors sense apantallament. A continuació hi ha una taula que defineix cadascun dels conductors d'aquest cable.

MÒDUL DIGITAL IN/OUT		CABLE		CONNECTOR PLACA
PIN	NOM	CONCEPTE	COLOR	J3
14	DO0	CV0 motor brushless	Gris	3
16	DO1	Inhibició pont A	Verd	6
17	DO2	Inhibició pont B	Taronja	4
20	DI4	Polsador emergència	Marró	1
22	DI5	Detector intensitat d'excitació	Blau	2
1	COM	Comú del mòdul	Negre	5

Taula 9. Senyals interfície – mòdul entrades/sortides digitals

### 5.7.4 Cables d'interconnexió interfície – equip de tiristors

Aquests conductors permetem que la interfície pugui comandar el funcionament del l'equip de disparament de tiristors. Consta d'un multicable de 4 conductors que porta les senyals digitals d'inhibició dels ponts i un altre cable apantallat (vermell, negre i malla) que porta els senyals analògics de control dels dos ponts. A continuació hi ha una taula que defineix cadascun dels conductors de cada cable.

CONNECTOR	MÒDUL TIRISTORS		CABLE		CONNECTOR R PLACA
	PIN	NOM	CONCEPTE	COLOR	J7
DB9	3	+12V	Alimentació 12V	Vermell	1
	5	INHA	Inhibició pont A	Negre	2
	6	INHB	Inhibició pont B	Groc	3
Tripolar circular	2	VB	Tensió pont B	Vermell	4
	1	VA	Tensió pont A	Negre	5
	3	GND	Comú del mòdul	Malla	6

Taula 10. Senyals interfície – equip de tiristors

### 5.7.5 Multicable interfície – driver Infranor

Aquesta connexió permet que la interfície pugui donar ordres al controlador del motor brushless. Connecta senyals tant digitals com analògiques i tant entrades del controlador Infranor com sortides. S'utilitza un multicable de vint-i-cinc conductors on només s'han connectat els senyals que utilitza la interfície.

MÒDUL INFRANOR		CABLE		CONNECTOR PLACA
PIN	NOM	CONCEPTE	COLOR	J5
1	FC+	Final de cursa +	Marró-Groc	4
14	FC-	Final de cursa -	Vermell	5
24	0V FC	Comú dels finals de cursa	Blanc-Gris	6
20	M/P	Marxa / Parada	Marró	7
7	CV0	Contacte CV0	Blau	3
17	CV+	Consigna de velocitat	Blanc-Negre	8
16	CV-		Blanc-Marró	2
15	GND	Comú del mòdul	Groc-Blau	9
3	I LIMIT	Consigna de parell	Rosa	1
10	VEL	Velocitat de rotació	Groc-Gris	10

Taula 11. Senyals interfície – driver Infranor



## 6 PROGRAMARI

En aquest capítol es descriuran els programes desenvolupats en LabVIEW que conformen el projecte. S'han desenvolupat tres programes independents cada un d'ells relacionat respectivament amb un dels tres objectius del projecte: dissenyar un sistema de control manual de la màquina brushless que li permeti funcionar com a motor o com a fre, implementar un sistema d'estudi en llaç obert del funcionament en els quatre quadrants de la màquina de corrent continu i finalment desenvolupar un sistema de regulació de la velocitat en cascada del motor de corrent continu.

Els dos primers programes realitzats són per ajudar a entendre el funcionament de tot el conjunt i de passada comprovar el funcionament de cadascun dels components. Finalment, el tercer programa és el que engloba tots els funcionaments i on es realitza la pròpia regulació en cascada del motor de corrent continu.

### 6.1 Programes de funcionament manual

En aquest apartat s'ha creat un projecte en Real-Time que engloba els dos programes de comprovació de funcionament de tot el conjunt. Aquests dos programes permeten acomplir respectivament els dos primers objectius del projecte. No ha estat necessari l'ús de l'FPGA perquè les velocitats d'execució dels cicles no són excessives al no necessitar-se fer un càlcul extremadament ràpid i precís com podria ser el càlcul d'un PID.

A continuació hi ha una figura on es mostra el projecte complet que inclou els dos programes de funcionament manual. Els dos programes es troben dins l'arrel del CompactRIO Real-Time indicant que s'executen dins el seu sistema operatiu. En aquest cas no s'ha calgut necessària la utilització d'un programa executat dins el propi ordinador.

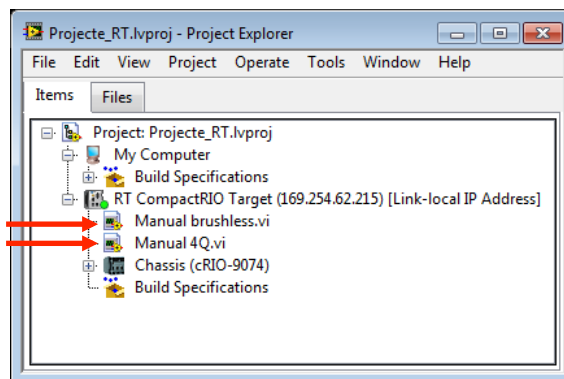


Figura 44. Finestra projecte Real-Time

### 6.1.1 Motor brushless manual

Aquest programa és el primer dels quals es recomana executar, ja que permet la comprovació del funcionament del motor brushless. Es tracta d'utilitzar el motor brushless com a motor o com a fre. En el cas del funcionament com a motor, es permet regular la seva velocitat entre 2700 i -2700 rpm mentre que si s'escull el funcionament com a fre, es permet regular el parell de fre que exerceix sobre l'eix de 0 a 13 Nm.

A continuació hi ha el panell frontal que veu l'usuari en executar aquest programa.

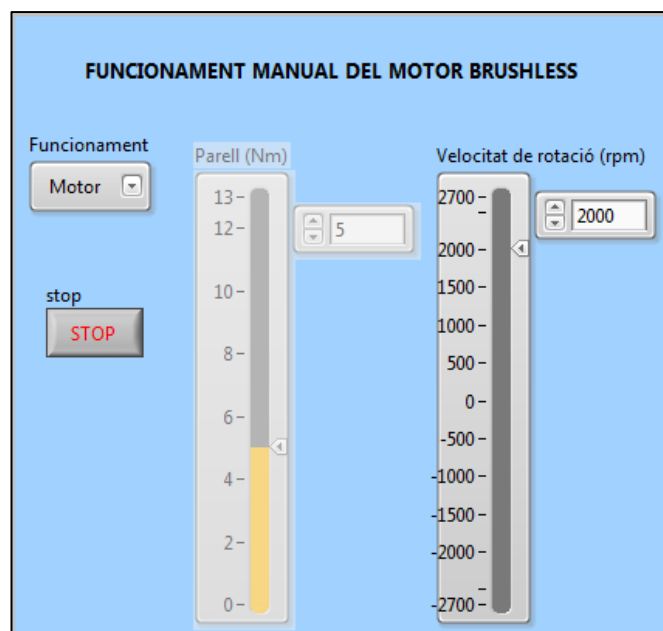


Figura 45. Panell frontal brushless manual

Per a l'execució d'aquest programa no cal tenir connectat el motor de corrent continu ni el seu sistema d'accionament per tiristors, de manera que es permet la comprovació i verificació única i exclusivament del motor brushless. Si bé la verificació del brushless com a motor és visual (només cal veure si gira i si canvia de sentit quan se li ordena) en el cas de la verificació del brushless com a fre, cal intentar fer girar l'eix amb la mà per veure si realment el motor està aplicant o no un parell de fre. Per consigna de parell igual a zero s'ha de poder girar l'eix del motor sense oposició mentre que al augmentar la consigna de parell de fre es fa impossible girar l'eix en cap dels dos sentits.

A continuació, es mostra l'organigrama del programa de funcionament manual del motor brushless.

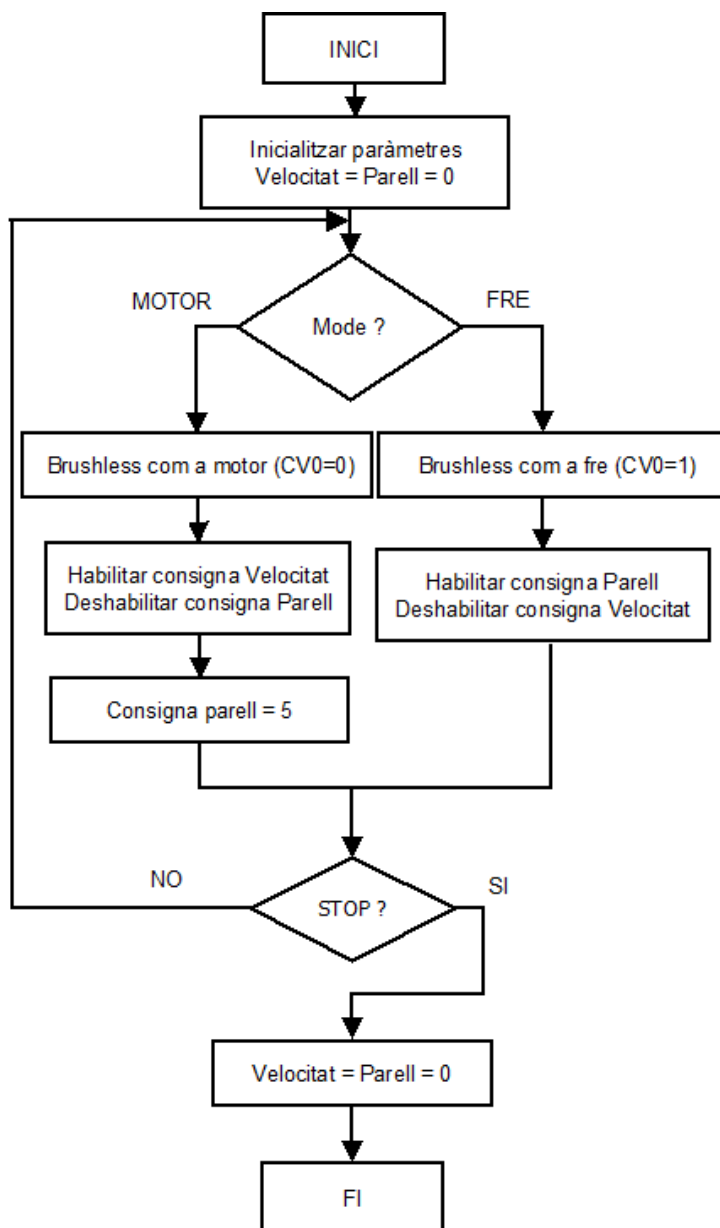


Figura 46. Organigrama brushless manual

Per configurar el motor brushless com a motor o com a fre, cal actuar sobre una entrada digital del connector X4 del seu driver Infranor, en concret es tracta de l'entrada CV0. Aquesta entrada està normalment a tensió alta, per tant quan es diu CV0 igual a 0 s'entén que el CompactRIO no activa aquesta entrada. En aquestes condicions, la màquina

brushless està configurada com a motor. Si es desitja fer treballar la màquina com a fre, cal posar CV0 a massa, i això s'interpreta com activar la sortida digital corresponent del CompactRIO (CV0=1).

Per altra banda, cal tenir en compte que quan el motor brushless està configurat per treballar com a motor, s'ha de donar una consigna de parell superior a 0, ja que aquesta consigna limita la intensitat màxima que pot circular pel motor, de manera que si es posa 0 Nm el motor no pot ni arrencar perquè la intensitat en buit ja supera el límit d'intensitat màxima permesa. En aquest programa, al funcionar com a motor es posa automàticament una consigna de parell igual a 5 Nm, de tal manera que la intensitat en buit que circula pel brushless no superi mai aquesta limitació i pugui exercir com a motor sense cap problema.

Doncs que el temps d'execució en aquest programa no és crític, s'ha escollit una velocitat d'execució de 300 ms per cicle, per tal de tenir temps a escriure i llegir les entrades i sortides del sistema sense restriccions de temps.

Quan es prem el pulsador d'stop cal assegurar una aturada del motor brushless per deixar-lo en una situació de repòs.

En la interfície de condicionament de senyals hi ha dos pulsadors normalment tancats corresponents a FC+ i FC- (finals de cursa del motor en els dos sentits de gir). Quan l'usuari prem un d'aquests pulsadors, es simula l'activació d'un final de cursa d'un suposat mecanisme de desplaçament lineal accionat pel motor indicant que ha arribat a una posició extrema, el motor s'aturarà instantàniament. Al deixar el pulsador en repòs, tornarà a girar.

### **6.1.2 Funcionament manual als quatre quadrants**

Aquest programa permet fer funcionar en règim permanent el motor de corrent continu en els quatre quadrants. A la vegada controla la màquina brushless que també ha de treballar simultàniament amb la màquina de corrent continu en els 4 quadrants segons s'ha mostrat a la figura 18 del capítol 3.3 Motor brushless. D'aquesta manera, el programa permet comprovar des del punt de vista del motor de corrent continu el bon funcionament del sistema en cada un dels quadrants i assegurar que les mesures d'intensitat d'induït i de velocitat tenen la polaritat correcta.

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

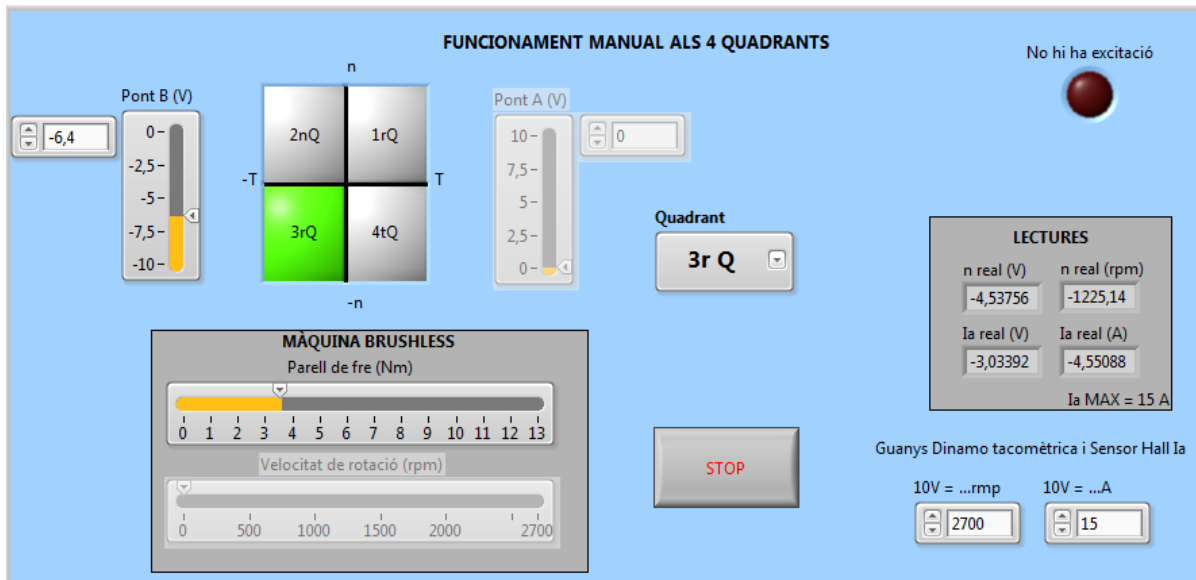


Figura 47. Panell frontal funcionament manual 4Q

Quan es prem el polsador d'stop cal assegurar una aturada de tot el sistema, tant del motor brushless com del motor de corrent continu per deixar el conjunt en una situació de repòs. Pel que fa a les seguretats, el programa s'aturarà instantàniament al prémer el polsador d'emergència i caldrà executar-lo de nou si es vol tornar a utilitzar. Per altra banda, si es detecta que l'excitació no està alimentada, automàticament els dos ponts queden inhibits i el programa queda aturat a l'espera de que s'alimenti l'excitació. A continuació hi ha l'organigrama general que mostra el funcionament de les seguretats.

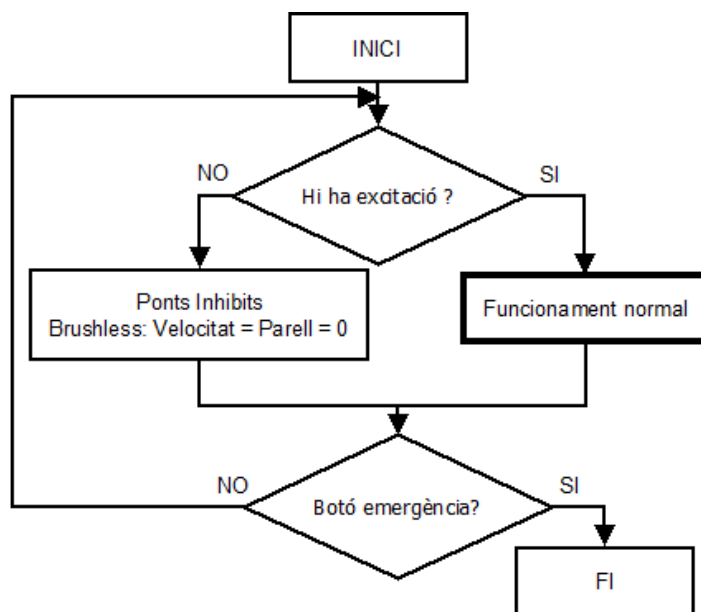


Figura 48. Organigrama general funcionament manual 4Q

A continuació, es mostra l'organigrama del programa de funcionament manual als quatre quadrants en condicions normals de funcionament (funcionament normal).

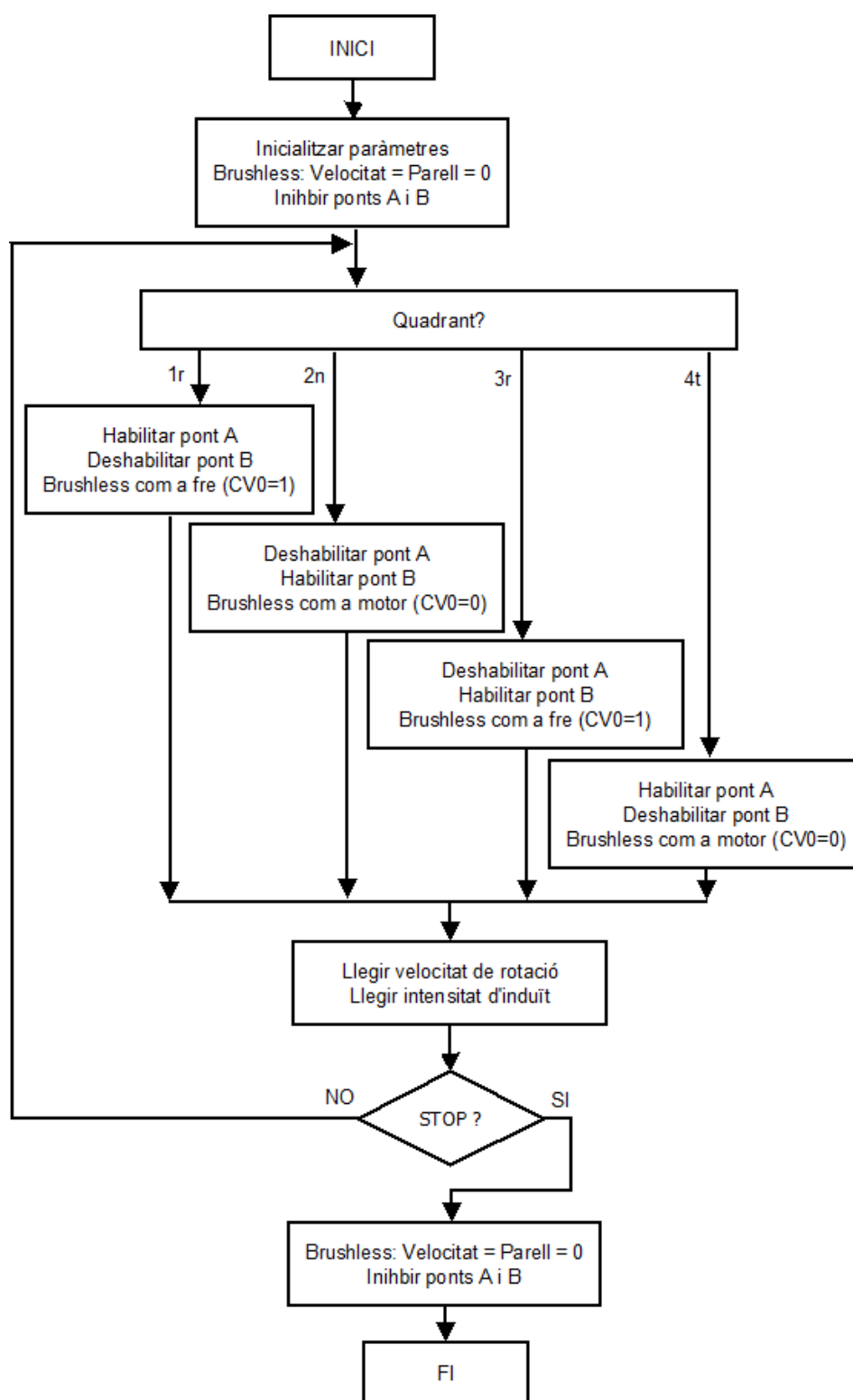


Figura 49. Organigrama funcionament normal manual 4Q

Com mostra la figura 18 del capítol 3.3 Motor brushless, quan es vol fer funcionar el motor de corrent continu en el primer o tercer quadrant, cal configurar el motor brushless com a fre, habilitar un control per poder variar el parell de fre i permetre l'entrada de tensió entre 0 i 10V en el pont A (primer quadrant) o en el pont B (tercer quadrant). En el cas de funcionar en el segon o quart quadrant, és necessari configurar el motor brushless com a motor, permetre un control de la seva velocitat i fer treballar el motor de corrent continu com a generador aplicant tensió de fins a 3V en el pont B (segon quadrant) o en el pont A (quart quadrant). S'ha escollit una tensió de fins a 3V per tal de veure el funcionament del motor de corrent continu com a generador sense arribar als límits de funcionament en règim permanent.

Pel que fa a les inhibicions dels ponts, el programa les gestiona de la següent manera: quan treballa el pont A, el pont B rep una tensió de control de 0V a la vegada que queda inhibit per seguretat. De la mateixa manera s'inhibeix el pont A quan li toca treballar al B. Aquest sistema d'inhibicions no serà efectiu en el programa de regulació en cascada ja que l'activació/desactivació d'inhibicions genera, pel propi funcionament de les plaques de control del disparament de tiristors, un retard de 1 segon en les transicions entre quadrants. Tanmateix, en aquest programa, al ser un control manual aquest retard no presenta cap inconvenient.

Aquest programa també fa una lectura de la velocitat de rotació de l'eix llegint la tensió provinent de la dinamo tacomètrica. També es llegeix la intensitat d'induit gràcies al transductor d'intensitat per efecte Hall. Es mostren les lectures en unitats de Volts i també en unitats pròpies de cada mesura (Ampers o rpm).

També es permet l'ajust dels guanys de cada sensor per software per fer-los coincidir amb els guanys de cada sensor ajustats per hardware. Amb aquesta informació l'usuari pot veure si les mesures realitzades són correctes i fiables. També es pot comprovar si la polaritat de totes les variables en cadascun dels quatre quadrants és coherent.

S'ha escollit una velocitat d'execució de 300 ms per cicle, per tal de tenir temps a escriure i llegir les entrades i sortides del sistema sense restriccions de temps. En aquest cas la velocitat d'execució no és un element crític del programa al no tenir cap secció de codi que necessiti executar-se molt ràpidament de forma molt exacte.

## 6.2 Programa de regulació en cascada

En aquest apartat s'explicarà el funcionament complet del programa que permet fer la regulació en cascada de la velocitat del motor de corrent continu. El projecte de LabVIEW que engloba aquest programa està dividit en dos subprogrames situats, un dins el sistema operatiu Windows del propi ordinador (Host PC.vi) i l'altre dins l'entorn FPGA que ofereix el CompactRIO (fpga.vi). En la figura següent queda exemplificada aquesta distribució de programes.

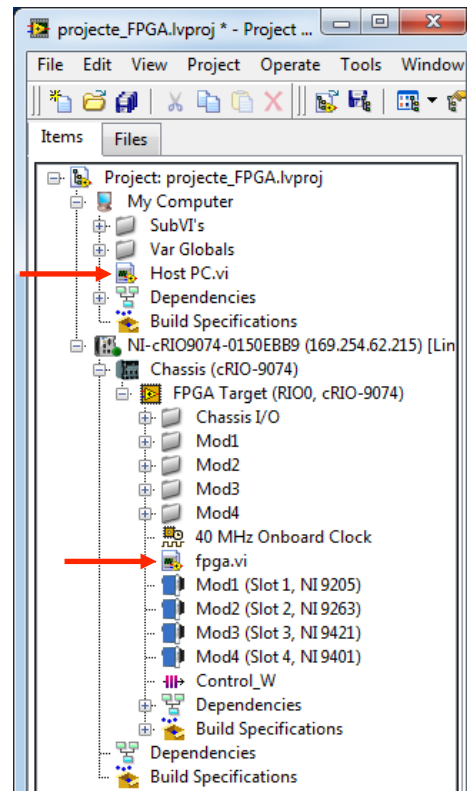


Figura 50. Finestra projecte FPGA

El programa que l'usuari executarà per realitzar el control serà el programa situat dins l'entorn Windows (Host PC.vi). Aquest programa es pot considerar el programa principal, on l'usuari té accés al sistema de control i pot veure l'evolució de diferents variables del sistema.

El programa situat dins l'entorn FPGA només incorpora els càlculs mínims i necessaris que necessiten realitzar-se de forma molt ràpida. Per tant, dins el programa de l'FPGA només hi haurà el càlcul dels PI's, la lectura d'entrades i l'escriptura de sortides. La resta d'operacions, com per exemple la representació de dades, els canvis d'unitats o la generació de graons o rampes per la consigna o per la càrrega, es realitzen al programa principal.



### 6.2.1 Programa FPGA

El programa realitzat en FPGA executa dues operacions bàsiques: lectura/escriptura de senyals i càlcul dels PI's en cascada. Totes les operacions es porten a terme a un ritme d'execució de 200 microsegons per cicle. Aquest temps de cicle és l'adequat per aconseguir una bona regulació en cascada de la velocitat del motor de corrent continu. Per tant, és evident que si es vol realitzar el càlcul cada 200  $\mu$ s, cal també actualitzar les dades amb la mateixa rapidesa, ja que sinó el càlcul no disposarà de noves dades per treballar.

A continuació hi ha l'organigrama general del programa FPGA juntament amb la seva posterior explicació.

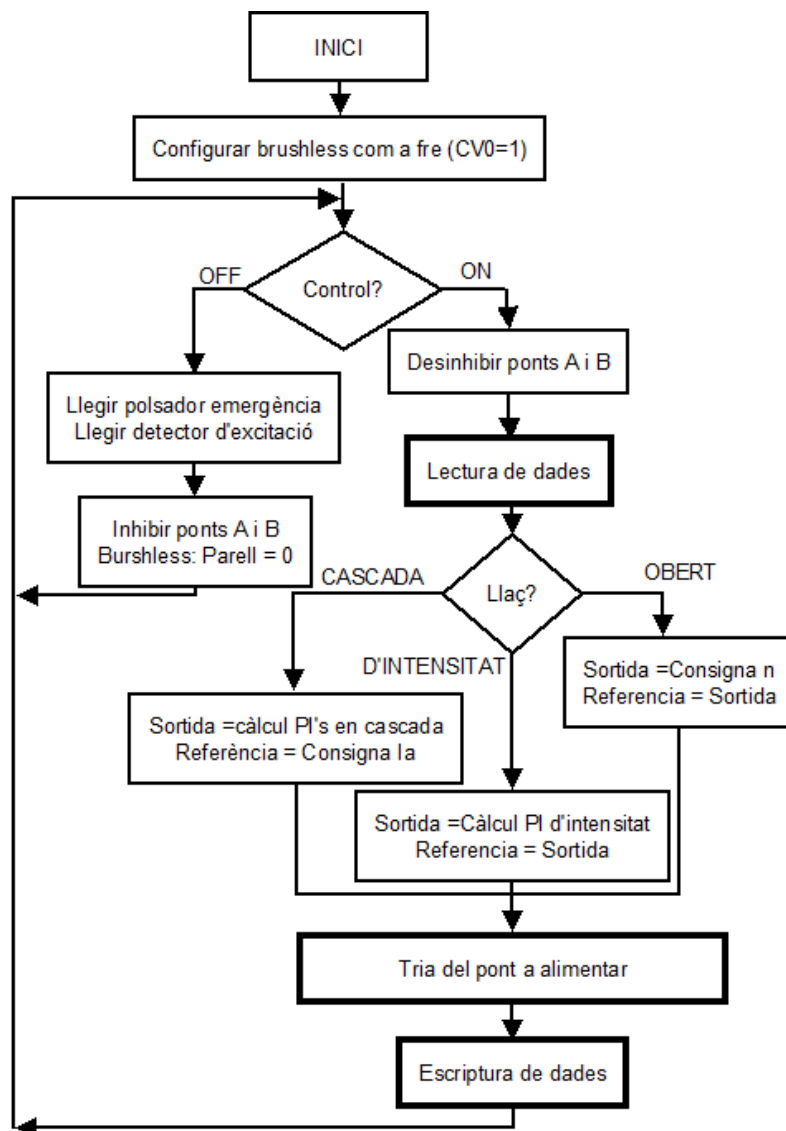


Figura 51. Organigrama general programa FPGA

En aquest programa, el motor brushless sempre treballarà com a fre per simular una càrrega mecànica, per tant es deixa permanentment el contacte CV0 del motor brushless activat (mode de funcionament com a fre).

El programa FPGA només realitzarà càlculs i enviarà la informació dels resultats al programa principal si aquest programa principal està a punt per rebre les dades i així ho fa saber al programa FPGA. Per aquesta raó, hi ha una senyal digital anomenada "Control" que el programa principal posarà a 1 per indicar que es pot iniciar el control de velocitat. Mentre això no passi, l'FPGA mantindrà el sistema en un estat de seguretat, inhibint els dos ponts de tiristors i aturant el motor brushless.

Quan s'inicia el control, el programa llegeix les entrades digitals i analògiques del procés i també rep una sèrie de paràmetres definits per l'usuari en el programa principal. Aquest bloc de lectura que hi ha en l'organigrama general (Lectura de dades) queda detallat en la següent figura:

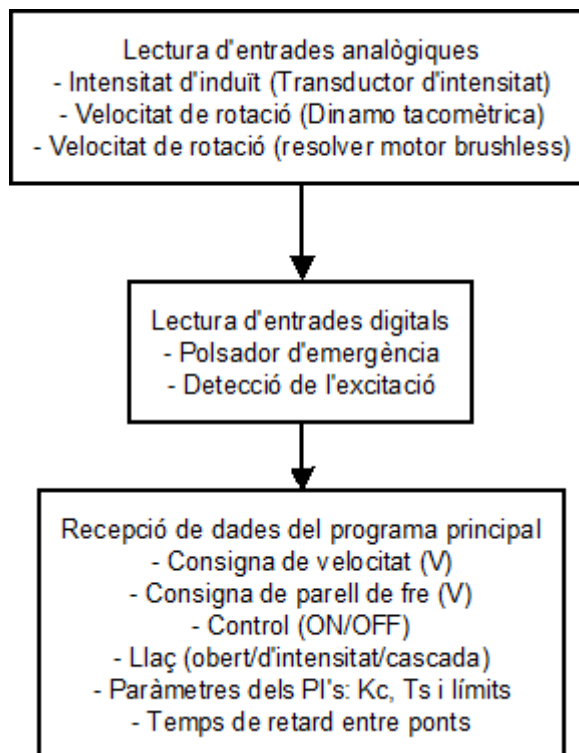


Figura 52. Organigrama FPGA de lectura

Un cop adquirida tota la informació necessària el programa procedeix a determinar si el sistema opera en llaç obert, en llaç tancat o en llaç d'intensitat. Aquesta informació prové de la variable "Llaç" que l'usuari escull en el programa principal. En cas de llaç obert la consigna de velocitat en Volts que rep el programa FPGA és directament la sortida del sistema de regulació, en canvi en cas de tenir el llaç en cascada o llaç d'intensitat, per determinar la sortida s'han de realitzar els càlculs dels PI's. Aquest càlcul s'ha realitzat amb la funció PID que ofereix la interfície de programació FPGA del LabVIEW utilitzant els paràmetres Kc, Ti, límits i Ts provients del programa principal i que poden ser modificats per l'usuari. Com que s'estan implementant PI's, els temps derivatius Td sempre seran nuls per fer que l'acció derivativa no sigui operativa.

A nivell de programa, es comença fent una separació entre llaç obert (Llaç = 0) i llaç en cascada o d'intensitat (Llaç  $\neq$  0). En la figura següent es mostra el programa en cas de tenir llaç obert. Veiem com la consigna de velocitat passa directament a la sortida i veiem com la senyal de referència per determinar quin pont treballa serà la pròpia sortida.

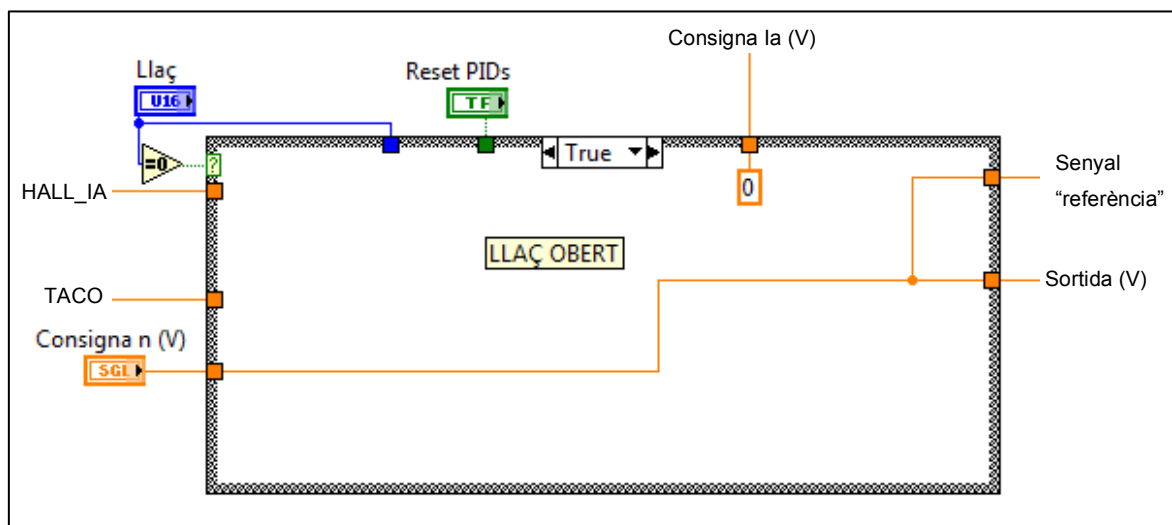


Figura 53. Codi de programa FPGA llaç obert

En el cas de tenir llaç en cascada o d'intensitat, s'executa la finestra False de l'estructura case. Aquesta part de programa el primer que fa és realitzar el càlcul del PI de velocitat mitjançant consigna de velocitat i senyal de la dinamo tacomètrica. Llavors per decidir si aquest valor calculat passa al PI d'intensitat com a consigna d'intensitat es mira amb quin llaç es treballa. Si és llaç d'intensitat (Llaç  $\neq$  2) la consigna d'intensitat serà directament la

consigna de velocitat i el valor calculat en el PI de velocitat no serà utilitzat. En cas de llaç en cascada (Llaç = 2) el valor calculat passarà com a consigna d'intensitat. En tots dos casos el valor de consigna d'intensitat és limitat mitjançant el limitador Límit\_Ia (V).

Amb el valor de consigna de intensitat i la mesura del transductor d'intensitat per efecte Hall es calcula la sortida del regulador. Es pot veure com aquí la senyal de referència per determinar quin pont treballa és la consigna d'intensitat.

A continuació hi ha la part programa corresponent al càlcul dels PI's.

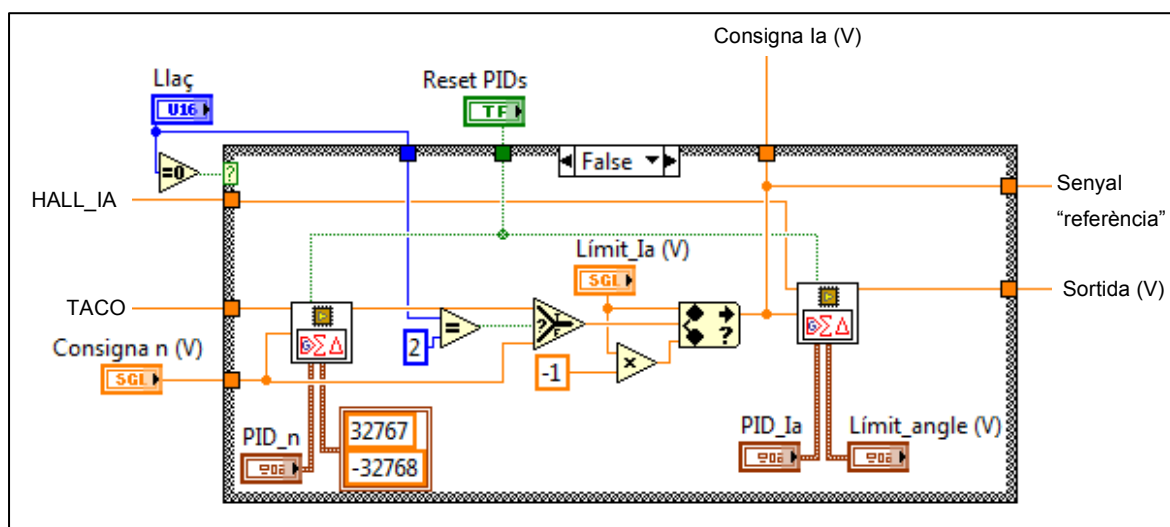


Figura 54. Codi de programa FPGA llaç d'intensitat/en cascada

Abans de mirar el signe de la "Referència" i aplicar la sortida al pont A o al pont B, cal determinar si en el cicle actual hi ha una transició de signes, és a dir, si el signe que té en el cicle actual la "Referència" és diferent al signe que tenia en el cicle immediatament anterior. Si això succeeix, significa que es passarà d'alimentar un pont de tiristors a alimentar l'altre. Els tiristors es mantenen uns instants més conduint quan es deixen d'alimentar (fins que la intensitat descendeix per sota de la intensitat de manteniment dels tiristors) per tant, s'ha de garantir que passi un cert temps entre el pas d'alimentar un pont a alimentar l'altre (temps de retard). Aquest temps de retard ha de ser de com a mínim 40 ms per tal d'evitar un possible instant de temps on els dos ponts condueixen a la vegada i es produeixi un curtcircuit que faci saltar les proteccions dels tiristors o que pugui danyar l'equip.

Per aquesta raó, és necessari realitzar un sistema que generi un retard entre transicions d'un pont a un altre.

L'organigrama mostrat a continuació correspon a la descomposició detallada del bloc "Tria del pont a alimentar" que apareix en l'organigrama general del programa FPGA.

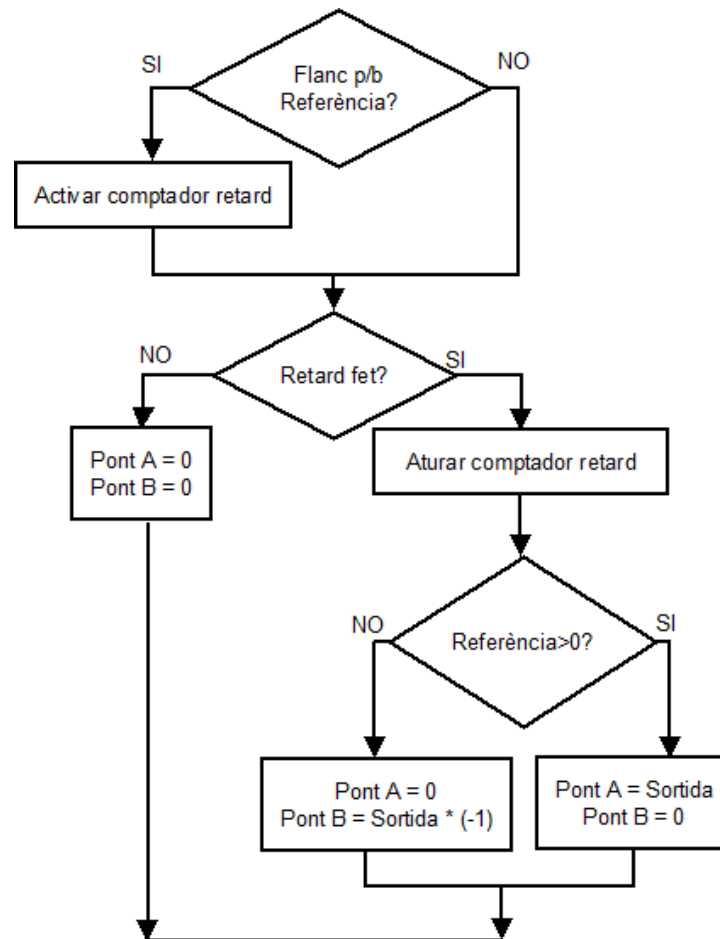


Figura 55. Organigrama FPGA tria del pont a alimentar

Si es dóna el cas que en el cicle actual el signe de la variable de referència és diferent al signe d'aquesta variable en el cicle anterior (flanc de pujada/baixada de la variable) s'ha d'activar el comptador de retard i inhibir els dos ponts fins que no s'acabi el retard.

Mentre el temps de retard no ha passat, els dos ponts es queden sense alimentació. Si es té en compte que el cicle de programa s'executa a una velocitat de  $200 \mu\text{s}/\text{cicle}$  i que el temps de retard per defecte és de 40 ms, això significa que quan es produeixi un flanc (tant de

pujada com de baixada) en la senyal d'estudi ("Referència") els següents 200 cicles d'execució del programa (equivalent a un temps de 40 ms) els ponts A i B estaran sense alimentar. Llavors, mitjançant el signe de la "Referència" es decideix si la tensió de sortida s'aplica al pont A o al pont B. Cal destacar que amb signe negatiu del senyal "Referència", el senyal a aplicar, en aquest cas al pont B, ha de ser la sortida invertida per obtenir un senyal de control sempre amb polaritat positiva de 0 a 10V de tensió.

Finalment, les últimes operacions que realitza el programa FPGA és l'escriptura de les sortides del procés i l'enviament de dades cap al programa principal on hi ha la interfície d'usuari per tal de que l'usuari pugui veure l'evolució dels diferents paràmetres. A continuació hi ha la informació detallada del bloc d'escriptura que apareix en l'organigrama general de funcionament (Escriptura de dades).

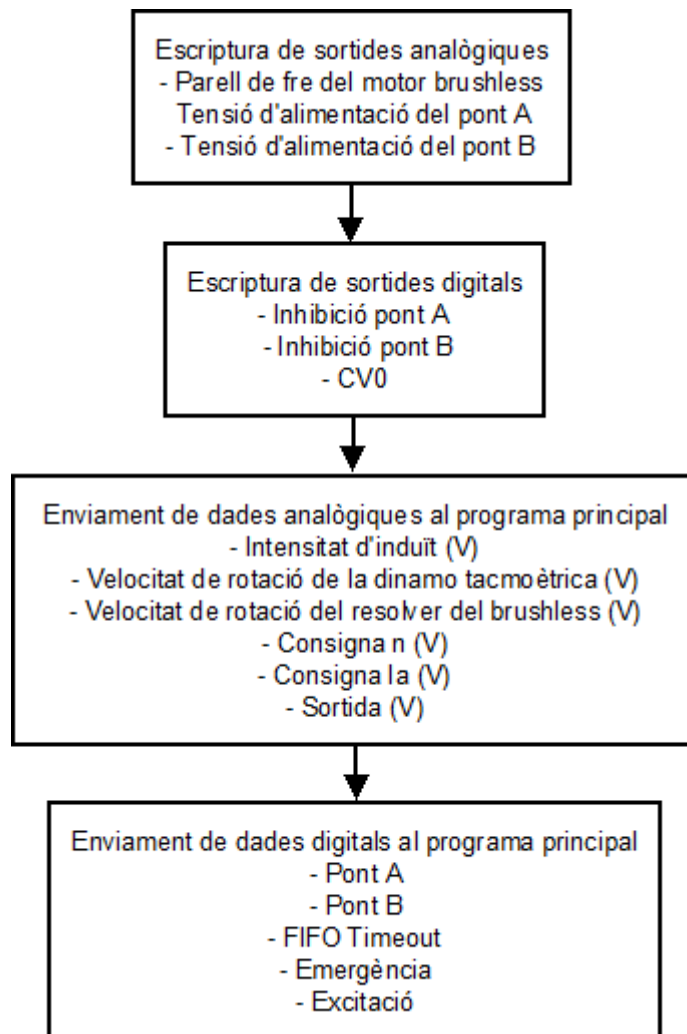


Figura 56. Organigrama FPGA d'escriptura

L'enviament de dades analògiques del programa FPGA cap al programa principal es fa mitjançant una memòria FIFO, de tal manera que el programa FPGA escriu les sis dades que vol enviar en la memòria FIFO a un ritme molt elevat, ja que cal recordar que cada 200  $\mu$ s escriu dades noves.

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 entre el programa que s'executa a l'FPGA (FPGA.VI) i el programa que s'executa dins el sistema operatiu Windows (HOST.VI).

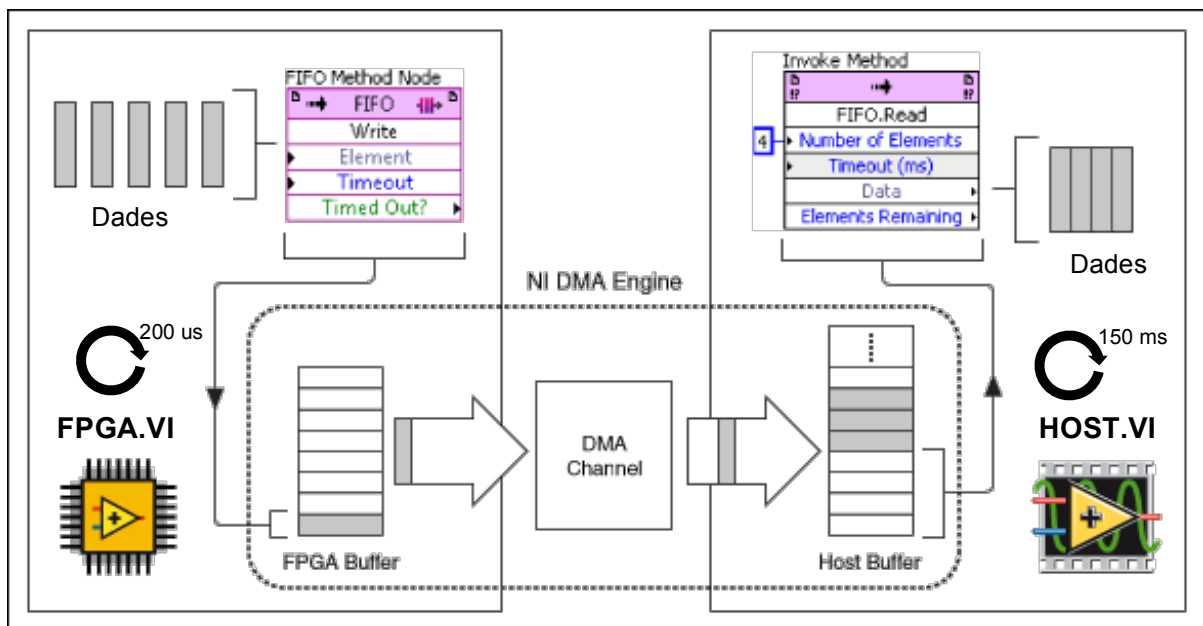


Figura 57. Comunicació DMA entre VI's

Les dades analògiques que s'envien pel canal DMA són: la intensitat d'induït, la velocitat de rotació de la dinamo tacomètrica, la velocitat del resolver del brushless, la consigna de velocitat, la sortida de controlador i la consigna d'intensitat.

En la figura següent es mostra la part de programa que envia dades al Host PC.vi mitjançant la memòria FIFO. Es disposa d'una senyal digital anomenada "FIFO Timeout" que indica si la memòria queda plena de dades i per tant hi ha hagut algun problema en la transmissió. Aquesta senyal es visualitzarà en el panell frontal del programa principal (Host PC.vi) per tal de que l'usuari vegi si la comunicació funciona correctament.

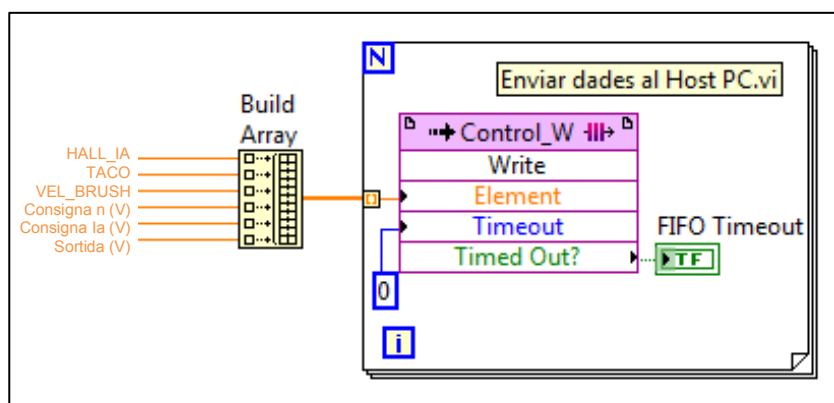


Figura 58. Codi d'enviament de dades al programa principal

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.

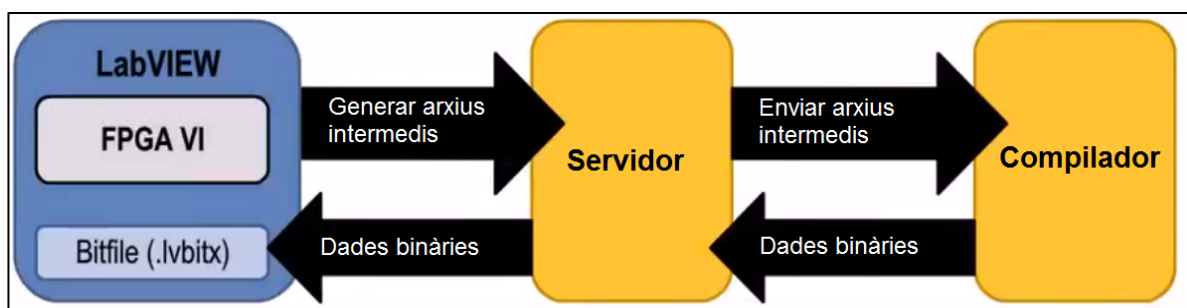
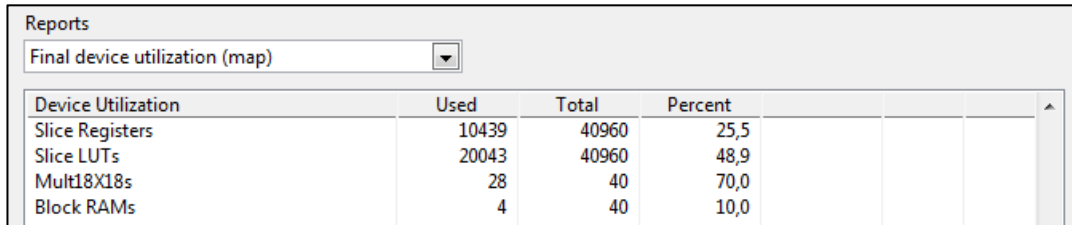


Figura 59. Passos en el procés de compilació



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.

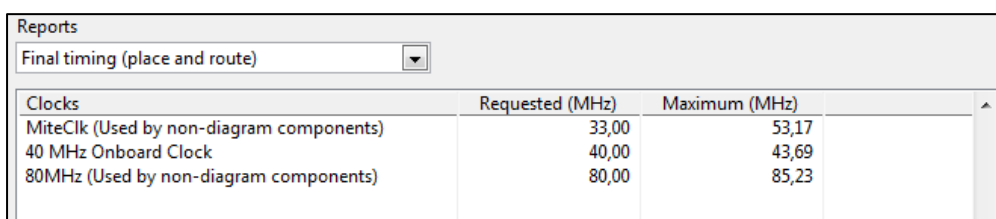


Device Utilization	Used	Total	Percent
Slice Registers	10439	40960	25,5
Slice LUTs	20043	40960	48,9
Mult18X18s	28	40	70,0
Block RAMs	4	40	10,0

Figura 60. 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.



Clocks	Requested (MHz)	Maximum (MHz)
MiteClk (Used by non-diagram components)	33,00	53,17
40 MHz Onboard Clock	40,00	43,69
80MHz (Used by non-diagram components)	80,00	85,23

Figura 61. 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 per tal d'implementar físicament tots els càlculs necessaris per al funcionament del controlador.

### 6.2.2 Programa principal

El programa principal (Host PC.vi) s'executa dins el sistema operatiu Windows del propi ordinador, i fa la funció d'interfície per a que l'usuari pugui interaccionar amb el sistema.

A nivell global, el programa es divideix en dos grans llaços d'execució en paral·lel tal com es mostra a la següent figura.

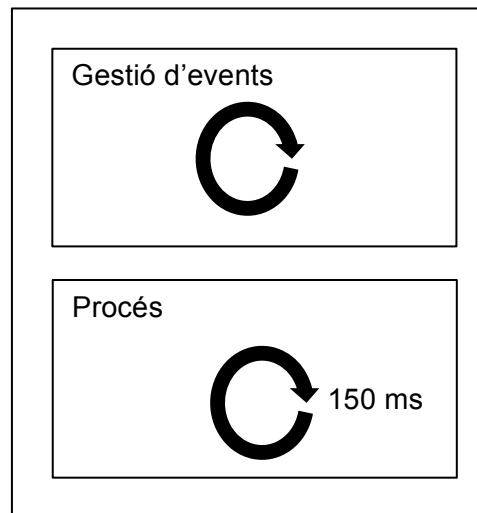


Figura 62. Llaços en paral·lel del programa principal

Per una banda hi ha el propi procés del programa, on s'executen totes les operacions d'escriptura, lectura, representació i càlculs necessaris en aquesta aplicació. Aquest llaç s'executa a una velocitat de 150 ms per cicle i conté les operacions d'obertura, execució i tancament del programa FPGA.

Per altra banda, en paral·lel s'executa un llaç que gestiona els events que es poden donar durant el funcionament del programa. Un event significa una acció que s'ha de portar a terme en el moment en què es donin unes condicions determinades.

En aquest programa principal, s'han ajuntat diverses operacions relativament independents entre elles en forma de blocs o subprogrames. Cada subprograma s'anomena SubVI i permet millorar l'ordre del programa i mantenir un estil de programació coherent i fàcilment interpretable. A continuació hi ha una taula que explica tots els subVI's creats en aquest

programa principal, la funció que tenen cadascun d'ells i si es troben dins el llaç del procés o dins el llaç de gestió d'events.

SubVI	Llaç	Funció
fpga_w_r.vi	Procés	Escriptura i lectura de variables del programa executat en FPGA
Control.vi	Procés	Operacions lògiques per determinar quan es dona l'ordre d'iniciar/aturar el control de velocitat al programa FPGA
Tfre.vi	Procés	Càlculs per determinar el parell de fre del motor brushless
Gràfiques.vi	Procés	Representacions gràfiques de les variables d'interès del programa així com una representació dels quatre quadrants
Càlculs.vi	Procés	Diversos càlculs d'interès en el funcionament en cascada
ResetPIs.vi	Procés	Operacions lògiques per determinar quan es resetja els PI's
PID_param.vi	Procés	Càlculs de condicionament dels paràmetres dels dos controladors (aquest SubVI es troba dins el subVI fpga_w_r.vi)
Rampa_n.vi	Gestió d'events	Generació d'una rampa de la consigna de velocitat amb els paràmetres indicats per l'usuari (increment i durada)
Create User Event.vi	Gestió d'events	SubVI's necessaris per gestionar el funcionament dels User Events utilitzats en aquest programa
Fire User Event-Stop.vi		
Fire User Event x3.vi		
Destroy User Event.vi		

Taula 12. Relació de SubVI's del programa

Pel que fa al llaç de gestió d'events, es tracta d'un programa format per una estructura event case que dóna l'ordre d'executar una acció dins una case structure. En aquest llaç no es controla la velocitat d'execució de tal manera que Windows executa aquesta part de programa a la seva velocitat màxima. Aquest sistema de gestió d'events en paral·lel permet que el funcionament del procés executat a una velocitat de 150 ms per cicle no es vegi afectat quan apareixi un event durant l'execució. Els events que gestiona aquesta estructura són els següents:

Event	Disparador	Funció
OK graó n	Polsador graó n	Sumar a la consigna de velocitat el graó indicat per l'usuari
OK graó T	Polsador graó T	Sumar al parell de fre el graó indicat per l'usuari
OK pendent n	Polsador pendent n	Executar el subVI Rampa_n.vi
Stop	Polsador Stop	Executar l'User Event – Stop
Stop Event	User Event – Stop	Aturar el llaç de gestió d'events
Miss. EM	User Event – Miss. EM	Obrir una finestra per pantalla avisant de que s'ha accionat el polsador d'emergència
Miss. EXC	User Event – Miss. EXC	Obrir una finestra per pantalla avisant de que no hi ha excitació
Miss. NO EXC	User Event – Miss. NO EXC	Obrir una finestra per pantalla avisant de que la seguretat d'excitació està deshabilitada

Taula 13. Events a gestionar

Els events relacionats directament a la generació de graons i rampes en la consigna de velocitat o en la consigna de parell són executats quan l'usuari prem els polsadors corresponents en el panell frontal. El polsador d'stop està vinculat a l'event d'aturada que a la vegada acciona un altre event (Stop event) per finalitzar l'execució dels llaços.

Doncs que els events només poden associar-se a l'acció d'un element del panell frontal com és l'accionament d'un polsador, ha estat necessari generar una sèrie d'events propis (User Events) per poder gestionar els events no relacionats directament amb una acció del panell frontal (com en el cas de l'execució de finestres informatives). En conseqüència, s'ha requerit l'ús de les funcions de crear, executar i destruir User Events.

Pel que fa al llaç del procés, a continuació, es mostra l'organigrama general del programa. S'indica en cada cas si l'acció que es realitza forma part dels subVIs prèviament descrits.

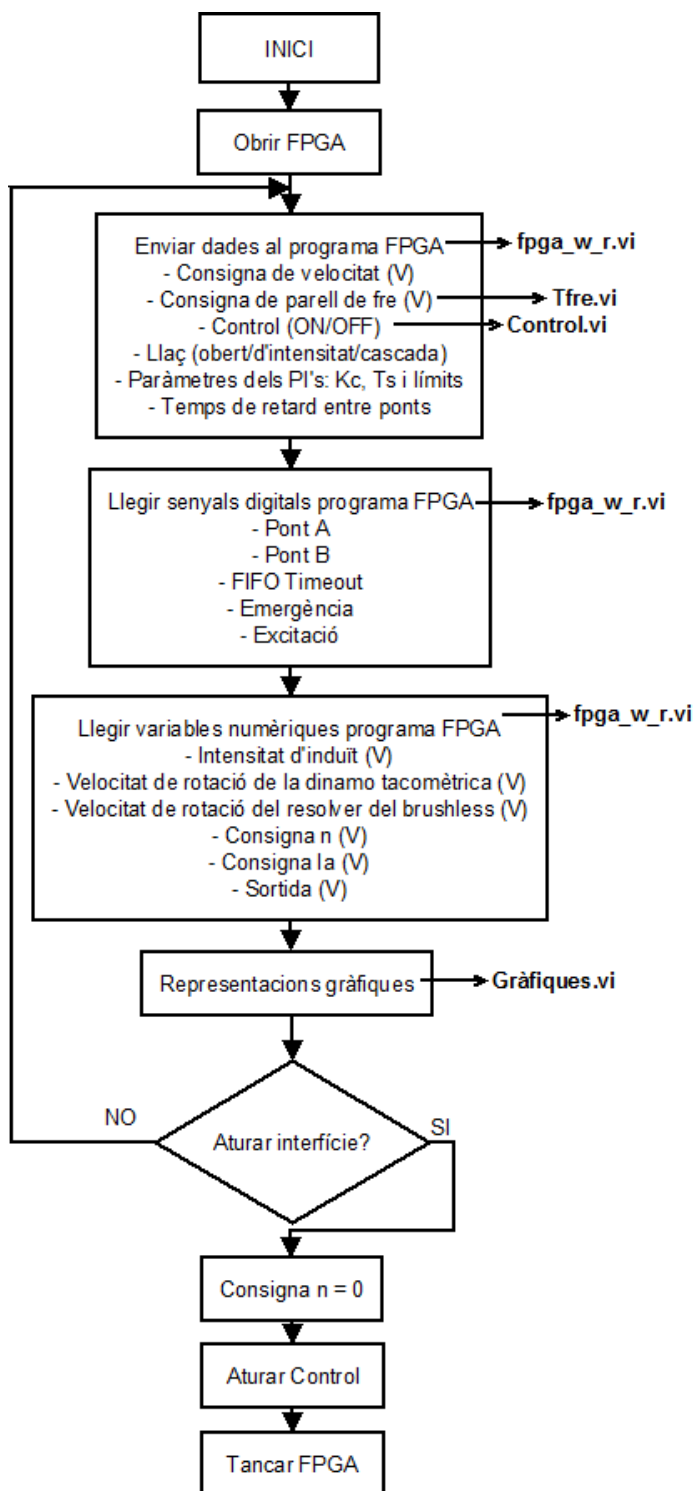


Figura 63. Organigrama del llaç del procés

El llaç de procés comença ordenant l'obertura del programa FPGA. Llavors procedeix a enviar totes les dades que necessita l'FPGA per treballar. Un cop ha escrit les dades corresponents el que fa és llegir les dades analògiques i digitals que li envia l'FPGA. Amb tota la informació es realitzen els càlculs i les representacions gràfiques corresponents per mostrar els resultats a l'usuari. Si l'usuari prem el botó d'aturar la interfície aquesta ordena la parada tant del motor de corrent continu com del motor brushless i a continuació procedeix a aturar el programa FPGA, ja que si bé aquest podria seguir treballant, en aquest cas no té sentit seguir fent la regulació del motor si l'usuari no té oberta la interfície gràfica per controlar i monitoritzar el procés.

Aquest programa treballa a una velocitat d'execució de 150 ms per cicle, per tal de tenir temps a escriure i llegir les entrades i sortides del sistema i processar tota la informació necessària.

En el llaç de procés del programa principal s'executa el subVI Control.vi per determinar quan ha s'ha de realitzar el control del motor. En la interfície d'usuari hi ha dos pulsadors per activar i desactivar el sistema de control. A nivell de programa, és necessari una sèrie de seguretats per evitar que l'usuari pugui iniciar el control si hi ha alguna cosa incorrecta. A continuació, es mostra el diagrama de blocs del subVI Control.vi així com l'equació lògica que determina l'estat de la variable "Control", que s'envia el programa principal a l'FPGA per iniciar (ON) o aturar (OFF) el procés.

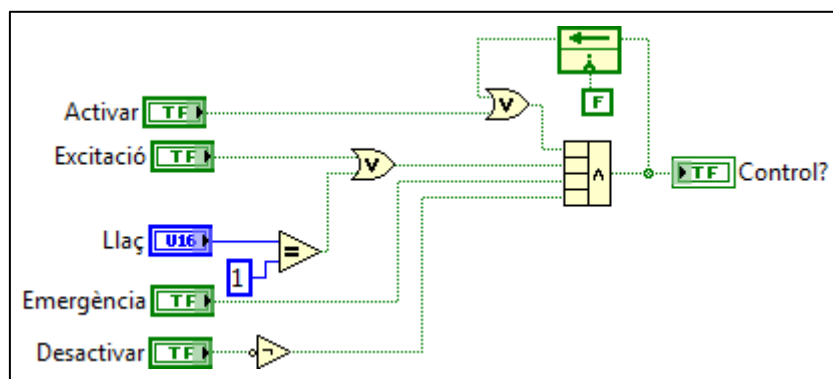


Figura 64. Codi de programa Control.vi

$$\text{Control} = (\text{Activar} \vee \text{Control}) \wedge \overline{\text{Desactivar}} \wedge (\text{Excitació} \vee \text{Llaç\_1}) \wedge \overline{\text{Emergència}} \quad (\text{Eq. 12})$$

Per poder iniciar el control del motor de corrent continu, en el programa principal s'ha de prémer el pulsador "Activar" i per aturar el procés es prem el pulsador "Desactivar". Tanmateix, el programa FPGA rebra l'ordre de iniciar el control (Control ON) només si al prémer el pulsador d'activar hi ha la detecció d'excitació (l'excitació està alimentada), el pulsador d'emergència normalment tancat dona senyal i el pulsador "Desactivar" no està pulsat (senyal negada). Només llavors el programa FPGA sortirà de la seva posició de repòs i començarà a fer la regulació del motor. Un cop activat, la variable "Control" té una realimentació que manté la activa fins que no succeeixi alguna acció d'aturada.

Si en qualsevol moment, es detecta que no hi ha excitació o bé es prem el pulsador d'emergència o es prem el pulsador de "Desactivar", automàticament la senyal de control que rebria l'FPGA passaria a zero (Control OFF) i el programa aturaria tot el sistema i inhibiria els ponts de tiristors anant a una posició de seguretat. Llavors per pantalla s'avisaria a l'usuari del succés, amb un missatge de "No hi ha excitació" o "Pulsador d'Emergència" si és el cas. Si l'usuari intenta tornar a iniciar el procés sense l'excitació, li tornaria a sortir un missatge per pantalla de "No hi ha excitació".

Hi ha una excepció on el programa pot executar-se sense l'excitació, i es quan es té seleccionada l'estructura del llaç d'intensitat. Quan l'usuari entra en aquesta pantalla, rep un missatge d'advertència dient que la seguretat de l'excitació queda deshabilitada, ja que aquesta pantalla serveix per ajustar el llaç intern del control en cascada, i es fa sense l'excitació. Un cop l'usuari surt d'aquesta pantalla, la detecció d'excitació queda reestablerta de nou. Aquesta excepció, queda reflectida en l'equació lògica anterior mitjançant una OR entre la detecció d'excitació i Llaç\_I, referint-se a la pantalla de llaç d'intensitat. Per tant, només quan et trobes en la pantalla de llaç d'intensitat ( $Llaç\_I = 1$ ) la seguretat de l'excitació queda sense efecte.

Dins el llaç de procés es troba el subVI `fpga_w_r.vi` que entre altres coses conté la part de recepció de dades analògiques procedents del programa FPGA. Aquestes dades són llegides a una velocitat de 150 ms per cicle. El programa FPGA s'executa a una velocitat de 200 us per cicle, per tant en un cicle de programa principal el programa FPGA s'ha executat 750 vegades i, sabent que escriu 6 valors en cada cicle, a la memòria FIFO haurà escrit un total de 4500 valors. Aquests valors són els llegits pel programa principal però només s'aprofiten els 6 primers valors, sense llegir tota la resta. Aquest submostreig a 150 ms és necessari realitzar-lo ja que si bé el programa FPGA necessita realitzar els càlculs amb dades preses cada 200 us, a l'hora de fer la representació gràfica i les operacions amb els

valors no és necessari ni aconsellable mostrejar tant ràpidament ja que el volum de dades seria massa elevat per treballar.

A continuació hi ha una figura del programa que llegeix les dades provinents de la memòria FIFO i les extreu en un indicador tipus clúster. Aquestes dades analògiques són enviades a la resta de subVI's del programa per ser processades i obtenir els resultats i les representacions gràfiques desitjades.

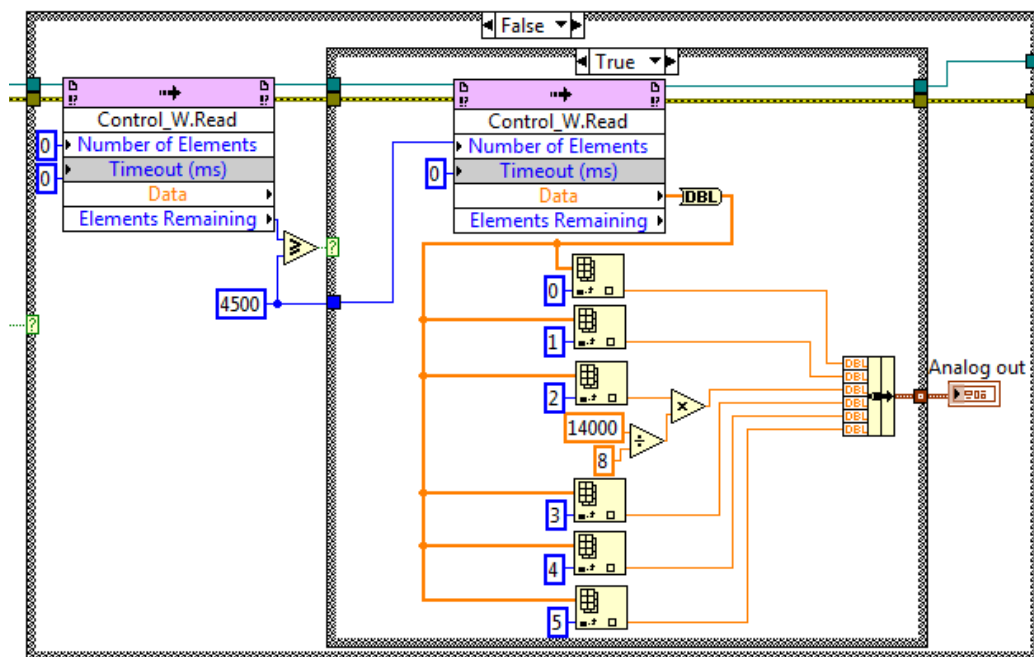


Figura 65. Codi de lectura de variables analògiques

En el mateix llaç de procés s'executa el subVI Tfre.vi que decideix el parell de fre que efectua el motor brushless sobre l'eix del motor de corrent continu. Aquest parell pot ser constant o variable amb la velocitat segons esculli l'usuari mitjançant un selector en el panell frontal del programa principal.

Si l'usuari escull parell constant, el parell de fre és simplement el valor que escull l'usuari mitjançant el control de parell de fre del panell frontal. Si en canvi l'usuari escull parell variable amb la velocitat, el programa determina el parell de fre segons la lectura de velocitat de l'encoder del motor brushless tot seguint una recta.



En la figura següent es mostra com varia el parell de fre en funció de la velocitat.

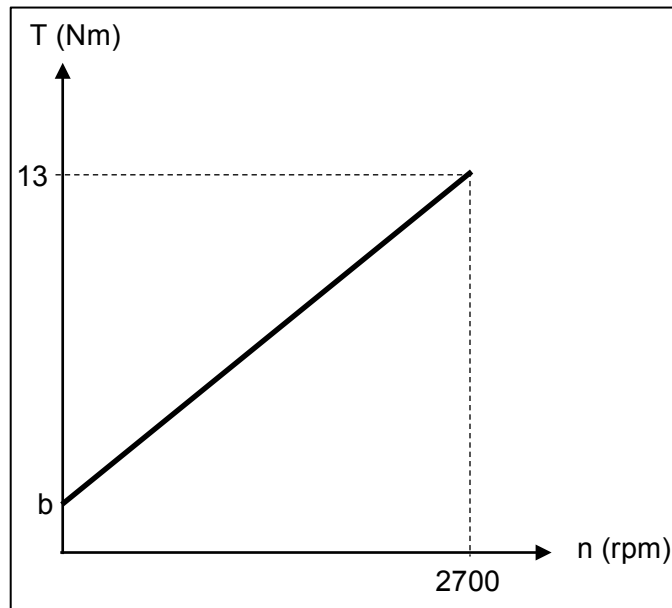


Figura 66. Parell de fre en funció de la velocitat

La recta s'ajusta per a que el motor brushless apliqui un parell de 13 Nm (parell nominal del motor de corrent continu) quan la velocitat sigui de 2700 rpm (velocitat nominal del motor de corrent continu). Per defecte s'aplica un parell de 1 Nm quan el motor de corrent continu arrenca (velocitat gairebé zero) per tal d'evitar la conducció discontinua dels tiristors ( $b=1\text{Nm}$ ). El parell de fre d'arrencada pot ser modificat en la interfície d'usuari.

A continuació, hi ha l'organigrama del programa que mostra de forma general com es determina el parell de fre del motor brushless.

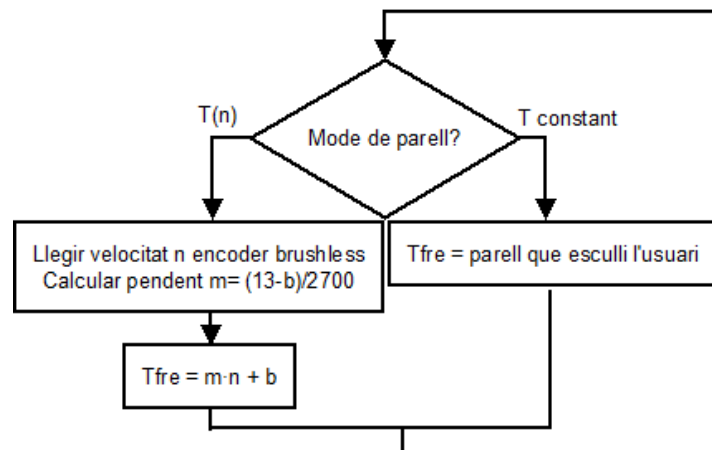


Figura 67. Organigrama càlcul del parell de fre

En el llaç de gestió d'events també s'hi troben alguns SubVI's importants com el de generació d'una rampa de consigna de velocitat. L'usuari ha d'indicar l'increment de velocitat que desitja (positiu o negatiu) i el temps en segons que es tardarà a assolir aquest increment.

En la figura següent, es mostra un exemple de rampa de consigna de velocitat on l'increment és de 2000 rpm i el temps de rampa és de 10 segons. En aquest exemple es dóna l'ordre d'aplicar la rampa quan la velocitat del motor és de 500 rpm per tant, la consigna evoluciona progressivament fins a les 2500 rpm on queda estabilitzada.

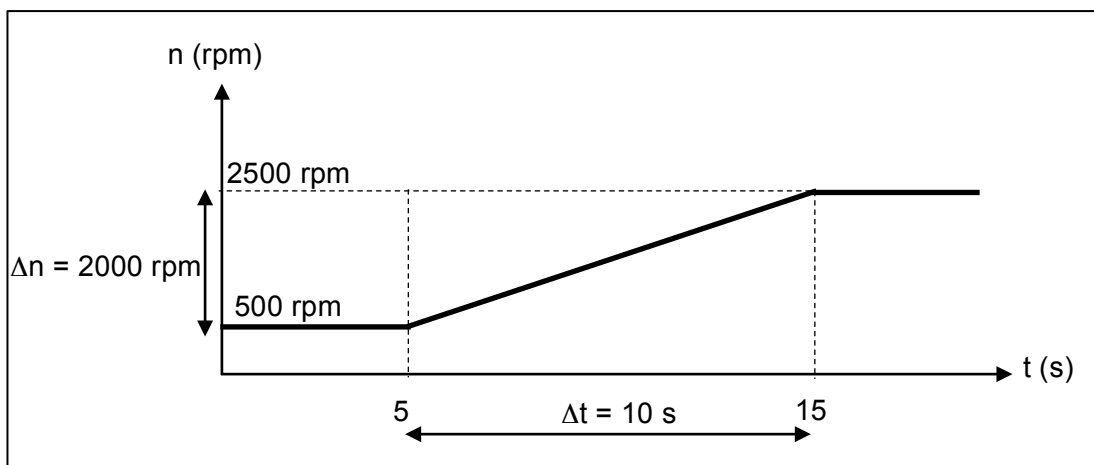


Figura 68. Rampa de consigna de velocitat

## 7 SINTONIA DELS CONTROLADORS

En aquest apartat s'explicarà com s'ha realitzat la sintonia dels dos controladors PI del sistema de regulació de velocitat en les proves de test de la plataforma. Per trobar els paràmetres característics ( $K_p$  i  $T_i$ ) s'ha utilitzat el mètode d'ajust per assaig i error.

El mètode d'ajust per assaig i error és el sistema més comú de sintonització que es pot trobar en els manuals de fabricant de drivers per a controladors de motors de corrent continu. Si bé es pot considerar un mètode poc científic i molt basat en l'experiència, s'aconsegueix determinar els paràmetres dels controladors per obtenir una resposta ràpida i precisa del sistema. Aquest mètode presenta com a avantatge principal el fet de que no és necessari saber el model del sistema ni cap de les seves funcions de transferència.

### 7.1 PI d'intensitat

Primer de tot cal sintonitzar el PI intern d'intensitat. Tal com s'explica en l'apartat 2.4 Estructures de control necessàries, aquest ajust es realitza amb l'excitació desconnectada. L'estructura utilitzada de les tres explicades és la 2.4.3 Llaç d'intensitat i és la mostrada en la figura en la que només intervé el llaç intern d'intensitat.

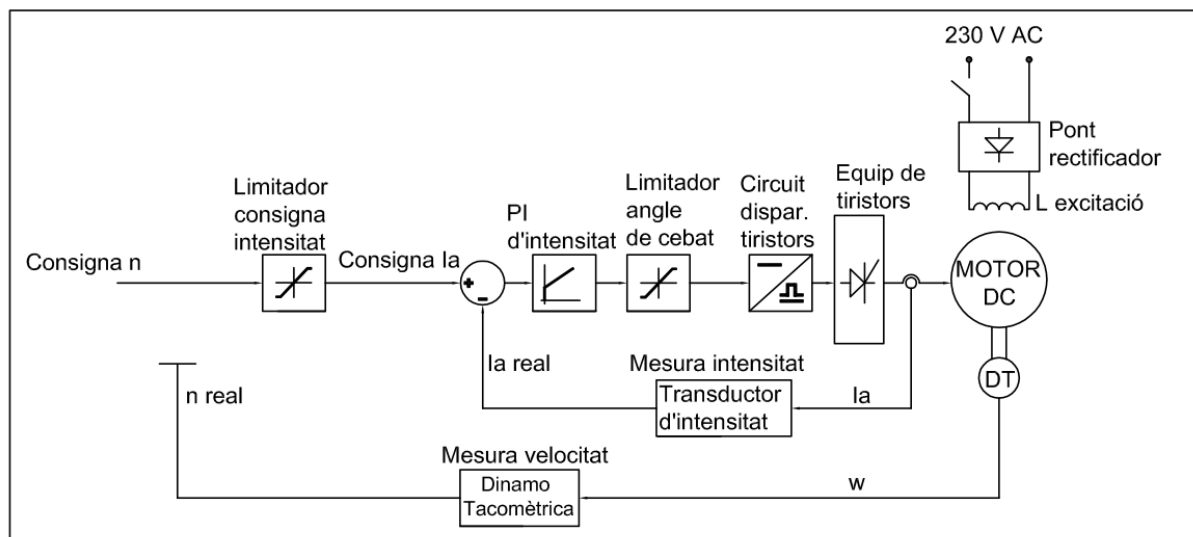


Figura 69. Llaç d'intensitat

Inicialment s'ha de posar els guany proporcional del PI d'intensitat igual a la unitat i un temps integral molt gran per anul·lar l'acció integral del controlador. S'ha de començar situant el limitador de consigna de intensitat al mínim. Cal anar molt en compte, ja que quan

s'alimenta l'induït del motor de corrent continu sense excitació, si bé el motor no és capaç de girar, amb poca tensió tindrem un valor elevat d'intensitat per la qual cosa s'ha d'assegurar que el limitador de consigna d'intensitat està al mínim (0 Volts). Es tracta de donar una consigna de velocitat alta (per exemple 8 Volts) i anar augmentant paulatinament el limitador de consigna d'intensitat fins que circulin per l'induït els 15 A d'intensitat nominal del motor.

De la mateixa manera que es planteja en la pràctica didàctica corresponent, en aquest assaig s'ha decidit ser més conservador i s'ha ajustat el limitador de consigna d'intensitat a 8,5V permetent una intensitat màxima de 12,75 A. Aquest valor d'ajust d'intensitat límit adoptat es justifica perquè correspon a un parell de 11 Nm, aproximadament el parell nominal del motor brushless. Llavors ja es té el limitador de consigna d'intensitat correctament ajustat per evitar que en un moment determinat es pugui disparar la intensitat, superar el seu valor nominal i danyar el motor.

Un cop finalitzat el primer pas, ja es pot procedir a determinar els paràmetres del controlador del llaç intern d'intensitat. Es comença introduint un guany proporcional igual a la unitat i es deixa el temps integral infinit per eliminar l'acció integral. Es tracta de donar una consigna alta que faci passar intensitat pel motor, que recordem, està sense excitació. A continuació hi ha l'esquema del llaç de regulació amb el limitador de consigna d'intensitat ajustat a 8,5V i el guany proporcional que s'ha d'ajustar del controlador intern d'intensitat. La sortida de tensió que va dirigida al circuit de disparament dels tiristors s'ha connectat al canal A de l'oscil·loscopi Hameg HM1008 per tal de obtenir una visualització del comportament d'aquesta variable al llarg del procés de sintonització dels controladors.

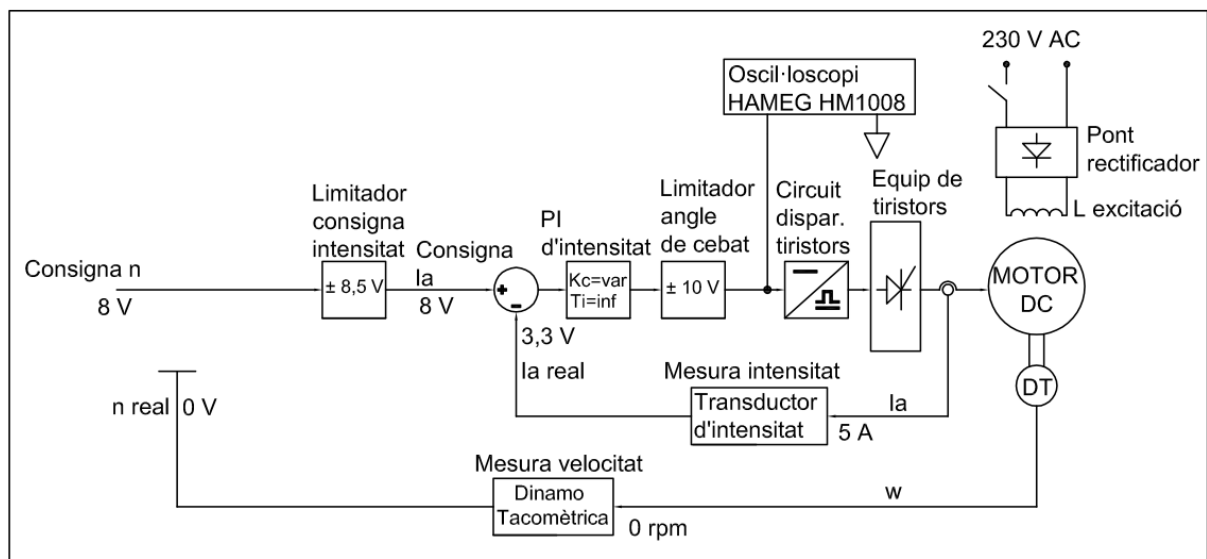


Figura 70. Llaç d'intensitat ajustant PI intern

Amb guany unitari circulen 5A per l'induït del motor i la sortida del controlador oscil·la de forma contínua i permanent al voltant de 5V. Aquesta oscil·lació del llaç indica que el guany és massa elevat, per tant caldrà disminuir aquest guany de forma progressiva per eliminar les oscil·lacions. En la figura següent hi ha una captura mostrant la oscil·lació de la sortida.

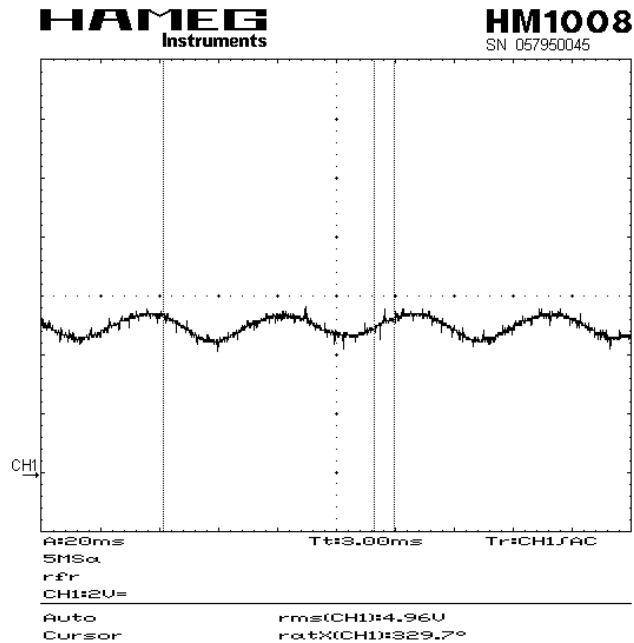


Figura 71. Captura de la sortida de tensió

S'ha anat reduït el valor del guany proporcional fins a arribar a un guany  $K_c = 0,4$ . Per aquest guany la intensitat continua essent de 5A però ara la sortida (i el llaç en general) es troba críticament estable. A continuació hi ha una captura de la sortida estable.

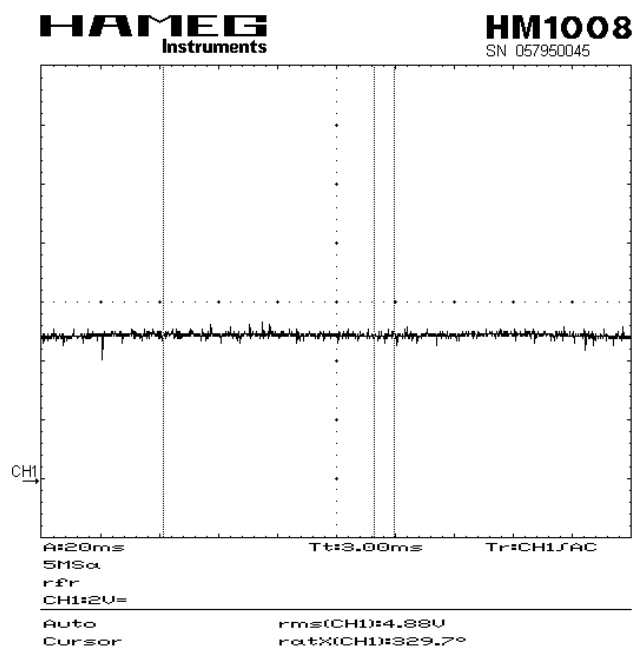


Figura 72. Captura de la sortida de tensió estable

Es pot dir que el guany  $K_c = 0,4$  és el guany límit pel qual si s'augmenta el seu valor el llaç comença a oscil·lar de nou.

Per obtenir el guany  $K_p$  del controlador es divideix per dos aquest guany proporcional que està al límit de les oscil·lacions sostingudes. En aquest cas, s'ha obtingut un guany  $K_p$  de 0,2.

A continuació, amb el guany proporcional trobat es procedeix a disminuir el temps integral fins que la sortida torna a oscil·lar de forma permanent i estable. Es comença amb un temps integral de 0,1 i s'observa que la sortida no oscil·la. Es procedeix a disminuir aquest valor i es veu com amb un temps integral  $T_i = 0,02$  s la sortida torna a començar a oscil·lar tal com es veu a la figura següent.

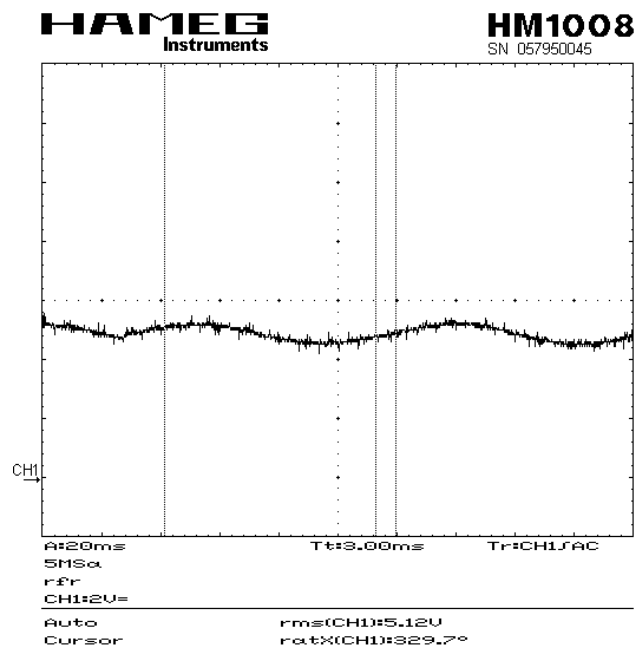


Figura 73. Captura de la sortida de tensió oscil·lant

Llavors, es multiplica per dos el temps integral que provoca aquestes oscil·lacions sostingudes i s'obté el temps integral  $T_i$ . En aquest cas, s'ha obtingut un temps integral  $T_i$  de 0,04 segons.

Amb els paràmetres  $K_p = 0,2$  i  $T_i = 0,04$  ja s'ha sintonitzat el llaç intern d'intensitat del control en cascada.

## 7.2 PI de velocitat

Un cop sintonitzat el llaç intern d'intensitat es procedeix a fer la sintonització del llaç extern de velocitat, on també es determina el guany proporcional  $K_p$  i el temps integral  $T_i$ .

En aquest cas, els paràmetres no són tant crítics i per tant hi ha marge de maniobra per estimar els dos valors ( $K_p$  i  $T_i$ ). Es sap que el controlador extern de velocitat és més lent que l'intern d'intensitat, per tant es pot assegurar que el temps integral  $T_i$  serà bastant més elevat dels 0,04 segons que s'han trobat en el cas del llaç intern.

Els manuals de fabricants de drivers aconsellen determinar els paràmetres  $K_p$  i  $T_i$  del llaç de velocitat mitjançant l'aplicació d'un graó i analitzant la resposta del sistema. En aquest projecte s'aplica una consigna graó de 2V (540rpm) quan el motor ja està girant a 540 rpm i s'analitza l'evolució de la velocitat real que mesura la dinamo tacomètrica. A continuació hi ha una figura on en color negre hi ha representat la consigna de graó i en color vermell hi ha la velocitat real que mesura la dinamo tacomètrica.

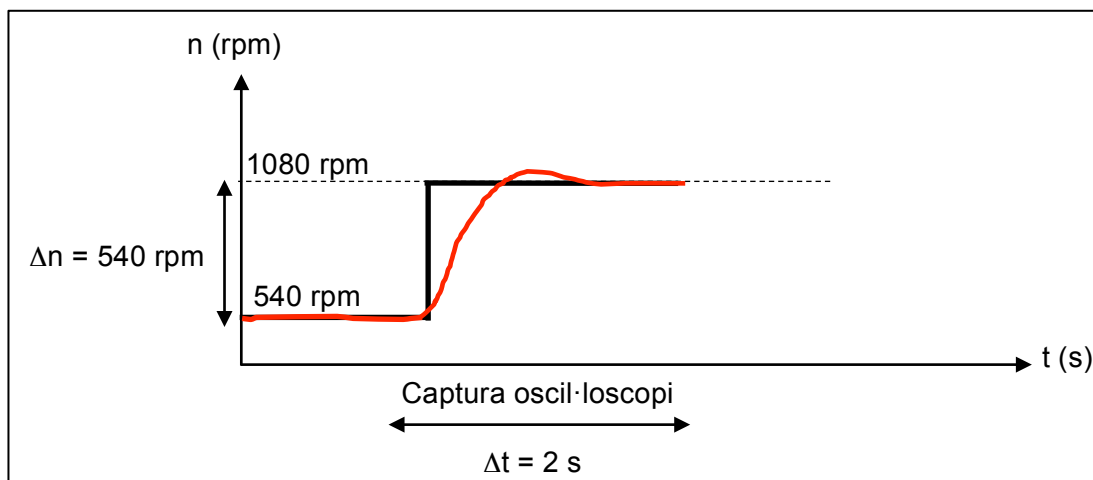


Figura 74. Assaig de graó de velocitat

Es vol trobar uns paràmetres  $K_p$  i  $T_i$  que redueixin el sobrepic que pot tenir la velocitat real però alhora es vol que el temps d'establiment sigui relativament curt. Doncs que no es tracta d'un servosistema, per assolir una velocitat davant un graó s'accepta un temps d'establiment de fins a 1,5 – 2 segons. Per això, la captura de les dues senyals que es fa amb l'oscil·loscopi s'arriba fins als 2 segons.

A continuació hi ha una figura que mostra com queda el llaç en cascada per a la determinació dels paràmetres del controlador de velocitat. Cal destacar que per fer aquesta sintonització ja es treballa amb l'excitació connectada (funcionament normal).

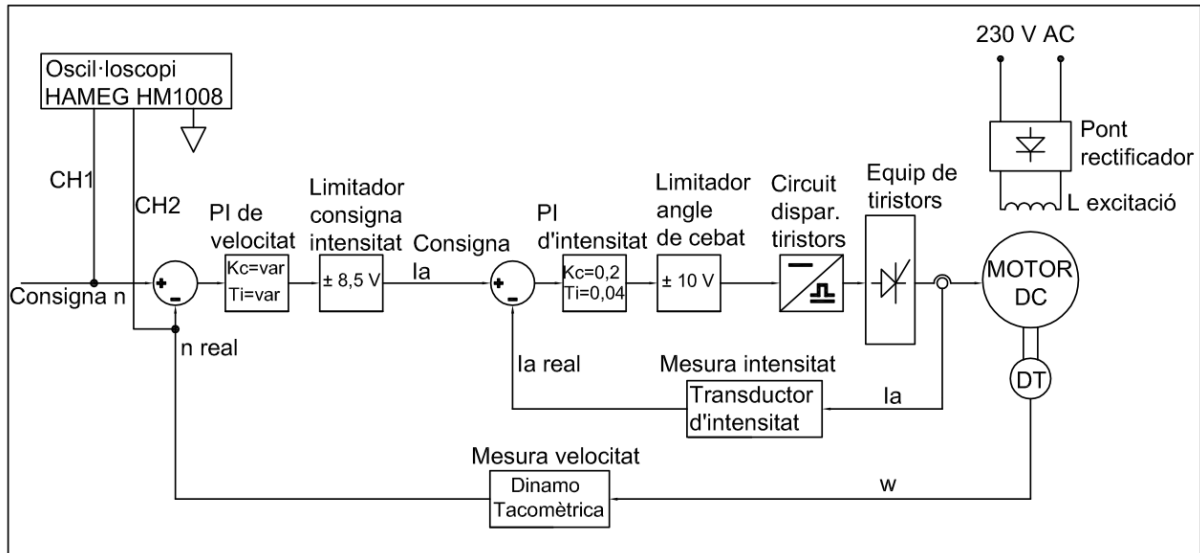


Figura 75. Llaç en cascada per ajustar PI extern

Es comença provant uns paràmetres  $K_p$  i  $T_i$  deu vegades més grans que els trobats en el llaç intern, per tant es prova la resposta graó amb  $K_p = 2$  i  $T_i = 0,4$ . Amb aquests paràmetres s'obté la següent resposta graó:

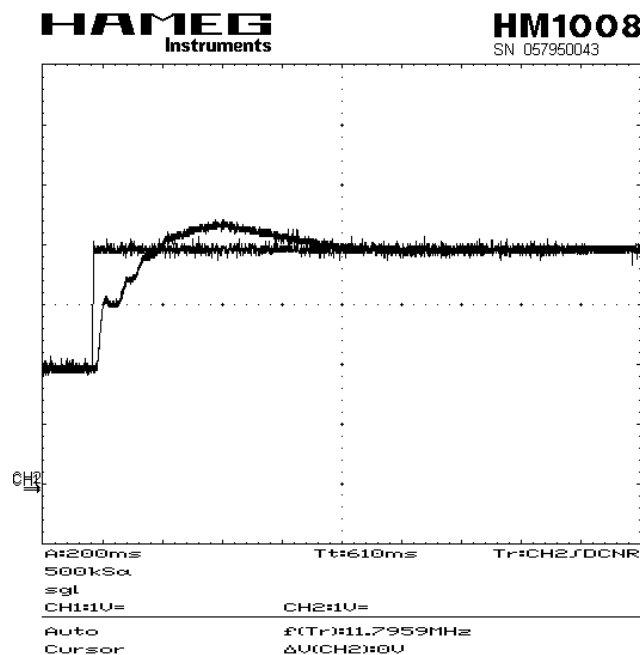


Figura 76. Captura de graó de consigna i velocitat real



En la captura de l'oscil·loscopi veiem com amb els paràmetres escollits en un segon aproximadament la velocitat de rotació real ja ha assolit la consigna de 1080 rpm (4V) per la qual cosa la rapidesa del control és més que acceptable. Tanmateix, el sobrepic que hi ha per assolir aquesta velocitat de consigna és bastant considerable (aproximadament 0,5V que són 135 rpm). Si bé aquest paràmetres segurament ja anirien bé per a la regulació, s'intentarà reduir una mica el sobrepic en busca d'uns ajustos més fins tenint en compte que a l'intentar reduir aquest sobrepic sens dubte augmentarà el temps d'establiment de la velocitat.

Es decideix reduir el sobrepic augmentant el temps integral  $T_i$  fins als 0,4 segons. Es manté igual el guany proporcional  $K_p = 2$ . A continuació es mostra la captura de l'oscil·loscopi amb els resultats obtinguts.

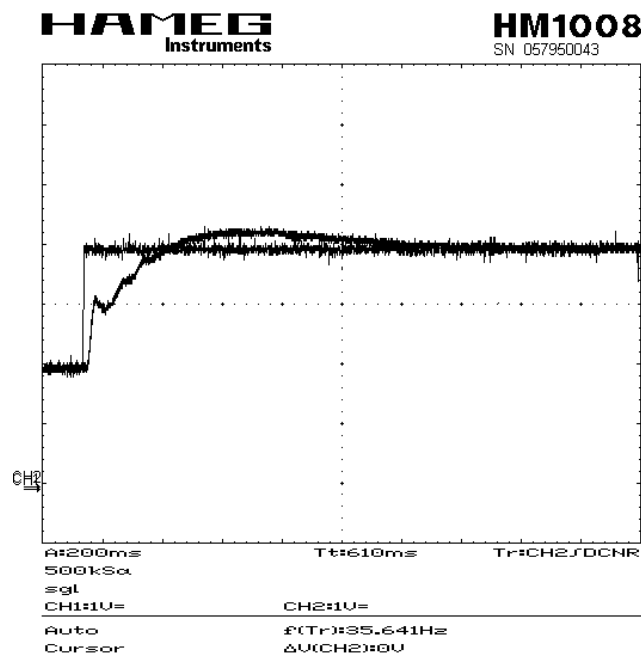


Figura 77. Captura de graó de consigna i velocitat real més lenta

Es veu com efectivament s'ha reduït lleugerament el sobrepic mentre que el temps d'establiment ha augmentat una mica. S'intentarà reduir encara més el sobrepic ja que el temps d'establiment encara té marge per augmentar.

Es manté  $K_p = 2$  i s'augmenta el temps integral  $T_i$  fins als 0,6 segons. Amb aquests ajustos, els resultats obtinguts són els següents:

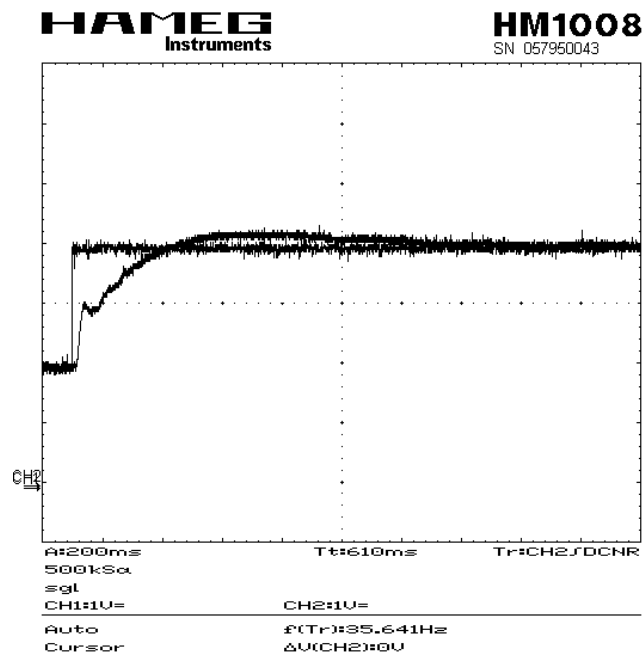


Figura 78. Captura de graó de consigna i velocitat real òptima

Veient aquesta figura es pot concloure que s'ha obtingut un sobrepic molt baix i un temps d'establiment inferior als 2 segons, per tant es poden donar aquests paràmetres com a bons.

En la taula següent, es mostren els paràmetres obtinguts dels dos controladors del sistema de regulació en cascada.

Paràmetre	PI de velocitat	PI d'intensitat
$K_p$	2	0,2
$T_i$	0,6	0,04

Taula 14. Paràmetres dels controladors escollits

Els paràmetres trobats en aquest capítol seran els que s'aplicaran per defecte als controladors del llaç en cascada en el programa LabVIEW. Tanmateix, l'usuari tindrà la possibilitat de modificar aquests paràmetres en qualsevol moment per tal de poder estudiar el comportament del llaç quan varien els guanys dels controladors.

## 8 MOSTRA DE RESULTATS DE LA REGULACIÓ EN CASCADA

En aquest capítol es mostren els resultats obtinguts amb l'aplicació desenvolupada de la regulació de la velocitat en cascada del motor de corrent continu. Totes les representacions gràfiques que apareixen han estat adquirides de forma real mitjançant l'aplicació LabVIEW amb l'estructura de llaç en cascada.

La primera de les proves que s'ha realitzat té com objectiu obtenir la resposta del sistema davant un canvi bruscat de consigna. Quan el motor girava de forma estable a 1500 rpm s'ha donat una consigna grada de -3000 rpm per tal de fer girar el motor a -1500 rpm. S'ha aplicat aquest canvi instantani de consigna de velocitat amb un parell de fre relativament baix (2 Nm) buscant obtenir una captura del fenomen de frenat elèctric explicat en el capítol 2.2 Funcionament en els quatre quadrants.

A continuació hi ha una evolució temporal de la consigna de velocitat en Volts (color vermell) i la velocitat real que indica la dinamo tacomètrica en Volts (color verd). S'observa que en règim permanent les dues senyals queden completament superposades gràcies a l'acció del control en cascada (error de velocitat nul en règim permanent) i que durant el grada de -3000 rpm la velocitat real evoluciona més lentament que la consigna (degut a la pròpia inèrcia del sistema) i després de fer un sobrepic acaba estabilitzant-se a -1500 rpm tal com indica la consigna.

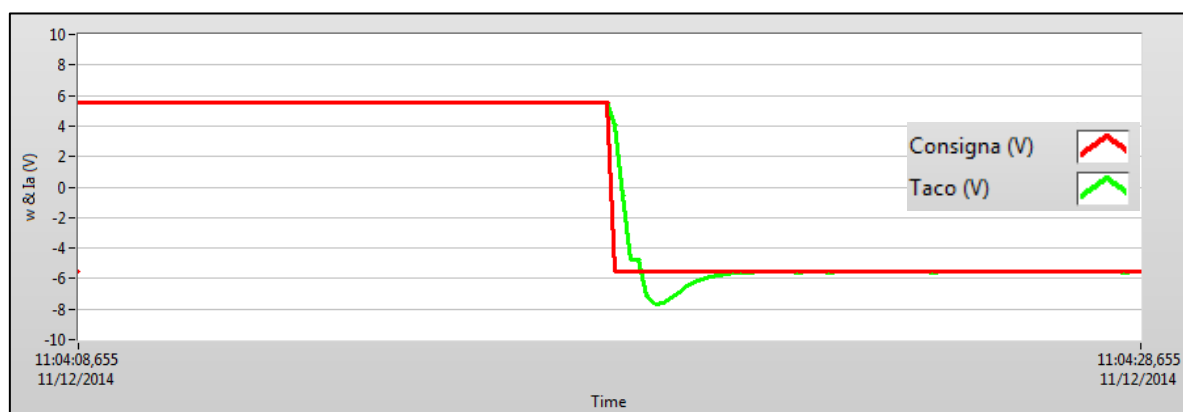


Figura 79. Gràfica real de grada de velocitat

Mitjançant la representació gràfica dels quatre quadrants que ofereix el panell frontal de l'aplicació LabVIEW es pot observar que efectivament hi ha hagut el fenomen de frenat elèctric. Durant uns instants s'ha passat a treballar al segon quadrant (velocitat encara positiva i intensitat d'induit ja negativa). En aquest quadrant la màquina de corrent continu fa de generador i per tant hi ha una acció de frenat elèctric. L'energia mecànica emmagatzemada pel sistema inercial de l'accionament fa que transitòriament hi hagi en l'eix una acció motriu sobre el generador de corrent continu. L'energia mecànica és així dissipada en aquest segon quadrant per aquest efecte de frenat elèctric ajudant a assolir més ràpidament la consigna de velocitat negativa (-1500 rpm).

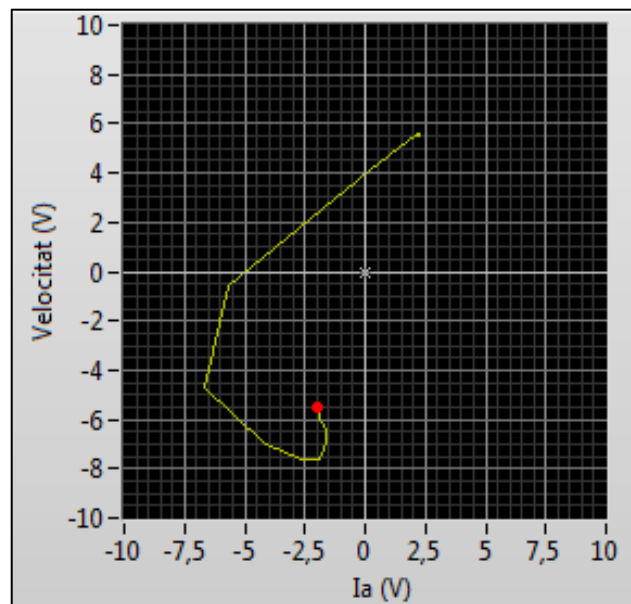


Figura 80. Gràfica real de frenat elèctric

Segurament amb un graó de consigna de velocitat menor i/o amb un parell de fre més elevat no tindria lloc el frenat elèctric perquè el propi parell de fre del brushless ajudaria a frenar l'eix i assolir la nova velocitat sense que s'arribés a passar pel segon quadrant.

L'aplicació de regulació en cascada incorpora un polsador per inhibir el pont B de tal manera que si s'apliqués ara el mateix graó es veuria que sense opció de treballar al segon quadrant (sense frenat elèctric) la velocitat real tardaria més en assolir els -1500 rpm al frenar només per la pròpia inèrcia del motor.

Per comprovar visualment el bon funcionament del sistema de control, s'han realitzat dues proves més de funcionament del sistema en cascada.

En la següent figura es mostra l'evolució de la velocitat real de l'eix del motor davant una consigna de velocitat tipus rampa, amb un increment de 1500 rpm en 5 segons. Es pot veure com en tot moment el control és capaç de seguir la consigna de velocitat i només es poden arribar a apreciar els petits sobrepics de velocitat típics de tot sistema de control en iniciar i acabar la rampa.

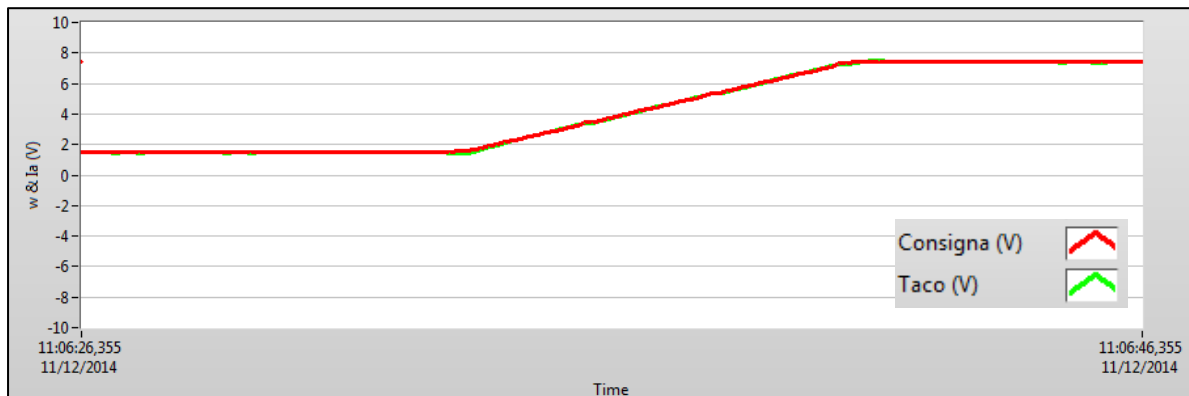


Figura 81. Gràfica real de rampa de consigna de velocitat

La següent figura mostra l'evolució de la velocitat real davant una consigna de velocitat variable en tot moment mitjançant petits graons i rampes. Es pot veure com la velocitat real (color verd) intenta seguir en tot moment la consigna i només hi ha diferències en moments transitoris.

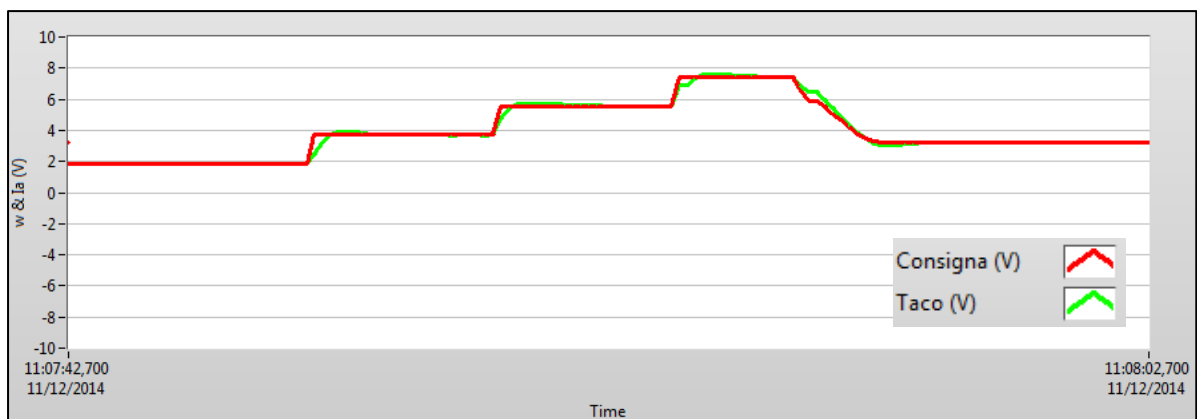


Figura 82. Gràfica real de consigna de velocitat i velocitat real

Amb aquestes proves s'ha pogut constatar que l'aplicació desenvolupada del control en cascada del motor de corrent continu té un funcionament correcte i el comportament de tot el conjunt segueix els principis teòrics del control de velocitat d'un motor de corrent continu.

Es pot concloure que la sintonització dels paràmetres dels controladors pel mètode d'assaig i error ha estat satisfactòria ja que el comportament del motor de corrent continu visualitzat en les diverses figures d'aquest capítol així ho demostra.

## **9 RESUM DEL PRESSUPOST**

El valor estimat de la plataforma didàctica amb NI CompactRIO per a la regulació de velocitat en cascada d'un motor de corrent continu és de sis mil set-cents noranta euros amb setanta cèntims, sense IVA.

## 10 CONCLUSIONS

Mitjançant les eines de programació que ofereix LabVIEW i gràcies a l'arquitectura CompactRIO s'ha pogut assolir els tres objectius fonamentals que es marcaven en aquest projecte. En primer lloc, s'ha realitzat satisfactòriament un programa de control manual de la màquina brushless que permet fer-la funcionar com a motor o com a fre segons desitgi l'usuari. També s'ha implementat amb èxit una aplicació d'estudi en llaç obert del funcionament en els quatre quadrants de la màquina de corrent continu. Finalment, gràcies a la programació en FPGA també s'ha aconseguit dissenyar una aplicació pràctica per a la regulació en cascada de la velocitat del motor de corrent continu tot incorporant tots els sistemes de control, visualització i supervisió necessaris.

La interfície d'adquisició i condicionament de senyals s'ha confeccionat mitjançant tres plaques de circuit imprès i una placa Lenze de condicionament de senyals de tal manera que es realitzen totes les connexions necessàries entre els elements del sistema. També s'ha contemplat la possibilitat de desconectar el CompactRIO del sistema mitjançant la utilització de connectors tipus DB i amb terminals per als mòduls d'entrades i sortides del CompactRIO.

S'han implementat dos sistemes de seguretat per protegir els elements de la instal·lació davant possibles incidències. Per una banda la plataforma incorpora un polsador d'emergència per aturar el procés en qualsevol moment i per altra banda l'excitació del motor de corrent continu incorpora un sistema de detecció d'intensitat que dona l'ordre d'aturar el motor si no hi ha alimentada l'excitació.

S'ha aconseguit per tant realitzar una plataforma didàctica per al Laboratori de Màquines Elèctriques que permetrà als alumnes portar a terme les pràctiques referides al control de velocitat del motor de corrent continu.

Jordi Suy Ollé

Graduat en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

Girona, 5 de desembre de 2014



## **11 RELACIÓ DE DOCUMENTS**

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

## 12 BIBLIOGRAFIA

ALPHA WIRE. Cable apantallat parell trenat. (<http://www.alphawire.com/Home/Products/Cable/Communication-Control-Industrial-Cable/Communication-Control/5471C>, 3 de novembre de 2014).

ELDON. Caixa per a projectes. ([www.eldon.com/Templates/Commerce/Pages/ServeAsset.aspx?asset=1424856](http://www.eldon.com/Templates/Commerce/Pages/ServeAsset.aspx?asset=1424856), 2 de novembre de 2014).

FAIRCHILD SEMICONDUCTORS. Reguladors de tensió LM. (<http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/>, 29 de setembre de 2014).

FAIRCHILD SEMICONDUCTORS. Transistor BC547C. (<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/BC/BC547.pdf>, 29 de setembre de 2014).

FINDER. Relé 6V. ([https://www.schukat.com/schukat%5Cpdf.nsf/index/0D8D522C857019F2C125729800346F1A/\\$file/S30EN.pdf](https://www.schukat.com/schukat%5Cpdf.nsf/index/0D8D522C857019F2C125729800346F1A/$file/S30EN.pdf), 30 de setembre de 2014)

INFRANOR. Driver del motor brushless ([www.infranorusa.com/support/pdf/digital.pdf](http://www.infranorusa.com/support/pdf/digital.pdf), 12 de setembre de 2014).

LEM. Transductor d'intensitat. ([www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf](http://www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf), 15 de setembre de 2014).

LENZE. Placa d'aïllament galvànic bipolar. ([http://www.sainel.es/intraweb/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=79&Itemid=4](http://www.sainel.es/intraweb/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=79&Itemid=4), 2 de setembre de 2014).

NATIONAL INSTRUMENTS. CompactRIO i mòduls e/s (<http://www.ni.com/compactrio/esa/>, 30 d'agost de 2014).

NATIONAL INSTRUMENTS. Font d'alimentació 24V ([www.ni.com/pdf/manuals/372911a.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/372911a.pdf), 10 de setembre de 2014).

NATIONAL INSTRUMENTS. Llenguatge de programació (<http://spain.ni.com/>, 29 de setembre de 2014).

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

PANASONIC. Relé 15V (<https://www.panasonic-electric-works.com/eu/download.htm?id=55730>, 19 de setembre de 2014).

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

PUIGMAL, JOAN. Apunts Control de màquines elèctriques, Control de motors de corrent continu. Publicació UdG 2013.

RS-ONLINE. Catàleg i relació de preus. (<http://es.rs-online.com/web/>, 20 de setembre de 2014).

SABER. Transformador simètric 230/18V 12VA. (<http://www.sabersl.com/>, 21 de setembre de 2014).

SEMIKRON. Equip de disparament de tiristors. ([www.sindopower.com/out/media/datasheet\(1\).pdf](http://www.sindopower.com/out/media/datasheet(1).pdf), 28 de setembre de 2014).

TEXAS INSTRUMENTS. Integrat TL074. (<http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=tl074-ep&fileType=pdf>, 15 de setembre de 2014).

TEXAS INSTRUMENTS. Optoacobrador TIL111. (<http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=til111&fileType=pdf>, 1 de setembre de 2014).

TRACOPOWER. Convertidor dc-dc. ([www.tracopower.com/products/tma.pdf](http://www.tracopower.com/products/tma.pdf), 18 de setembre de 2014).

## 13 GLOSSARI

DMA: Direct Memory Access

f.e.m. : Electromotive Force

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 continuació hi ha una taula on s'engloben totes les entrades i sortides, tant analògiques com digitals, del projecte. La taula incorpora el nom de variables que s'utilitzen en tots els programes realitzats per referir-se a una entrada/sortida concreta, el mòdul on es troba la variable, el tipus de variable que és i una breu descripció del paper que té la variable dins el programa.

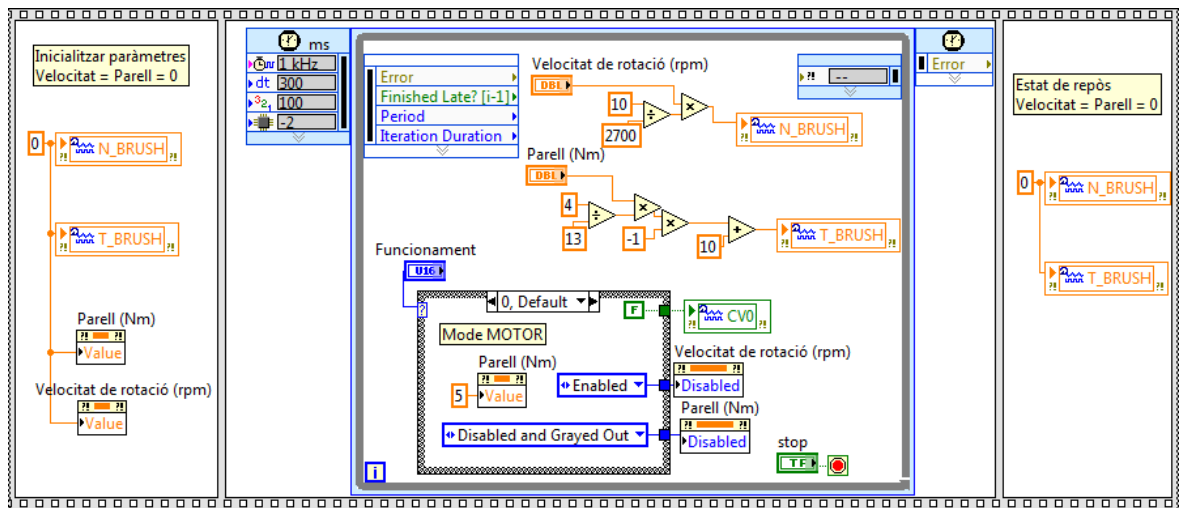
Mòdul	Tipus	Nom variable	Descripció
Mod1/AI0	Analog IN	VEL_BRUSH	Monitor de velocitat del brushless
Mod1/AI1	Analog IN	HALL_IA	Mesura d'intensitat del transductor
Mod1/AI2	Analog IN	TACO	Mesura de velocitat de la dinamo
Mod2/AO0	Analog OUT	VA	Tensió de consigna del pont A
Mod2/AO1	Analog OUT	VB	Tensió de consigna del pont B
Mod2/AO2	Analog OUT	N_BRUSH	Consigna de velocitat del brushless
Mod2/AO3	Analog OUT	T_BRUSH	Consigna de parell de fre del brushless
Mod4/DIO0	Digital OUT	CV0	Contacte CV0 del brushless
Mod4/DIO1	Digital OUT	INHA	Inhibició del pont de tiristors A
Mod4/DIO2	Digital OUT	INHB	Inhibició del pont de tiristors B
Mod4/DIO4	Digital IN	EM	Polsador d'emergència NC
Mod4/DIO4	Digital IN	EXC	Detecció de l'excitació

Taula 15. E/S programa

Cal comentar que el mòdul Mod3 és un mòdul present en el CompactRIO però que no s'utilitza en aquest projecte (es tracta d'un mòdul exclusivament d'entrades digitals) per tant es passa directament del Mod2 al Mod4 en la numeració dels mòduls.

A.1 Programa brushless manual

A continuació hi ha el diagrama de blocs del programa de funcionament manual del brushless.



Taula 16. Codi LabVIEW brushless manual

La taula següent enumera totes les variables utilitzades en aquest programa de funcionament manual del motor brushless.

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Booleà	Control	Stop	Pulsador per aturar el programa
Integer	Control	Funcionament	Control desplegable per escollir si el brushless fa de motor o de fre
Double	Control	Parell (Nm)	Consigna de parell de fre del brushless
		Velocitat de rotació (rpm)	Consigna de velocitat de rotació del brushless

Taula 17. Variables programa brushless manual

A.2 Programa funcionament manual als quatre quadrants

A continuació hi ha el diagrama de blocs i la taula de variables del programa.

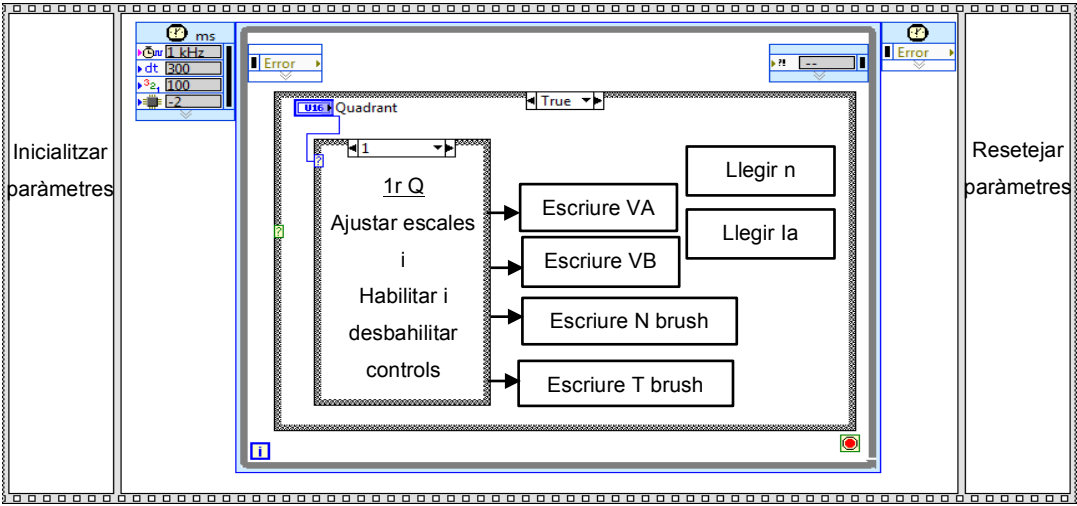


Figura 83. Codi LabVIEW manual als 4Q

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Booleà	Control	Stop	Polsador per aturar el programa
	Indicador	1rQ, 2nQ, 3rQ, 4tQ	Indicadors de que el motor està treballant al 1rQ, 2nQ, 3rQ o 4tQ
		No hi ha exc.	Indicador de que no hi ha excitació
Integer	Control	Quadrant	Control desplegable per escollir a quin quadrant treballa el motor de corrent continu
Double	Control	T fre (Nm)	Consigna de parell de fre del brushless
		N rotació (rpm)	Consigna de velocitat de rotació del brushless
		Pont (A)	Consigna de tensió al pont de tiristors A
		Pont (B)	Consigna de tensió al pont de tiristors B
		10V= ...rpm	Ajust del guany de la dinamo tacomètrica (2700 rpm per defecte)
		10V= ...A	Ajust del guany del sensor Hall (15 A per defecte)
	Indicador	n real (V)	Velocitat de rotació de la dinamo tacomètrica
		n real (rpm)	
		Ia real (V)	Mesura d'intensitat del transductor d'intensitat
		Ia real (A)	

Taula 18. Variables programa manual 4Q

### A.3 Programa principal de regulació en cascada

La figura següent mostra l'estructura global del programa de regulació en cascada.

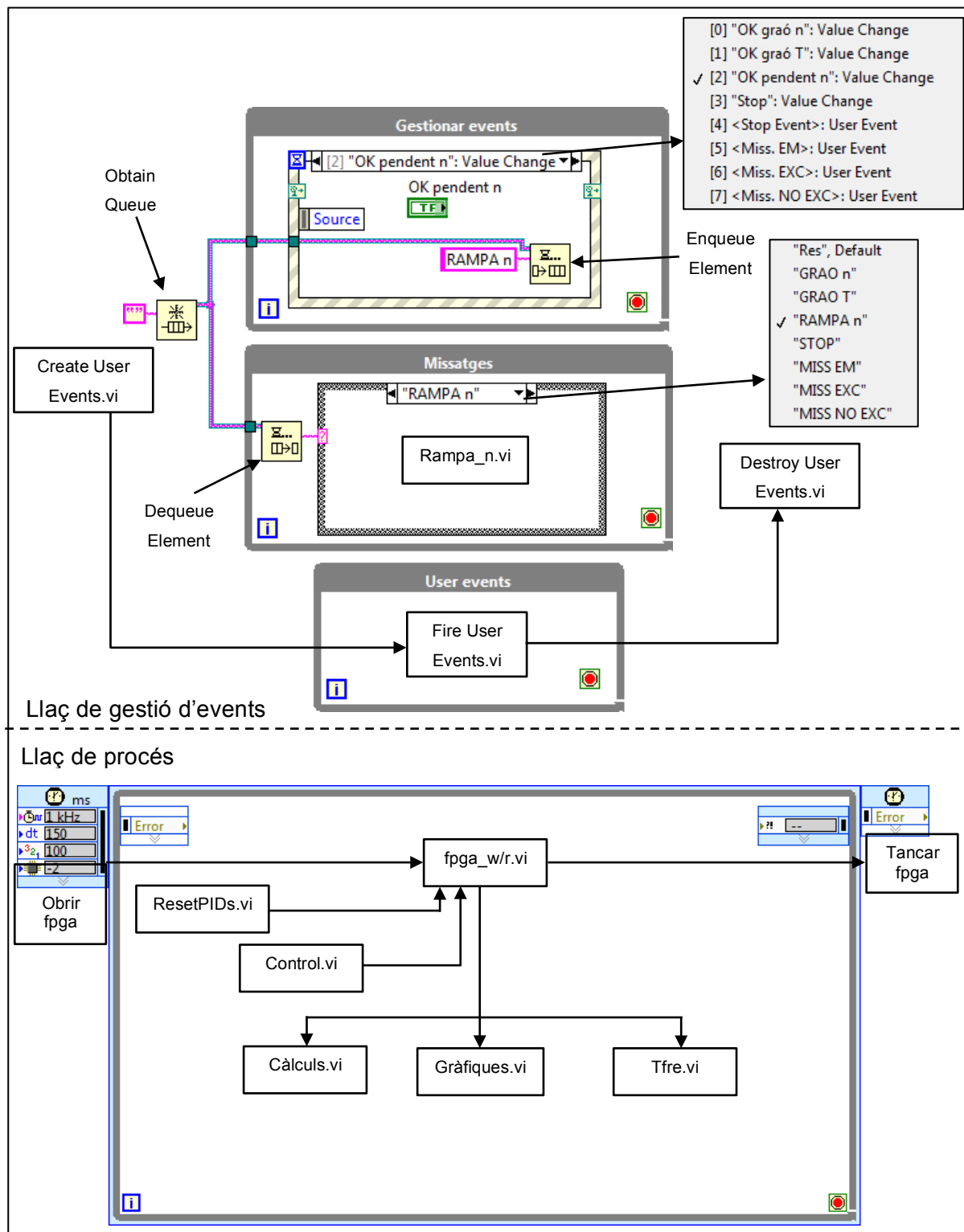


Figura 84. Codi LabVIEW regulació en cascada



A continuació hi ha la taula de variables del programa de regulació en cascada.

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Booleà	Control	Activar	Polsador per activar el control del motor
		Desactivar	Polsador per desactivar el control del motor
		Reset PID's	Polsador per resetejar els PID's del llaç
		Inh_pont B	Interruptor per inhibir el pont B manualment
		n = 0	Polsador que dóna consigna de velocitat zero
		OK graó n	Polsador per aplicar el graó de velocitat
		OK graó T	Polsador per aplicar el graó de parell
		OK pendent n	Polsador per aplicar la rampa de velocitat
		Stop	Polsador per aturar el programa
		Netejar	Polsador per netejar la gràfica dels 4Q
		Treure zoom	Polsador per treure zoom de la gràfica general
		Graficar	Interruptor per graficar les variables
		Enregistrar	Interruptor per enregistrar les variables
	Indicador	Emergència	Indicador de l'estat del polsador d'emergència NC
		Excitació	Indicador de l'estat de l'excitació
		Pont A	Indicador de l'estat del pont A
		Pont B	Indicador de l'estat del pont B
		FIFO Timeout	Indicador de que la memòria FIFO ha quedat plena
		wSAT +	Indicadors de que està actuant el limitador de consigna d'intensitat
		wSAT -	
		iSAT +	Indicadors de que està actuant el limitador d'angle de cebat
		iSAT-	
Clúster	Control	Senyals a graficar	Clúster de 5 interruptors per escollir quines senyals graficar
Integer	Control	Llaç	Control desplegable per escollir el tipus de llaç
		Rang	Control desplegable per escollir quin quadrant es vol visualitzar en el gràfic de 4Q
		Mode de parell	Control desplegable per escollir el mode de parell del motor brushless

Taula 19. Variables programa regulació en cascada 1a part

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Integer	Control	Període Ts (us)	Control numèric per escollir el període de mostreig del PID (període d'execució de l'FPGA)
Double	Control	Consigna n	Consigna de velocitat (V o rpm segons el llaç)
		Parell (Nm)	Parell de fre del motor brushless
		10V= ...rpm	Ajust del guany de la dinamo tacomètrica (2700 rpm per defecte)
		10V= ...A	Ajust del guany del transductor d'intensitat (15 A per defecte)
		Graó n	Graó de consigna que es vol aplicar
		Graó T (Nm)	Graó de parell que es vol aplicar
		Increment n	Increment de consigna i temps a assolir-lo (rampa de consigna)
		Temps n	
		T (n=0) Nm	Parell de fre inicial en el mode T(n)
	Indicador	Graó T(n)	Indicador del graó de parell aplicat quan es treballa en el mode T(n)
		n rati rpm/V	Rati de conversió de V a rpm
		la rati A/V	Rati de conversió de V a A
		Sortida (V)	Tensió de sortida que s'aplica al pont de tiristors
		Consigna n (V)	Consigna de velocitat convertida en V
		Consigna compr. (V)	Consigna de velocitat en V que retorna el programa fpga per comprovació
		Taco (V)	Tensió condicionada de la dinamo tacomètrica
		Taco (rpm)	Velocitat de la dinamo tacomètrica
		Brush (rpm)	Velocitat del brushless (per comprovar que la dinamo funciona bé)
		Hall la (V)	Tensió condicionada del transductor d'intensitat
		Hall la (A)	Intensitat del transuctor d'intensitat
		la (V)	Consigna d'intensitat (només funcional en llaç en cascada)
		dn (V)	Diferència en V entre consigna de velocitat i velocitat real

Taula 20. Variables programa regulació en cascada 2a part

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Double	Indicador	di (V)	Diferència en V entre consigna d'intensitat i intensitat real
Single	Control	Retard (ms)	Retard en ms entre el pas d'un pont de tiristors a un altre (40 ms com a mínim)
		Kp_n	Paràmetres del controlador de velocitat
		Ti_n	
		Td_n	
		Límit_la (V)	
		Kp_i	Paràmetres del controlador d'intensitat
		Ti_i	
		Td_i	
		Límit_angle (V)	
String	Indicador	String GraóT	String que indica el graó de parell aplicat quan es treballa en mode T(n)
		Unitats n	String que indica si la consigna de velocitat està expressada en rpm o en V
Tab	Control	Pestanyes	Tabs disponibles en el panell frontal (pestanyes "Control" i "Gràfics")
		Tabs llaços	Tabs disponibles en el llaç de control segons el Llaç escollit
File path	Control	Filename	Control per especificar el nom de l'arxiu de text a enregistrar i la direcció on es guardarà
Chart	Indicador	Gràfica	Representació temporal de les variables
Graph	Indicador	Gràfica Tfre-n	Representació XY del parell de fre respecte la velocitat de rotació
		4Q	Representació XY de l'evolució del punt de treball del motor en els 4Q

Taula 21. Variables programa regulació en cascada 3a part

## A.4 Programa FPGA de regulació en cascada

A continuació hi ha una figura que mostra l'estructura general d'aquest programa.

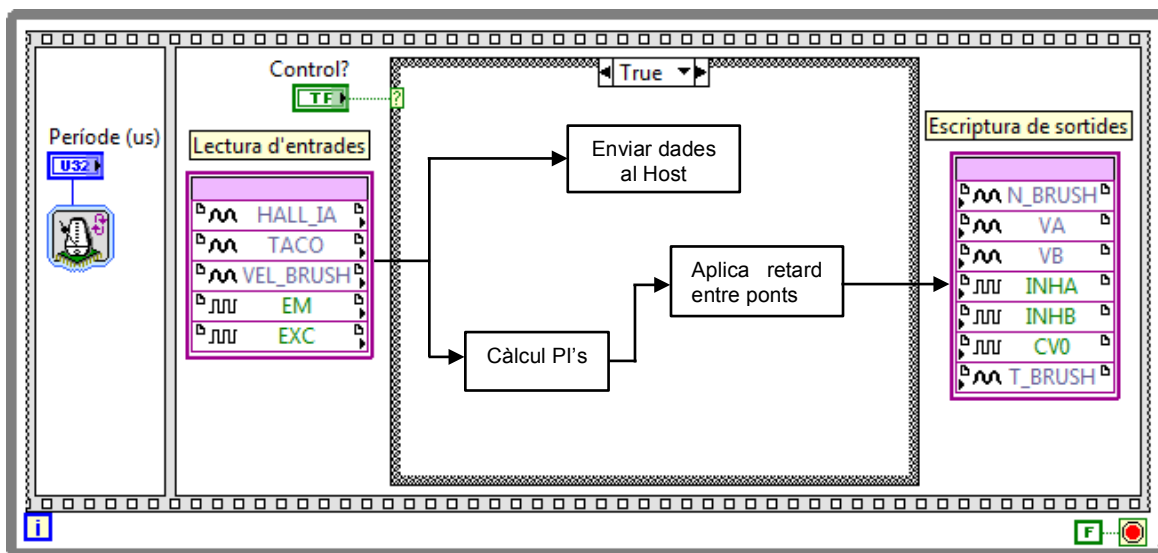


Figura 85. Codi LabVIEW programa FPGA

A la següent taula enumera totes les variables utilitzades en aquest programa.

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Booleà	Control	Control?	Interruptor que permet realitzar el control
		Reset PIDs	Polsador per resetejar els PID's del llaç
		Inh_B	Interruptor per inhibir el pont B manualment
	Indicador	Emergència	Indicador de l'estat del polsador d'emergència NC
		Excitació	Indicador de l'estat de l'excitació
		FIFO Timeout	Indicador de que la memòria FIFO ha quedat plena
		Pont A	Indicador de l'estat del pont A
		Pont B	Indicador de l'estat del pont B
Integer	Control	Llaç	Control desplegable per escollir el tipus de llaç
		Període (us)	Període de mostreig de l'FPGA

Taula 22. Variables programa FPGA 1a part

Tipus	C/I	Nom variable	Funció
Clúster	Control	PID_n	Clúster on es troben els paràmetres del controlador n (Kp, Ti, Td)
		PID_la	Clúster on es troben els paràmetres del controlador la (Kp, Ti, Td)
		Límit_angle (V)	Clúster amb els límits en V de l'angle de cebat
Single	Control	Límit_la (V)	Límits en V de la consigna d'intensitat
		Consigna n (V)	Consigna de velocitat en V
		Retard (cicles)	Retard en cicles de programa entre el pas d'un pont de tiristors a un altre
Fxp	Control	T_fre	Parell de fre del motor brushless

Taula 23. Variables programa FPGA 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 funcionament manual del motor brushless

La interfície del programa de funcionament manual del motor brushless és molt senzilla i intuïtiva. Es pot seleccionar entre "Fre" o "Motor" mitjançant el selector "Funcionament". Aquest selector habilitarà el control per regular el parell i deshabilitarà el de velocitat si s'escull el mode Fre o habilitarà el control per regular la velocitat i deshabilitarà el de fre si s'escull el mode Motor.

Per finalitzar l'execució del programa cal prémer en el pulsador "stop".

Aquest programa està pensat per ser executat durant la pràctica referent a la màquina brushless.

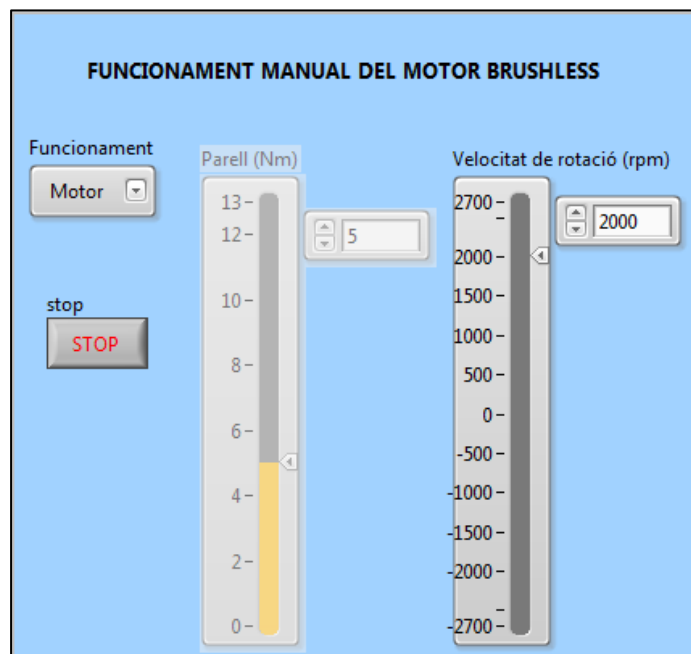


Figura 86. Panell frontal programa brushless manual

## B.2 Interfície de funcionament manual als quatre quadrants

La interfície d'usuari del programa que permet el control manual del conjunt màquina de corrent continu – màquina brushless incorpora tots els controls i indicadors necessaris per tal de que l'usuari pugui fer les proves pertinents i vegi els resultats obtinguts.

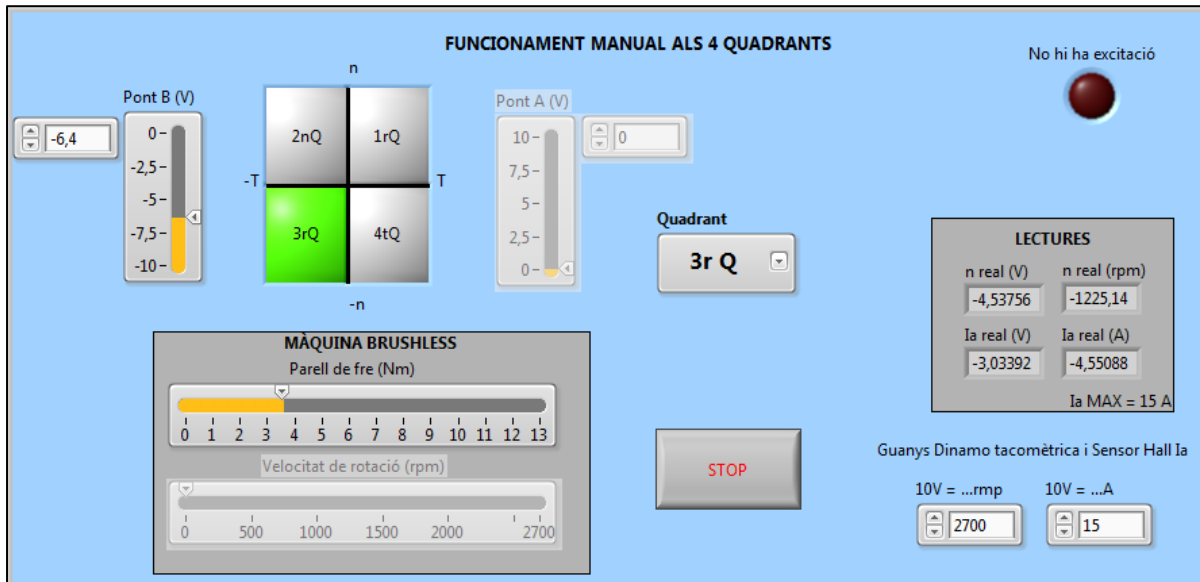


Figura 87. Panell frontal programa manual 4Q

Mitjançant un selector anomenat “Quadrant” l'usuari escull en quin dels quatre quadrants vol treballar. Llavors, s'activa el quadrant escollit en el gràfic n-T i s'habiliten els controls corresponents. En la figura es veu com s'ha escollit el tercer quadrant, per tant el control que permet alimentar el pont A quedarà inhabilitat i l'usuari tindrà només accés a alimentar el pont B. Pel que fa al motor brushless, en aquest exemple l'usuari podria regular el parell de fre del motor, mentre que el control de velocitat del motor brushless quedaria deshabilitat.

El programa incorpora una lectura de velocitat de rotació i intensitat d'induït. Aquestes lectures, es mostren en unitats de tensió de 0 a 10V un cop s'ha condicionat els senyals provinents tant de la dinamo tacomètrica com del transductor d'intensitat per efecte Hall. Per altra banda, també es mostren les lectures en unitats de revolucions per minut per la velocitat i d'Ampers per la intensitat. El programa permet variar els guanys de la dinamo tacomètrica i del transductor d'intensitat per tal d'ajustar-se als guanys que s'han definit en cada un dels sistemes de condicionament.

El programa disposa d'un indicador lluminós de “No hi ha excitació” que indica quan falta alimentar l'excitació i per tant el programa quedaria bloquejat a l'espera d'alimentar correctament l'excitació del motor.

Per finalitzar l'execució del programa cal prémer en el polsador “stop”.

### B.3 Interfície de regulació en cascada

El panell frontal d'aquesta interfície consta de diverses parts. En la part esquerra hi ha el control de la consigna de velocitat i el control del parell de fre. En cada cas es pot modificar la barra de control de forma manual i es poden generar graons i rampes.

En la part central hi ha dues pestanyes diferents, una que mostra el llaç de control que hi ha en funcionament en cada moment i l'altra que conté totes les representacions gràfiques del procés. A continuació hi ha una captura de pantalla del panell frontal amb la pestanya de control seleccionada.

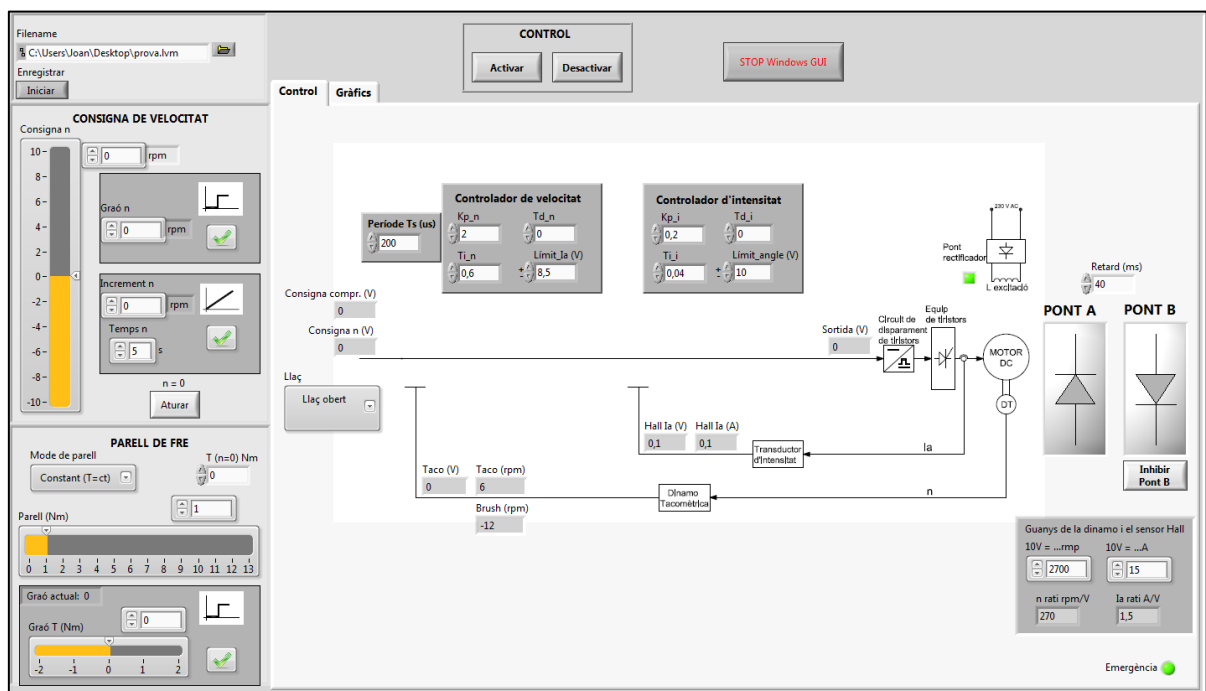


Figura 88. Panell frontal programa regulació en cascada



A continuació hi ha la pantalla corresponent a la pestanya de gràfics, on es mostra una evolució temporal de diverses variables del procés, una gràfica de la situació en els quatre quadrants i una altra gràfica del parell de fre en funció de la velocitat.

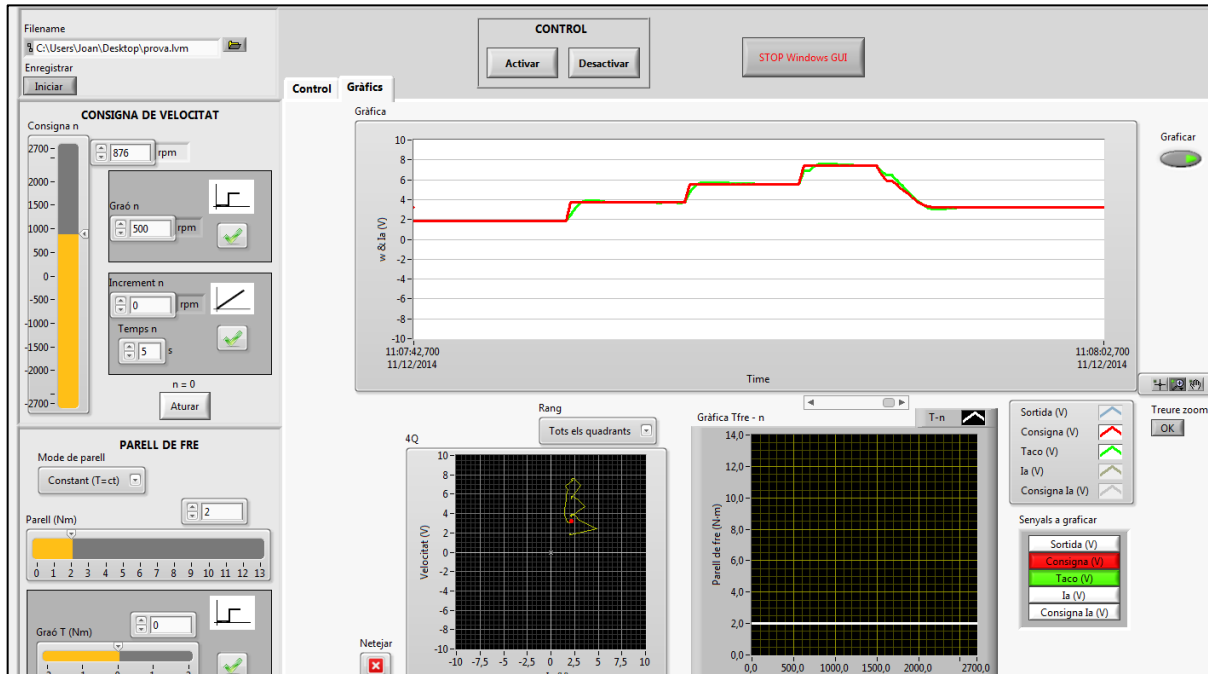


Figura 89. Panell frontal gràfics programa regulació en cascada

En la pestanya de gràfics l'usuari pot escollir quines senyals vol visualitzar en el gràfic temporal mitjançant els botons situats a la part inferior dreta de la pantalla. També pot fer zoom en el gràfic temporal i en qualsevol moment pot aturar-ne la seva representació mitjançant el botó de graficar a la part superior dreta.

Pel que fa a la visualització en els quatre quadrants, l'usuari pot netejar el gràfic prement el pulsador vermell de netejar i també pot fer zoom a cadascun dels quatre quadrants escollint en el menú desplegable el quadrant que vulgui veure. Per defecte hi ha la opció "Tots els quadrants".

En la part superior esquerra de la pantalla l'usuari pot prémer un botó d'iniciar enregistrament de dades i quan desitgi el pot tornar a prémer per finalitzar. El programa crearà un arxiu .txt a la direcció indicada en la barra de direccions (Filename) amb l'evolució temporal de les sis variables que es poden representar gràficament.

En la part superior del panell frontal hi ha els pulsadors de control del procés que es troben disponibles independentment de quina pestanya de visualització s'hagi escollit. Els pulsadors d'activar i desactivar serveixen per iniciar i finalitzar el control de velocitat que realitza el programa FPGA i el botó d'stop de la interfície gràfica (Stop Windows GUI) atura el programa LabVIEW i alhora atura el programa FPGA per deixar tot el sistema en una posició de repòs. A continuació hi ha una figura que mostra aquests pulsadors.

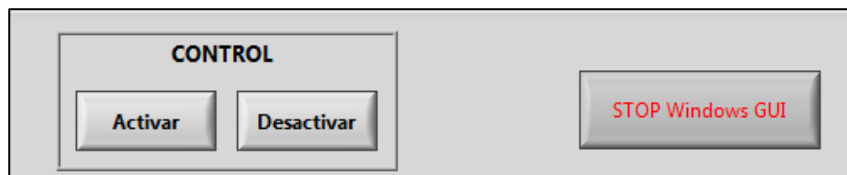


Figura 90. Pulsadors de control

En la pestanya de control, el llaç de velocitat varia segons el que hagi escollit l'usuari en el menú desplegable de llaç. En tots tres casos, en la part dreta hi ha dos indicadors lluminosos que indiquen quin dels dos ponts treballa en cada moment. També hi ha un control numèric per modificar el temps de retard entre ponts i un botó per inhibir el pont B.

A continuació hi ha una figura que mostra el llaç que apareix per pantalla quan s'escull llaç obert.

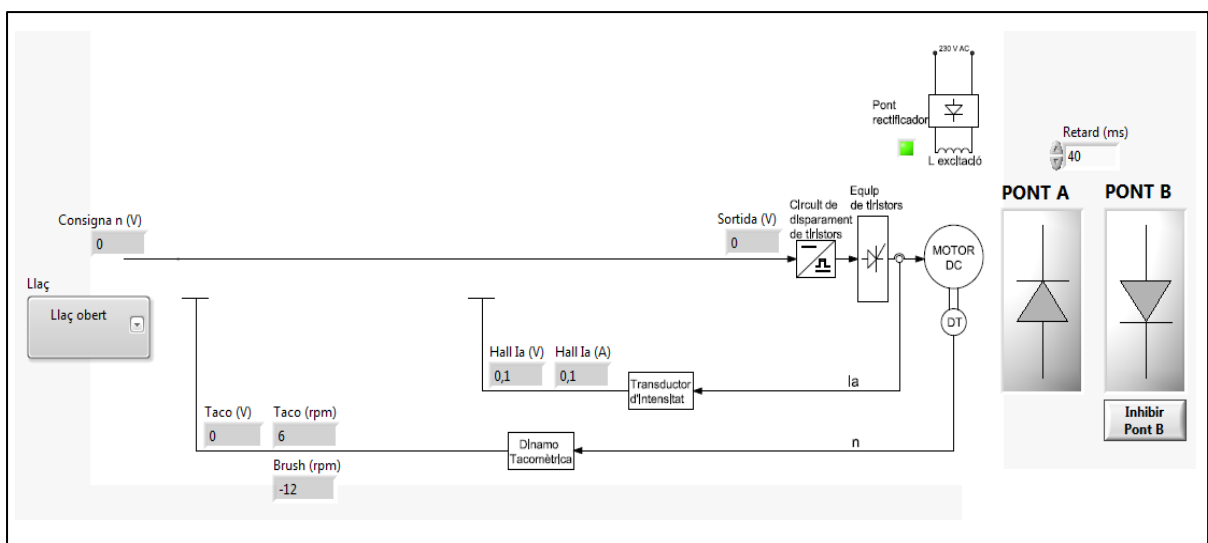


Figura 91. Panell frontal llaç obert

A continuació hi ha una figura que mostra el llaç que apareix per pantalla quan s'escull llaç d'intensitat.

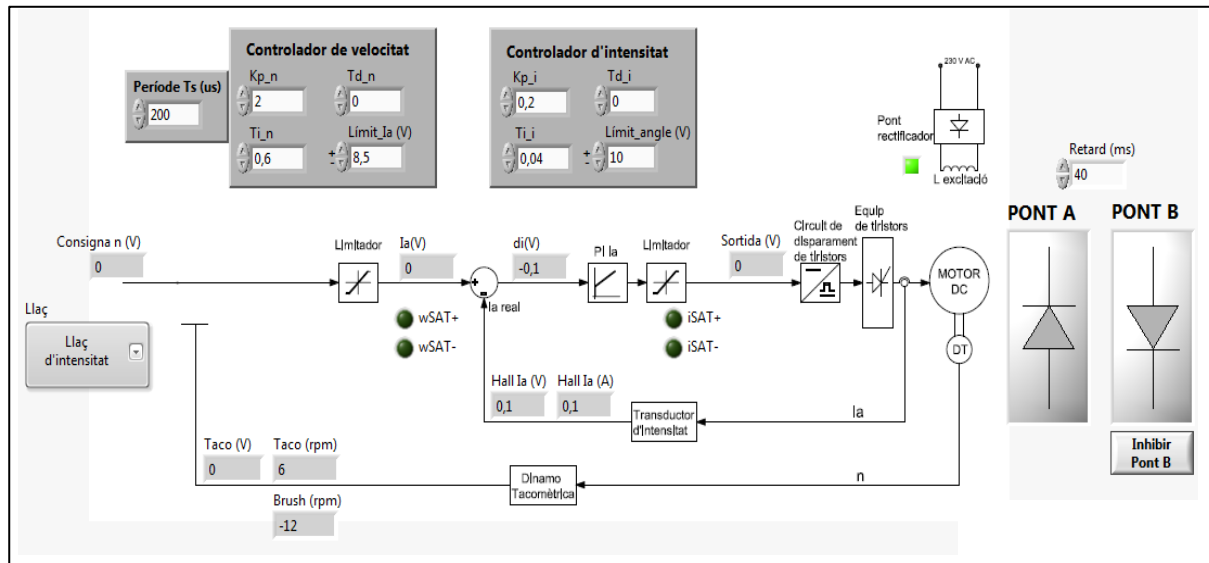


Figura 92. Panell frontal llaç d'intensitat

A continuació hi ha una figura que mostra el llaç que apareix per pantalla quan s'escull llaç en cascada.

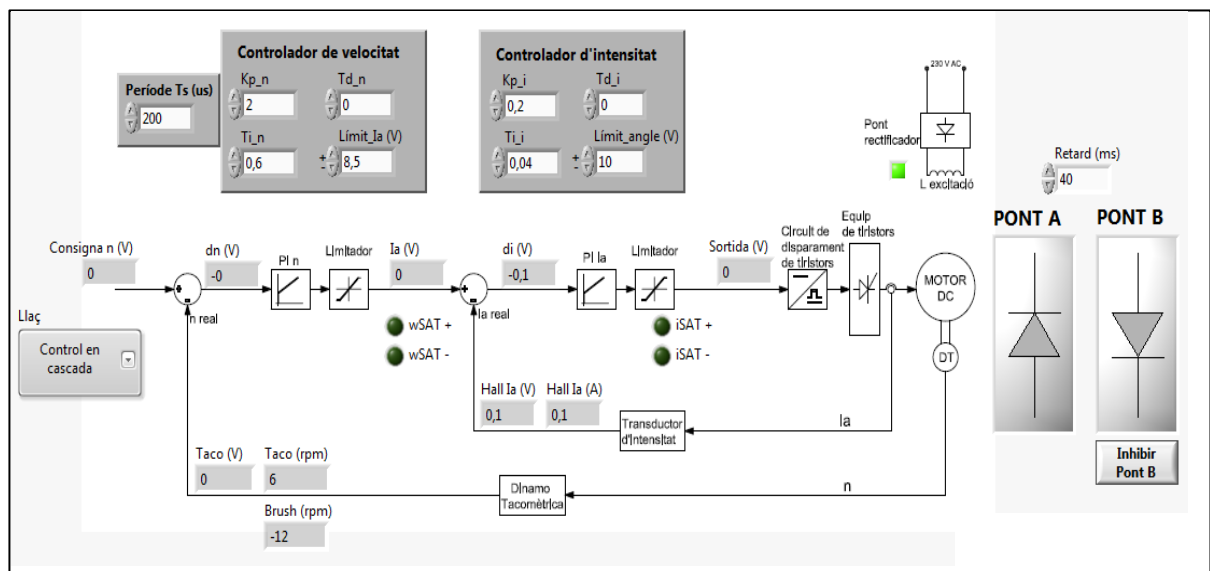


Figura 93. Panel frontal llaç en cascada

Pel que fa a les finestres emergents, en aquest programa poden aparèixer fins a tres finestres segons les condicions que es donin.

Si es prem el polsador d'emergència apareix la següent finestra emergent.

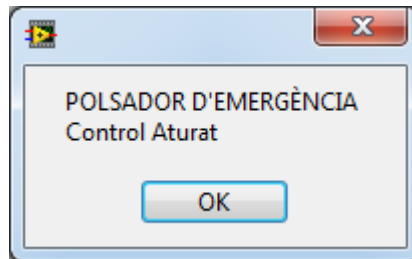


Figura 94. Finestra emergent polsador d'emergència

Si en algun moment es deixa d'alimentar l'excitació, apareix la següent finestra emergent.

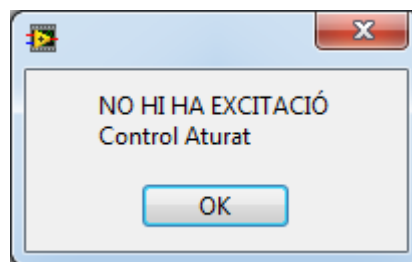


Figura 95. Finestra emergent detecció de l'excitació

Si es selecciona el llaç d'intensitat, apareix una finestra emergent avisant que la seguretat de la detecció d'excitació ja no es troba activa tal com es mostra en la següent figura.

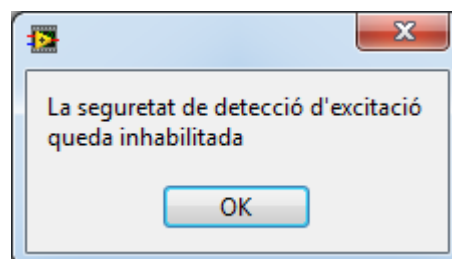


Figura 96. Finestra emergent llaç d'intensitat

## **C ENUNCIAT DE LA PRÀCTICA**

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 control de velocitat del motor de corrent continu de l'assignatura Control de Màquines Elèctriques.