

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA**

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

CONTROL DE VELOCITAT PEL MOTOR DE RELUCTÀNCIA LINEAL DEL TREN TELMAG

Memòria

**MARC PRATS RÀFALES
PONENT: SALVADOR ALEPUZ MENENDEZ**

PRIMAVERA 2015



**TecnoCampus
Mataró-Maresme**

Agraïments

En primer lloc, m'agradaria agrair al ponent d'aquest projecte, Salvador Alepuz Menendez, la seva total implicació en el projecte, la seva absoluta disponibilitat a donar un cop de mà sempre que ha sigut necessari i la seva capacitat didàctica i paciència per ajudar a l'alumne a entendre els conceptes més complicats i convertir-los en aliats pel desenvolupament del projecte.

En segon lloc, però no menys important, m'agradaria agrair a Ramon Serra i tot l'equip d'Innovem, per tot el material facilitat, els consells realitzats, l'ajuda desinteressada i els coneixements aportats per dur a bon port el projecte realitzat.

Resum

En aquest projecte es realitza la programació d'un llaç de control a les corrents de les bobines del motor de reluctància lineal del tren Telmag. Amb aquesta implementació es pretén millorar la velocitat de resposta i el comportament del motor de reluctància lineal quan el tren està en règim dinàmic.

Primer s'estudia tota l'electrònica implementada al tren, per després realitzar un mòdul de lectura de corrents i, finalment, un mòdul de control. Es validen els resultats amb instrumentació de laboratori, simulant escrupolosament les senyals provinents de l'electrònica del tren segons documentació tècnica facilitada.

Resumen

En este proyecto se realiza la programación de un lazo de control en las corrientes de las bobinas de un motor de reluctancia lineal del tren Telmag. Con esta implementación se pretende mejorar la velocidad de respuesta y el comportamiento del motor de reluctancia lineal cuando el tren está en régimen dinámico.

Primer se estudia toda la electrónica implementada en el tren, para después realizar un módulo de lectura de corrientes y finalmente un módulo de control. Se validan todos los resultados con instrumentación de laboratorio, simulando escrupulosamente las señales provenientes de la electrónica del tren según documentación técnica facilitada.

Abstract

This project consists in programming a close-loop control in Telmag lineal reluctance motor coil-currents. The main goal is to improve the response speed and behavior of the lineal reluctance motor in dynamic regime.

First of all, the electronic of the prototype is studied. Afterthis, capturing currents module and control module are programmed. Finally all results are tested with laboratory instrumentation, simulating all signals of the prototype using technical documentation.

Índex.

Índex de figures.....	III
Índex de taules.....	V
Glossari de termes.	VII
1. Objectius.....	1
1.1. Propòsit.	1
1.2. Finalitat.	1
1.3. Objecte.	1
1.4. Abast.	1
2. Introducció al projecte.....	3
3. Marc teòric.	7
3.1. El projecte Telmag i principi de funcionament.....	7
3.2. Explicació del Hardware.....	10
3.2.1. Sensors de posició.	11
3.2.2. Circuit de control.....	11
3.2.3. Circuit de mesura de corrents.....	13
3.2.4. Circuit de potència.	14
3.3. Aspectes tècnics a considerar.....	15
3.3.1. Freqüència de commutació dels IGBT.....	15
3.3.2. Processament senyals de lectura de corrent.....	15
3.3.3. Resposta de l'acció de control.....	16
3.3.4. Ús dels recursos hardware del microcontrolador.	17
3.4. Necessitats d'informació.....	17
4. Descripció de la solució.	19
4.1. Procés de programació de l'algorisme de control.....	19
4.2. Solució tècnica.	23
4.2.1. Seqüència principal del mòdul de lectura i control de corrents.....	23
4.2.2. Gestió de les interrupcions.	30
4.2.3. Subrutina de generació de consigna.	36
4.3. Desviacions.....	36
5. Resultats.	41

6. Planificació.....	43
7. Impacte Mediambiental.....	47
8. Conclusions.....	49
9. Referències.....	51

Índex de figures.

Fig 1.1. Representació evolució corrent sense sistema de control.....	3
Fig 3.1. Exemple màquina reluctància variable 4/2.....	9
Fig 3.2. Sensors inductius i via amb pols ferromagnètics (cortesia d'Innovem S.L.).....	9
Fig. 3.3. Resposta característica del sensor inductiu 3RG4022.....	11
Fig. 3.4. Targeta de control (cortesia d'Innovem S.L.).....	12
Fig. 3.5. Targeta de mesura de corrents (cortesia d'Innovem S.L.).....	13
Fig. 3.6. Sortida de mesura de corrents del IR2175.....	13
Fig 3.7. Esquema intern equivalent FCAS5SN60.....	14
Fig 4.1. Programació amb MPLAB X IDE.....	20
Fig 4.2. Stimulus de MPLAB X IDE.....	20
Fig 4.3. Visualitzador de variables de MPLAB X IDE.....	21
Fig.4.4. Diagrama de flux del procés de programació.....	22
Fig. 4.5. Seqüència principal del programa.....	24
Fig. 4.6. Multiplexió senyals corrents.....	25
Fig.4.7. Seqüència subrutina f_control.....	28
Fig.4.8. Exemple generació acció de control.....	29
Fig. 4.9. Alternança registres ICI i ICM dels mòduls IC a les interrupcions.....	31
Fig. 4.10. Captura dels flancs de lectura de corrents.....	33
Fig. 4.11. Interrupcions en la captura de flancs de corrent.....	34

Fig.4.12. Diagrama de flux de les interrupcions.....	35
Fig 4.13. Muntatge circuit lectura de corrents a protoboard i lectura senyal IR2175.....	38
Fig. 5.1. Ocupació de memòria del microcontrolador.....	41
Fig. 6.1. Llistat de tasques i data de termini. Diagrama de Gantt.....	46
Fig. 6.2. Taula de costos.....	46

Índex de taules.

Taula 4.1. Equivalència variable Out amb fases actives.....	25
Taula 4.2. Variable Byte_ICS.....	25
Taula 4.3. Variable control_alt.....	27
Taula 4.4. Registres de control del mòdul IC2.....	30
Taula 6.1. Taula d'activitats.....	45

Glossari de termes.

IGBT	Transistor bipolar de porta aïllada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
T	Parell
L	Inductància
PWM	Modulació de l'ample de pols (<i>Pulse Width Modulation</i>)
RAM	Memòria d'accés aleatori (<i>Random Acces Memory</i>)
EEPROM	ROM Programable i esborrable elèctricament (<i>Electrically Eresable Programmable Read-Only Memory</i>)
ADC	Convertidor analògic-digital (<i>Analog Digital Converter</i>)
MIPS	Milions d'instruccions per segon.
CPU	Unitat central de processament (<i>Central Processing Unit</i>)
θ	Desplaçament angular
CAN	Xarxa d'àrea de controladors (<i>Controller Area Network</i>)
DSP	Processament digital de senyals (<i>Digital Signal Processing</i>)
LED	Diode emissor de llum (<i>Light-Emitting Diode</i>)
d	cicle de treball (d uty – cycle)
FIFO	Primer en entrar, primer en sortir (F irst I n F irst O ut)

1. Objectius.

1.1. Propòsit.

Establir un llaç de control de la intensitat de les bobines d'un prototip de tren Telmag, realitzant la programació de l'algorisme de control.

1.2. Finalitat.

Controlar la velocitat d'un prototip del tren Telmag, millorar la velocitat de resposta i el comportament del motor de reluctància lineal del tren en règim dinàmic.

1.3. Objecte.

Programa d'un mòdul de lectura de corrents de les bobines del motor de reluctància lineal. Subprograma o mòdul de control capaç de modificar el comportament de l'electrònica de potència del tren davant un canvi de consigna. Memòria descriptiva del sistema i dels programes desenvolupats.

1.4. Abast.

S'estudia tota l'electrònica relacionada amb la lectura de corrents de les bobines que incorpora el tren Telmag. Seguidament s'analitza i s'estudia l'electrònica de potència encarregada d'activar les fases del motor de reluctància lineal incorporat al prototip. Es realitza la programació del mòdul de lectura de corrents i del mòdul de control. Finalment es validen els resultats amb instrumentació de laboratori. No forma part de l'abast el disseny del hardware del sistema.

2. Introducció al projecte.

El Telmag és un prototip de tren que té la singularitat d'utilitzar un motor de reluctància lineal com a mètode de propulsió.

Després de múltiples prototips està en una fase en la que, a nivell electrònic, té tot el hardware necessari per implementar-hi un sistema de control de velocitat del tren, però no ha estat implementat encara. Actualment, per fer demostracions del tren en moviment i per protegir els drivers, l'única entrada de consigna que té el sistema de control és el cicle de treball de commutació dels drivers. Així doncs, el que es fa és limitar el cicle de treball dels drivers a consignes baixes constants per imposar-hi una freqüència mínima de commutació, obligant-los a commutar per no fer-los malbé, i garantir intensitats baixes de funcionament. És a dir, en el sistema actual no hi ha implementat un sistema de control en llaç tancat, si no que se l'imposa una freqüència de commutació constant als drivers de potència, però aquest no canvien el comportament davant cap pertorbació.

Les bobines del tren es magnetitzen quan el sensor de posició de tren respecte la via ho indica (hi ha un sensor per cada bobina) i deixen de fer-ho quan el sensor de posició deixa de detectar.

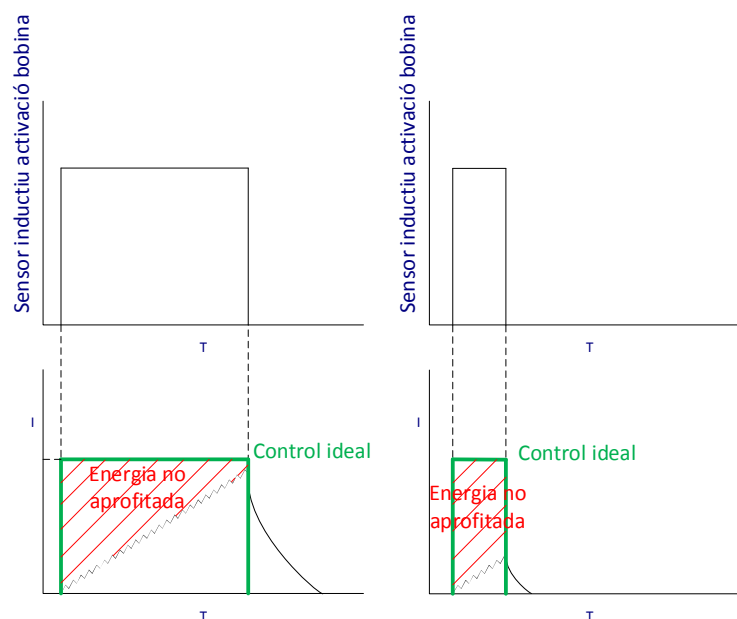


Fig 1.1. Representació evolució corrent sense sistema de control.

Com es pot veure a la Fig 1.1, no s'aprofita la potencial energia de les bateries del tren, sobretot quan aquest circula a alta velocitat (temps d'activació dels sensors inductius inferior, cas dret).

En el present projecte es pretén realitzar la programació d'un mòdul de sistema de control de velocitat del motor de reluctància lineal del tren Telmag, aprofitant al màxim els recursos hardware ja instal·lats al prototip per commutar els IGBT del circuit de potència.

Per realitzar-ho s'estudia primer el funcionament dels motors de reluctància variable. Un cop assimilats els conceptes d'aquest tipus de motor s'estudia el motor de reluctància lineal, en concret l'instal·lat al prototip del Telmag.

Un cop realitzat aquest punt, s'analitza el circuit de potència que integra el tren, format per drivers IGBT que permeten la commutació de corrent i, per tant, el control de velocitat del tren.

Posteriorment, s'analitza el circuit de control i el de lectura de corrents per poder realitzar la programació d'un mòdul que mesuri les corrents de les bobines del tren. Es realitzen tests amb instrumentació de laboratori per comparar les mesures realitzades pel microcontrolador amb les mesurades de la pròpia instrumentació. Es realitza finalment un calibratge per software, és a dir, ajustos en el codi del mòdul de lectura de corrents, per assegurar la correcta programació del mòdul de control.

Seguidament es dissenya el mòdul de control, que ha de reaccionar amb una resposta de control a una consigna d'intensitat desitjada. El mòdul de control ha de crear una resposta de control que tingui una freqüència òptima pel treball dels drivers, garantint la resposta desitjada i vida útil d'aquests.

Els objectius a assolir en aquest projecte són els descrits a continuació.

- En primer lloc, es dissenyarà un mòdul de programació utilitzant el software MPLAB X IDE al microcontrolador que garanteixi la possibilitat de mesurar les corrents dels debanats de les bobines, mitjançant com a instrumentació els propi circuit de lectura de corrents que incorpora el prototip del tren. Les proves d'aquest mòdul es realitzaran en estàtic amb la targeta aïllada del tren i comparant les mesures realitzades pel microcontrolador amb les que en entreguen els aparells

d'instrumentació de laboratori, com un oscil·loscopi o amperímetre. És imprescindible validar el correcte funcionament d'aquest mòdul de programació i de l'electrònica del prototip abans de realitzar la programació del mòdul de control.

- Tot seguit es realitzarà la programació del mòdul de control de velocitat del tren. Aquest mòdul de control haurà de respondre a una consigna d'intensitat desitjada, fent actuar els drivers IGBT del tren per crear un sistema de llaç tancat, que aplicant la retroalimentació amb la pròpia mesura constant de la corrent de la bobina, sigui capaç d'optimitzar el temps de pujada de la corrent fins arribar a la consigna desitjada. Això es durà a terme mantenint sempre un comportament estable i treballant en freqüències de commutació acceptables pels drivers IGBT que incorpora el tren
- Finalment s'integrarà el mòdul de control de velocitat programat al programa que incorpora actualment el prototip.

S'ha definit l'abast del projecte de la següent manera:

- Primer, es realitzarà la programació d'un mòdul al DSPIC30F4011 de lectura de corrents dels debanats de les bobines, que utilitzi com a entrada les senyals de l'electrònica provinent de la targeta de lectura de corrents ja instal·lada al prototip.
- Seguidament, es realitzarà un test al laboratori en buit, és a dir amb la targeta aïllada del tren, del mòdul de lectura de corrents dissenyat anteriorment per validar tant la programació del mòdul com l'electrònica de l'equip. Si és necessari es realitzarà un calibratge per software per assegurar la correcta lectura de corrents dels debanats de les bobines.
- Després es realitzarà la programació d'un mòdul de control per a una sola bobina, que utilitzi com a consigna una corrent desitjada i que apliqui una retroalimentació d'aquesta al llaç de control.
- Es realitzaran tests al laboratori en buit, és a dir amb la targeta aïllada del tren, per ajustar la programació del mòdul programat al punt anterior fins obtenir una resposta satisfactòria a les 5 bobines que disposa el tren.
- Un cop realitzat això es realitzarà l'adaptació del mòdul de control perquè treballi amb totes les bobines alhora.

- Si les tasques prèvies del projecte es desenvolupen amb èxit, finalment caldrà integrar el mòdul de control dissenyat amb la resta de rutina de programa del microcontrolador i realitzar una prova dinàmica amb el tren en funcionament, si fos possible.

En el projecte no es realitzaran determinades accions, que són les següents:

- No es realitzaran modificacions en el hardware del prototip.
- No es realitzarà el codi d'inicialització i configuració del microcontrolador. Aquest serà entregat per Innovem per assegurar que s'utilitzen les mateixes configuracions de cara a una possible futura integració del codi realitzat.
- No es programaran altres blocs de programa, com per exemple els de comunicacions amb perifèrics o els essencials pel funcionament general del microcontrolador.
- No es realitzarà un test del mòdul de control 'en línia', és a dir llegint les corrents de les bobines amb el tren en funcionament, perquè donada l'arquitectura del motor de reluctància lineal, actualment, no es poden mesurar aquestes corrents quan el tren està en marxa.

3. Marc teòric.

A continuació es presenta el conjunt d'informació que conforma el marc teòric del projecte. Es pretén inicialment fer una breu explicació de la història i antecedents del projecte Telmag i del principi de funcionament del seu motor de reluctància. Posteriorment es farà una descripció del Hardware que s'utilitza pel projecte i finalment algunes consideracions tècniques que s'han de contemplar al realitzar la solució tècnica.

3.1. El projecte Telmag i principi de funcionament.

El projecte Telmag de l'empresa Innovem S.L. està ara mateix immers en un procés de patent, per tant l'empresa es reserva el dret a no publicar informació reservada.

El projecte no és quelcom nou, ja que el seu desenvolupament comença a inicis de la dècada dels setanta del segle passat. Com a breu resum i a nivell informatiu, es pot comentar que el projecte consta de vuit prototips:

El primer prototip es va dissenyar l'any 1971 i consta d'un motor de reluctància rotatiu que interacciona amb una banda ferromagnètica.

Nou anys més tard, al 1980, la Universitat de los Andes dissenya el primer prototip amb motor de reluctància lineal, precursor del model actual.

El 1984, es desenvolupa un tercer prototip que incorpora importants millores en el sistema de control.

El prototip número quatre, dissenyat a l'any 1987, va ser presentat internacionalment a diverses exposicions. Incorpora un disseny de xassís més rígid i lleuger i un controlador electrònic més sofisticat.

A l'any 1991, es presenta el cinquè prototip, dotat per primer cop d'un sistema de control per microprocessador i d'un disseny del xassís i dels rails completament redissenyat.

A l'any 2005 es construeix una pista circular de 86 metres de longitud que permet millorar el sistema de control del motor de reluctància lineal, gràcies a que es poden dur a terme proves a més velocitat.

Dos anys mes tard, al 2007, es realitza el setè prototip. En aquest prototip es redissenya completament el sistema de control i es realitzen millores a les vies i al disseny dels vehicles.

Actualment l'empresa, amb la col·laboració de l'Escola Universitària Politècnica de Mataró, esta en fase de desenvolupament del vuitè prototip.

El tren Telmag té la singularitat d'utilitzar un motor de reluctància variable lineal, el que el permet tenir certes avantatges respecte un tren convencional:

- Pot afrontar gradients gairebé verticals, el que el fa molt recomanable per aplicacions amb forta pendent.
- És un tren que per la constitució del seu xassís el fa pràcticament impossible de descarrilar.

Per entendre el motor de reluctància lineal emprat al projecte Telmag (que és part de la informació reservada de l'empresa Innovem), és necessari abans estudiar el seu precursor, és a dir el motor de reluctància variable rotatiu.

Els motors de reluctància variable o reluctància commutada rotatius són una de les màquines elèctriques més senzilles de construir. Consten d'un estator amb debanats d'excitació i un rotor magnètic sortint. No es necessiten conductors al rotor perquè el parell es produeix per la tendència del rotor a alinear-se amb les ones de flux produïdes a l'estator, que intenten maximitzar els encadenaments de flux del propi estator produïts per la corrent aplicada sobre aquest.

El parell generat per una màquina de reluctància variable 4/2 ideal ve descrit per l'expressió (2.1):

$$T = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2(\theta)}{d\theta} \quad (2.1)$$

És a dir, es té una expressió en la que el parell és funció de les derivades de la inductància de fase respecte la posició angular del rotor, cadascuna multiplicades pel quadrat de la corrent de fase corresponent [1].

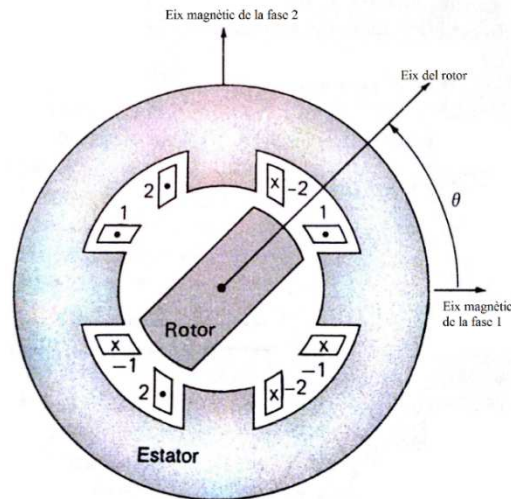


Fig 3.1. Exemple màquina reluctància variable 4/2.

Si s'entén θ com l'angle entre l'eix del rotor i l'eix magnètic de la fase 1, es pot observar que per generar un parell, les corrents de fase s'han d'aplicar en funció de la posició del rotor. Per tant, en el funcionament de les màquines de reluctància variable és necessari algun tipus de control que determini tant la seqüència com la forma d'ona desitjada de les corrents de fase per aconseguir l'operació desitjada. Així doncs, el control d'aquest tipus de màquines elèctriques s'implementa normalment amb dispositius electrònics de commutació amb la supervisió d'un element controlador (base microprocessador) [2].

Un altre singularitat de les màquines de reluctància variable rotatives és la necessitat d'incorporar un sensor de posició del rotor, ja que és necessari conèixer la posició del rotor per controlar la sincronització i forma d'ona de l'excitació de fase.

En el cas del Telmag, l'element controlador és un microcontrolador DSPIC30f4011 que s'alimenta essencialment de l'informació que rep de l'electrònica encarregada de lectura de corrents dels debanats de les bobines de l'estator i els sensors inductius de posició dels pols ferromagnètics de la via.



Fig 3.2. Sensors inductius i via amb pols ferromagnètics (cortesia d'Innovem S.L.)

El motor del Telmag, per tant, no té un rotor a l'ús, ja que estem parlant d'un motor lineal i no pas rotatiu; si no que l'equivalent del rotor del motor rotatiu "es desplega" en finits pols ferromagnètics que estan situats equidistants a la via del tren; i mitjançant cinc sensors inductius s'indica en tot moment la posició relativa de cada fase del estator (cinc bobines situades al xassís del tren), respecte la via.

En definitiva, en el present projecte es pretén establir una estratègia de regulació i control que sigui capaç de monitoritzar i actuar sobre la intensitat que passa per cada una de les fases del tren. L'objectiu de qualsevol estratègia de control és la de mantenir una variable que anomenem controlada, pròxima a un valor desitjat i conegut, anomenat consigna o "set-point". Per tant, el terme regulació s'utilitza per descriure l'acció de control d'agents de pertorbació de l'estat d'equilibri d'una variable controlada. Un sistema de control només pot arribar a la regulació aplicant, en oposició a les forces pertorbadores (o càrregues), correccions equivalents en una o més variables, anomenades manipulades. La variable controlada romandrà estable en el procés quan estigui en estat estacionari [3].

En definitiva, malgrat la simplicitat constructiva dels motors de reluctància variable, la seva complexitat en el control fa necessari la implementació d'un sistema de control en llaç tancat, és a dir, un sistema capaç d'anar reduint la diferència entre la sortida del sistema i el valor desitjat de consigna, realitzant el control automàticament utilitzant realimentació [4].

3.2. Explicació del Hardware.

Les especificacions tècniques d'aquest projecte van lligades al hardware facilitat per l'empresa Innovem, atès que per efectuar la programació del mòdul de control serà necessari conèixer les eines de les quals es disposa i les limitacions dels components. A continuació es presenta de manera resumida una descripció de l'electrònica que està relacionada amb el projecte. La documentació tècnica de cada integrat o component s'adjunta als annexos del treball. El Hardware del que es disposa per a la realització del projecte és pot resumir, a grans trets, en:

- Sensors de posició.
- Circuit de control.
- Circuit de mesura de corrent.
- Circuit de potència.

3.2.1. Sensors de posició.

Per mesurar la posició del vehicle respecte la via s'utilitzen cinc sensors inductius de l'empresa Siemens, model 3RG4022.

El sensor està dimensionat per detectar metalls a una distància no superior a 4 mm. En l'instant en que el sensor es situa sobre un pol ferromagnètic de la via, la seva sortida puja a nivell alt (+15 V) i deixa d'estar-ho (0 V) quan el sensor deixa de detectar el pol ferromagnètic [6].

Per la disposició física dels sensors, sempre hi ha un dels cinc que està detectant la presència d'un pol ferromagnètic de la via. De fet, en moments de transició es produeix solapament durant aproximadament un 20% del cicle de detecció, en la qual es detecten dos sensors alhora.

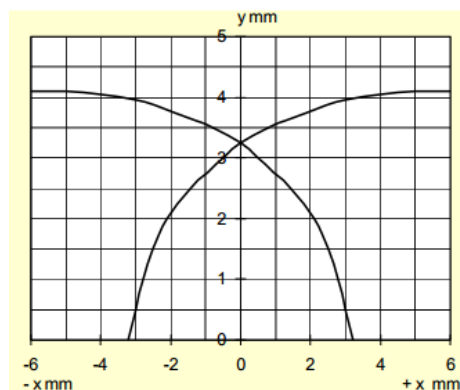


Fig. 3.3. Resposta característica del sensor inductiu 3RG4022.

3.2.2. Circuit de control.

El cervell del circuit de control és un microcontrolador de l'empresa Microchip model dsPIC30F4011, que està configurat amb la configuració bàsica, només treballant amb la memòria interna del dispositiu i un cristall de quars de 6 MHz.

Les característiques principals d'aquest microcontrolador relacionades directe o indirectament amb el projecte a realitzar són [7]:

- 48 Kbytes de memòria de programa Flash
- Memòria RAM de 2048 Bytes
- Memòria EEPROM de dades de 1024 Bytes.
- Velocitat de CPU de fins a 30 MIPS

- 30 fonts d'interrupció, de les quals 3 externes. Fins 8 nivells de selecció de prioritat per cada font d'interrupció.
- Multiplicador de nombres sencers i fraccionaris per hardware de 17 bits x 17 bits en un sol cicle d'instruccions.
- 6 canals PWM.
- 5 temporitzadors de 16 bits (configurables fins a 32 bits).
- ADC de 10 bits amb 9 canals d'entrada.
- Desplaçament de 16 bits en un sol cicle de scan.
- Flexible Watchdog Timer (WDT).
- Possibilitat de programació mitjançant tecnologia ICSP (In-circuit serial programming) mitjançant port RJ11.
- Voltatge d'operació de +2,5 V a 5,5V.

A part de l'esmentat microcontrolador, el circuit de la targeta de control incorpora dos integrats més, un MCP2551 i un 74HC58; el primer és un transductor per la capa física de la xarxa CAN, que en principi no s'utilitzarà en aquest projecte, i el segon és un integrat de comporta AND-OR dual, que s'utilitza per multiplexar 4 de les 5 senyals de les mesures de corrents, ja que el microcontrolador només disposa de tres entrades de polsos. A nivell de entrades i sortides, la targeta de control disposa del següent:

- Polsador de reset.
- 5 leds de color verd per definir l'estat de les sortides.
- 1 led de color vermell per indicar un error o advertència.
- Connector ICSP (RJ11) per programació del microcontrolador des de l'ordinador.
- 11 Test Points, per monitoritzar senyals de control dels drivers de potència.
- Interruptor d'ús general configurable per software.
- 2 connectors RJ45 per xarxa CAN.
- 1 Connector d'alimentació a +5V, per alimentar la targeta durant les proves.

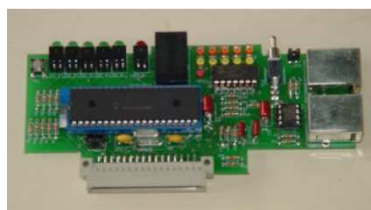


Fig. 3.4. Targeta de control (cortesia d'Innovem S.L.)

3.2.3. Circuit de mesura de corrents.

El circuit de mesura de corrents s'utilitza per mesurar les corrents en els debanats de les cinc fases (bobines) del motor de reluctància lineal. Aquest circuit és indispensable per poder controlar la potència i forma d'ona quan es realitzi l'estratègia de control.



Fig. 3.5. Targeta de mesura de corrents (cortesia d'Innovem S.L.)

El circuit està format per cinc integrats de International Rectifier IR2175, que permeten mesurar corrents a las fases, garantint també l'aïllament de la potència amb el circuit de control. La sortida d'aquest integrat és un tren de polsos d'aproximadament 130 kHz, en el qual el cicle de servei és funció de la corrent mesurada [8].

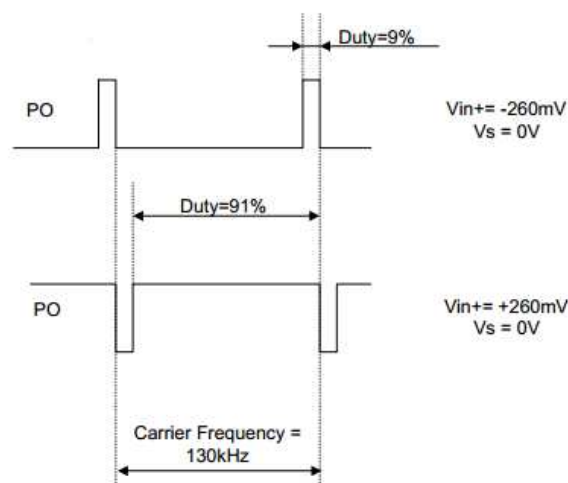


Fig. 3.6. Sortida de mesura de corrents del IR2175.

Aquests cinc trens de polsos que contenen la informació de la intensitat mesurada es connecten (després de ser multiplexats en el circuit de control) a tres entrades del microcontrolador, més concretament la IC2, IC7 i IC8.

El circuit també incorpora una resistència Shunt de $0,01 \Omega$ i 3 W connectada en sèrie amb els connectors de les bobines. Quan el circuit detecta que sobre la resistència Shunt hi cau

3.3. Aspectes tècnics a considerar.

Després d'analitzar el hardware del projecte i de realitzar algunes reunions amb Innovem sorgeixen certs aspectes tècnics a considerar durant l'elaboració del projecte. Aquestes consideracions que s'indiquen a continuació garanteixen tan el bon funcionament de l'electrònica del prototip com els requeriments buscats per l'empresa Innovem en el present projecte.

3.3.1. Freqüència de commutació dels IGBT.

Per assegurar el correcte funcionament del prototip, és necessari que treballi en unes condicions en les quals els seus integrats, components passius i en general tota l'electrònica, pugui suportar.

En el cas dels drivers de potència (IGBT) del prototip, existeixen per data-sheet unes limitacions que s'han de respectar. A nivell de freqüència òptima de treball s'estableix un rang d'operació de 2,2~8,5 kHz.

Per tant, en la realització de l'algorisme de control es realitzen proves funcionals amb simulador per controlar quina és la freqüència d'actualització de les sortides del microcontrolador que alimenten els drivers de potència i assegurar que aquesta estigui dins del rang operatiu marcat pel data-sheet.

3.3.2. Processament senyals de lectura de corrent.

El punt més crític per l'elaboració de l'algorisme de control és el de la gestió i el processament de les senyals provinents de la targeta de lectura de corrents. Com es pot veure a l'apartat 3.2.3. aquesta targeta està formada per cinc integrats IR2175 que donen de senyal de sortida un tren de polsos d'aproximadament 130 kHz, el qual el seu cicle de servei és funció de la tensió mesurada en una resistència shunt.

A més, aquestes senyals estan multiplexades per un altre integrat 74HC58, degut a que el microcontrolador només té tres entrades per a lectura de senyals d'alta velocitat habilitades; i durant aproximadament un 20% de la fase de detecció dels sensors inductius es genera solapament entre dues senyals alhora.

En definitiva, durant el disseny i l'elaboració de la solució tècnica es té en consideració els següents factors:

- L'algorisme de lectura de corrents ha de poder llegir dues senyals d'entrada de les tres que existeixen (IC2, IC7 i IC8) alhora, sense afectar a l'operativa ni modificar en excés el temps de cicle de la rutina del programa. Per realitzar això s'utilitzaran els recursos hardware del microcontrolador perquè l'execució de la rutina sigui transparent, i es puguin realitzar captures de flancs del tren de polsos simultanis entre dues senyals.
- L'algorisme de lectura de corrents funcionarà amb interrupcions, i aquestes no poden ser en cap cas més llargues a la freqüència del tren de polsos provinents dels IR2175.
- L'algorisme de lectura de corrents serà capaç de capturar múltiples flancs del tren de polsos en una mateixa execució per reduir o minimitzar possibles lectures errònies per soroll.

3.3.3. Resposta de l'acció de control.

Després d'analitzar les necessitats i requeriments de l'empresa Innovem, es decideix prioritzar la velocitat de resposta del sistema davant la utilització de senyals moduladores PWM del microcontrolador.

Així que, encara que el microcontrolador està dotat de tot un hardware capaç d'efectuar senyals moduladores mitjançant tecnologia PWM, es decideix utilitzar una simple lògica binària tot-o-res per reduir així el temps de pujada de la intensitat fins a arribar a la consigna desitjada.

Per tant, el control donarà un "1" lògic de sortida (activació del IGBT) fins que la lectura mesurada sigui igual a la consigna programada. En aquest moment la sortida es transformarà en "0" fins que la lectura quedi per sota de la consigna. Aquest procés es repetirà constantment fins que hi hagi un canvi de consigna o la fase passi a estar inactiva.

En definitiva, es busca un comportament modular quan la senyal mesurada sigui pròxima a la consigna, ja que el controlador activarà i desactivarà els drivers a una freqüència de

treball acceptable pels IGBT's; i un control tot-o-res durant la rampa de pujada, ja que els drivers romandran activats fins a superar la consigna programada.

3.3.4. Ús dels recursos hardware del microcontrolador.

Atès que el present projecte s'engloba dins d'un objectiu més gran, que és el de la programació del prototip Telmag, s'han de respectar certs aspectes referents a l'ús dels recursos hardware del microcontrolador:

- S'utilitzaran el mínim de temporitzadors possibles per l'execució del mòdul de control de velocitat, ja que el microcontrolador DSPIC30f4011 només en disposa de cinc.
- No es canviaran paràmetres de configuració del microcontrolador com per exemple la freqüència d'oscil·lació de cristall de quars o la base de commutació interna del rellotge.
- El codi realitzat ha de ser òptim respecte a l'espai de dades i de memòria ocupat, ja que l'espai disponible al microcontrolador és limitat, atès que és compartit amb la resta del codi ja realitzat per Innovem i que realitza altres funcions.

3.4. Necessitats d'informació.

Per realitzar aquest projecte s'utilitzen les següents fonts d'informació:

- Documentació interna projecte Telmag de l'empresa Innovem (plànols, esquemes, codi programa, documents explicatius interns).
- Datasheets dels components que conformen el hardware del prototip (sensors inductius Siemens 3RG4022 [6], Microchip dsPIC 30F4011 [7], integrats IR2175 [8], FCAS50SN60 [9])
- Guia d'usuari v.2.25 de l'entorn de desenvolupament MPLAB X IDE [10], Guia d'usuari MPASM, MPLINK i MPLIB [11] i Guia d'usuari MPLAB ICD3 [12].
- Bibliografia [1], [2] sobre la teoria de control de màquines de reluctància variable.
- Bibliografia [3], [4] sobre sistemes de control i automatització.
- Bibliografia [5] o webs especialitzades en aplicacions dsPIC.

4. Descripció de la solució.

4.1. Procés de programació de l'algorisme de control.

El procés de programació del codi del projecte es realitza de manera modular, afegint diferents subrutines que realitzen tasques molt específiques al codi vertebrador del programa, és a dir la rutina principal “main”.

Durant el procés d'elaboració de totes les subrutines del projecte s'utilitza la mateixa metodologia, descrita a continuació:

1. Estudi de recursos hardware del microcontrolador:

Per realitzar un projecte de programació que optimitzi els recursos software, és a dir, fer un codi curt, ràpid i eficient, és necessari conèixer en profunditat les eines de les quals disposa el propi microcontrolador (els recursos hardware) com poden ser: mòduls de captura ràpida i comptatge de senyals, temporitzadors, ports d'entrades i sortides, motor DSP, etc.

Per assimilar aquests conceptes s'utilitzen data-sheets i manuals de referència del propi fabricant (Microchip); llibres especialitzats en la família DSPIC30f i finalment, planes webs i fòrums especialitzats.

2. Disseny diagrama flux de l'algorisme i definició de variables:

En aquesta fase es dissenyen els diagrames de flux i es comencen a definir les variables que s'utilitzen en el codi. Tot i així, els diagrames de flux definitius poden patir moltes modificacions respecte els dissenyats en aquesta fase, ja que és possible que durant la programació apareguin factors que no s'han tingut en compte. De totes maneres, és important conceptualitzar el què es vol fer abans de començar a programar, ja que tenir un diagrama de flux inicial ajuda i agilitza l'elaboració del codi.

3. Programació amb MPLAB X IDE.

Durant la fase de programació amb el software MPLAB X IDE s'utilitza com a compilador el software XC16 en la seva versió 1.23. Malgrat que a l'elaboració d'aquest projecte existeixen compiladors més actuals com el ASM30 i C30, es decideix utilitzar el

compilador XC16 perquè l'arxiu base per a l'elaboració del projecte facilitat per Innovem ja està compilat amb aquest software.

El software XC16 permet la compilació de llenguatge C i ensamblador, ambdós utilitzats en aquest projecte.

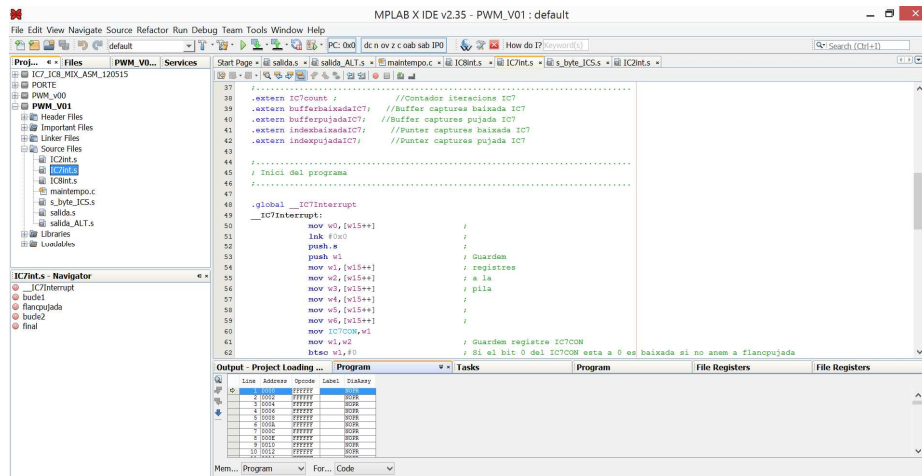


Fig 4.1. Programació amb MPLAB X IDE.

4. Depuració de codi amb simulador.

El software MPLAB X IDE incorpora també eines molt potents per a la simulació del codi. A més, quan es depura amb simulador es poden utilitzar múltiples breakpoints per analitzar el funcionament del programa. Durant l'elaboració del projecte s'utilitzen les següents eines:

- Stimulus: s'utilitza per simular l'entrada de senyals per qualsevol pin del microcontrolador. Permet parametritzar si les senyals són síncrones, asíncrones, la duració dels polsos i la freqüència d'aquests.

Asynchronous	Pin/Register Actions	Advanced Pin/Register	Clock Stimulus	Register Injection		
Label	Pin	Initial	Low Cycles	High Cycles	Begin	End
CAPTURA1	IC2	Low		23	23 At Start	Never
CAPTURA2	IC7	Low		42	4 At Start	Never
CAPTURA3	IC8	Low		36	10 At Start	Never

Fig 4.2. Stimulus de MPLAB X IDE.

- Visualitzador de variables: imprescindible per observar el comportament del programa. Permet visualitzar qualsevol variable tant interna (SFR) del microcontrolador, com símbols globals creats per l'execució del programa. A més la visualització pot ser en binari, decimal o hexadecimal. Es poden exportar les dades al software de fulla de càlcul.

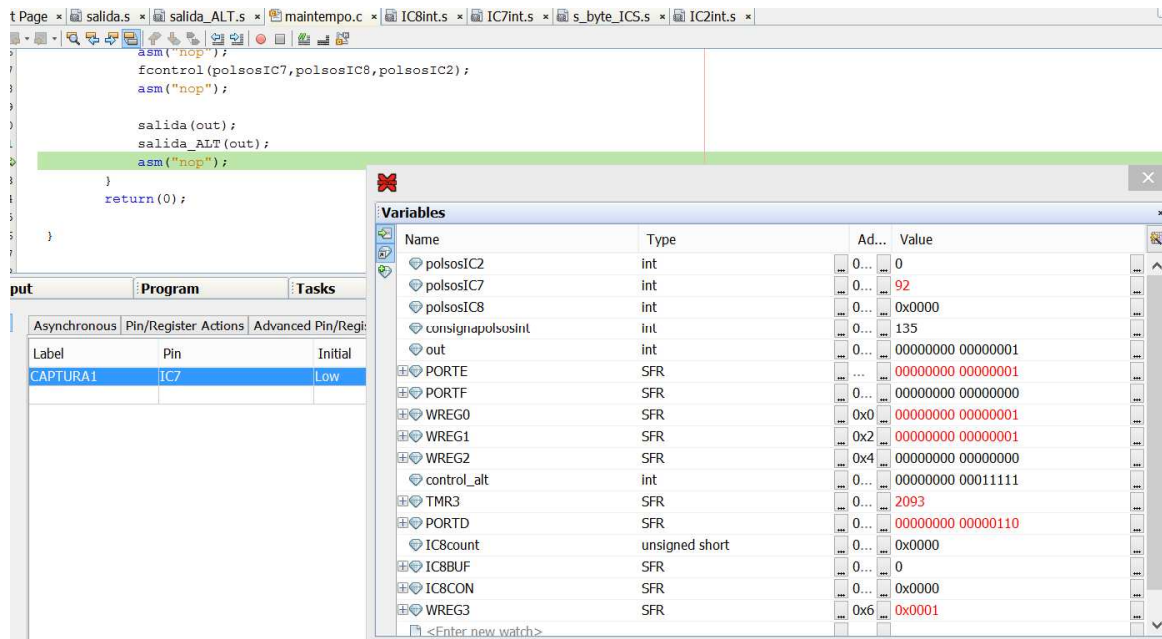


Fig 4.3. Visualitzador de variables de MPLAB X IDE.

5. Test i depuració codi amb debugger ICD3 i instrumentació de laboratori.

En aquesta fase s'utilitza el depurador ICD3 de l'empresa Microchip facilitat per Innovem. Aquest accessori permet depurar codi utilitzant un breakpoint i visualitzar variables en línia. En aquest punt s'utilitzen senyals reals provinents del generador de funcions i font d'alimentació del laboratori per simular les senyals que vénen de l'electrònica del prototip.

6. Assemblatge del codi nou al ja existent.

En aquest punt, i un cop validat el codi en simulador i amb el depurador ICD3, es realitza l'assemblatge a la resta del codi ja programat. És important respectar les variables i la seqüència lògica del programa al realitzar aquest pas, perquè no apareguin errors nous no contemplats al anar afegint nous mòduls al programa.

En definitiva, el procés de generació de les diferents subrutines de codi del projecte es pot resumir en el següent diagrama de flux:

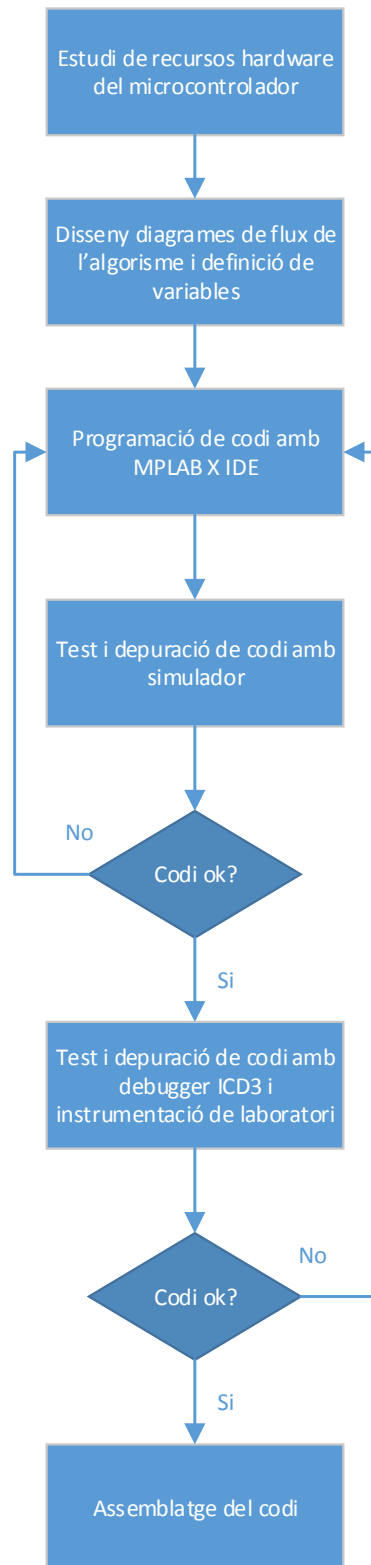


Fig.4.4. Diagrama de flux del procés de programació.

4.2. Solució tècnica.

4.2.1. Seqüència principal del mòdul de lectura i control de corrents.

En aquest punt es pretén donar la informació de com s'ha estructurat la seqüència principal del programa i quines són les principals variables utilitzades, explicant qualitativament com funcionen les diferents subrutines que el conformen. S'adjunten al document Annexos tots els algorismes i codis que conformen el projecte.

Com s'ha comentat a l'apartat 2, aquest projecte pretén afegir un mòdul de control de velocitat a la programació ja existent del tren, per tant hi han certes variables i rutines que ja estan creades per l'empresa Innovem que s'utilitzen com a nexes a la resta del codi ja programat. Malgrat que aquestes subrutines no formen part del projecte, és necessari introduir-les i explicar-les per entendre el funcionament del programa. Aquestes subrutines són: la rutina de detecció de fases actives del tren i la d'activació de sortides de nivell baix dels IGBT's y LED's (marcades de color verd a la figura 4.5. Seqüència principal del programa).

La seqüència principal del mòdul de control de velocitat es divideix en quatre fases:

- Preparació de les senyals d'entrada.
- Activació de les interrupcions per la lectura de polsos dels IR2175.
- Càlcul de la intensitat llegida durant les interrupcions.
- Generació de l'acció de control pels IGBT's del prototip.

Fora de la seqüència principal del mòdul de control també hi ha molta programació, però o bé aquesta no té un comportament seqüencial definible a la seqüència principal (interrupcions) o bé queda fora del bucle principal de la seqüència de control (càlcul de la consigna) ja que no es realitza a cada cicle d'execució del mòdul de control. Així doncs, aquest codi, que també és part essencial pel desenvolupament de la solució tècnica, s'explica en detall en els punts posteriors.

A continuació (figura 4.5) es pot observar el diagrama de flux de la seqüència principal del programa, indicant també les diferents fases de les que consta i la part de codi que queda obert a les interrupcions.

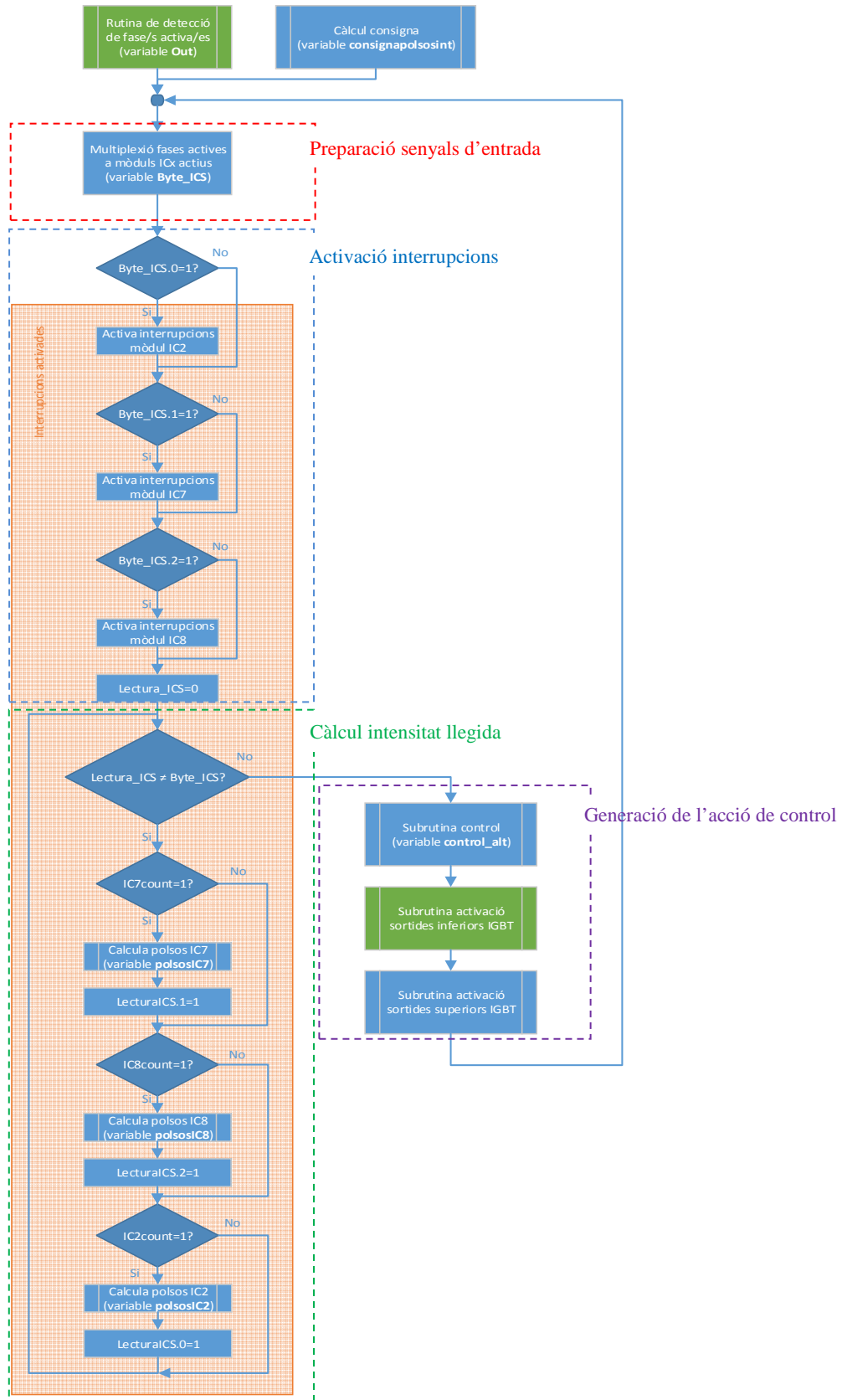


Fig. 4.5. Seqüència principal del programa.

4.2.1.1. Preparació senyals d'entrada i activació d'interrupcions.

Aquestes dues fases de la seqüència principal del programa s'executen ambdues en la subrutina *s_byte_ICS*.

L'objectiu d'aquesta subrutina, realitzada tota en ensamblador, és la de transformar la variable *Out* que ve donada pel codi previ, és a dir, pel codi ja realitzat per Innovem, a la variable *Byte_ICS* i activar els mòduls de captura ràpida de polsos per Hardware del microcontrolador.

La variable *Out* indica quina o quines fases, o bobines estan actives, de la següent manera:

Out				
Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Bobina 5	Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1

Taula 4.1. Equivalència variable Out amb fases actives.

El motiu de fer aquesta subrutina és perquè les senyals dels components IR2175 de lectura de corrent estan multiplexades amb un integrat 74HC58 de la següent manera:

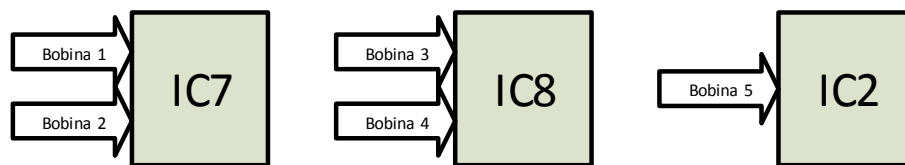


Fig. 4.6. Multiplexió senyals corrents

Per tant, per efectuar l'activació de les interrupcions per poder llegir senyals dels debanats de les bobines es genera la variable *Byte_ICS* que equival al següent:

Byte_ICS		
Bit 2	Bit 1	Bit 0
IC8	IC7	IC2

Taula 4.2. Variable Byte_ICS

És a dir, la primera funció de la subrutina *s_byte_ICS* és la de multiplexar la senyal de la variable OUT de 5 bits a la variable *Byte_ICS* de 3 bits.

Si per exemple la variable *Out* té el valor "000101", vol dir que estan activades les bobines 1 i 3, i per tant com a sortida de la subrutina, el valor de la variable *Byte_ICS* és: "110", ja que les bobines 1 i 3 estan associades als mòduls de captura IC7 i IC8, respectivament.

Un cop la variable *Byte_ICs* ja està generada, la subrutina té la funció d'activar les interrupcions dels mòduls ICx en funció del valor de la variable *Byte_ICs* ("Activació d'interrupcions" al diagrama de flux de la figura 4.5).

Per fer-ho, s'activa el bit 1 dels registres de configuració dels mòduls IC: ICxCON, el que provoca que comencin a capturar flancs de baixada.

Finalment la subrutina reseteja el valor de la variable *lecturaICS*.

4.2.1.2. Càlcul de la intensitat llegida de les interrupcions.

Aquesta fase està formada bàsicament per un bucle recursiu en el qual l'única condició per sortir del bucle és que les variables *Byte_ICs* i *lecturaICS* tinguin el mateix valor.

La funció d'aquesta part de codi del programa és la de la gestió i transformació de les dades que van arribant de les interrupcions produïdes per la lectura del mòdul de captura de flancs. A l'apartat 4.2.2. s'explica en detall com és el codi de les interrupcions i quina estratègia s'utilitza per llegir el duty cycle dels IR2175.

Quan de les interrupcions d'un mòdul de lectura (IC7, IC8 o IC2) ja s'han extret totes les captures necessàries per realitzar el càlcul de la intensitat mesurada, s'activa un flag per software, que és la variable *ICxcount*. Si aquest flag està a 1 vol dir que les interrupcions del mòdul en qüestió ja han acabat i s'executa la subrutina *fpolsosICx*.

La subrutina *fpolsosICx*, escrita tota en llenguatge C, té la funció de transformar totes les dades capturades durant les interrupcions: 1 flanc de pujada i 4 flancs de baixada, a una sola variable (*polsosICx*); i que sigui aquesta el nombre de polsos de rellotge que ha estat a nivell alt la senyal provocadora d'interrupcions durant quatre captures.

Un cop executada la subrutina *fpolsosICx* es modifica el valor de la variable *lecturaICS* indicant quin mòdul ha estat llegit. Així doncs, si quan es torna a entrar al bucle no queden més mòduls per llegir, voldrà dir que la variable *lecturaICS* tindrà un valor igual al de la variable *Byte_ICs* i comença l'execució de la fase de generació de l'acció de control.

4.2.1.3. Generació acció de control.

En aquesta secció s'estableix el control final dels drivers IGBT del tren. Com es comenta a l'apartat 3.2.4, els encapsulats FCAS50SN60 estan formats per dos drivers IGBT cada un. El driver "alt" és l'encarregat de modular la senyal de control, mentre que el driver del

costat inferior, es manté activat si la fase a la qual pertany està activada (el sensor inductiu està detectant), independentment de l'acció de control.

La senyal que activa el driver inferior connecta també un LED de senyalització de fase activa i s'utilitza també per multiplexar senyals que venen dels sensors de corrent IR2175 a l'encapsulat 74HC58.

En definitiva, en aquest punt es pretén llegir els resultats de lectura de corrents, efectuar el llaç de control i actuar sobre les deu sortides del microcontrolador que estan connectades a les entrades/portes dels drivers IGBT que controlen el tren.

Per tant, mitjançant la senyal llegida en la variable *polsosICx*, es compara amb la senyal de consigna, variable *consignapolsosint*, i s'estableix una seqüència que activa les sortides de les fases actives, si és necessari.

Per realitzar-ho, aquesta secció de programa, consta de tres subrutines:

- Subrutina *fcontrol* (subrutina de control)

Aquesta subrutina dóna de sortida la variable *control_alt*. Aquesta variable conté la informació de quines fases s'hauran d'activar (desmultiplexant a més de tres senyals d'entrada a cinc bits de sortida, ja col·locats expressament en sintonia amb la variable *out* per després poder operar directament).

Un "1" en un bit d'aquesta variable vol dir que la senyal llegida és inferior a la consigna. Per tant, en el cas de, per exemple tenir una lectura a la variable *polsosIC7* de 135 i una consigna predefinida a la variable *consignapolsosint* de 145, la variable *control_alt* a la sortida de la subrutina *fcontrol* agafa el valor "00011".

control_alt				
Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
IC2	IC8	IC8	IC7	IC7

Taula 4.3. Variable control_alt

És important comentar en aquest punt, que tan per la construcció física del xassís i posició de les bobines del tren; com per protecció per software (ja generat per Innovem), no és possible llegir dues senyals simultànies de dues fases que estiguin multiplexades al mateix mòdul de captura de corrents. És a dir, és impossible que en un cicle de scan del programa

la variable *out* valgui per exemple “00011”, el que voldria dir que estan detectant les bobines 1 i 2, ambdues multiplexades al mateix mòdul IC7.

La seqüència d’aquesta subrutina és la següent:

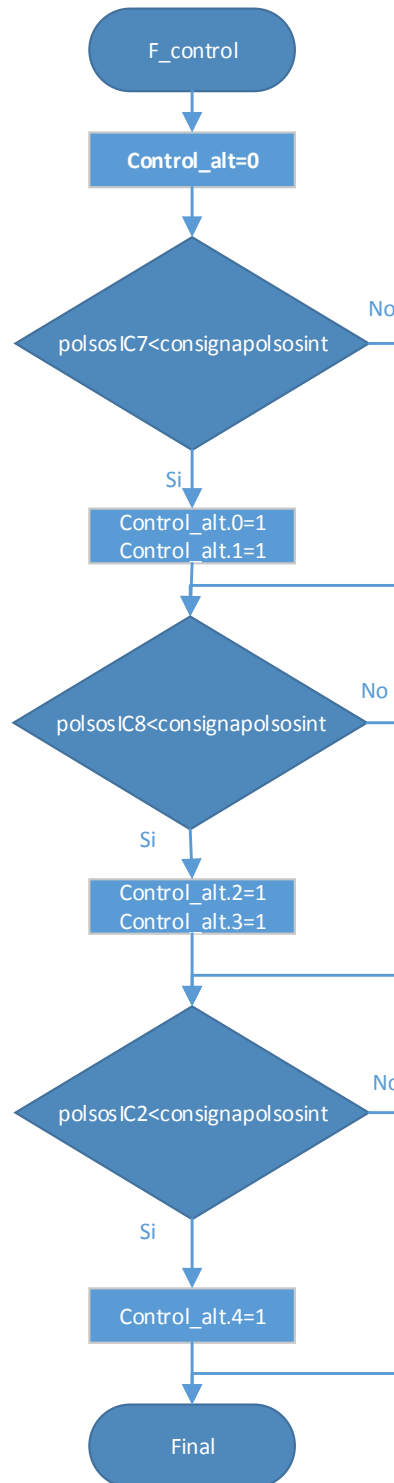


Fig.4.7. Seqüència subrutina f_control.

- Subrutina *salida* (activació sortides inferiors IGBT)

Aquesta subrutina, ja programada per Innovem, activa les sortides inferiors dels drivers de potència en funció de la variable *out*. L'única acció que s'efectua sobre aquesta subrutina és eliminar el codi que activava les sortides superiors mitjançant el hardware del microcontrolador de control PWM, ja que en aquest projecte no s'utilitza.

- Subrutina *salida_ALT* (activació sortides superiors IGBT)

Aquesta subrutina té la funció final d'activar les portes superiors dels drivers IGBT. Per fer-ho, simplement efectua a cada cycle de scan una operació lògica binària AND entre les variables *out* i *control_alt*. El resultat de l'operació és una variable de cinc bits que després d'ordenar-la en el mateix sentit que les fases, es fa sortir pel port E del microcontrolador, que està connectat a les portes de control superiors dels drivers de potència.

A la Fig.4.8 es pot observar un exemple resum de com funciona el codi de generació de l'acció de control. A l'exemple hi ha una consigna predefinida de 120 i les fases que estan actives (variable *out*) són la 1 i la 3. Durant la fase de lectura de la intensitat, l'algorisme ens retorna la informació que el mòdul IC7 (bobina 1) ha llegit 135 i el mòdul IC8 (bobina 3) ha llegit 92.

Per tant, després d'executar les subrutines *fcontrol*, *salida* i *salida_ALT*, es pot observar com s'activaran les portes inferiors dels drivers que corresponen a les bobines 1 i 3, però només s'activarà la porta superior de la bobina 3, ja que és la única que la intensitat llegida (92) és inferior a la consigna programada (120).

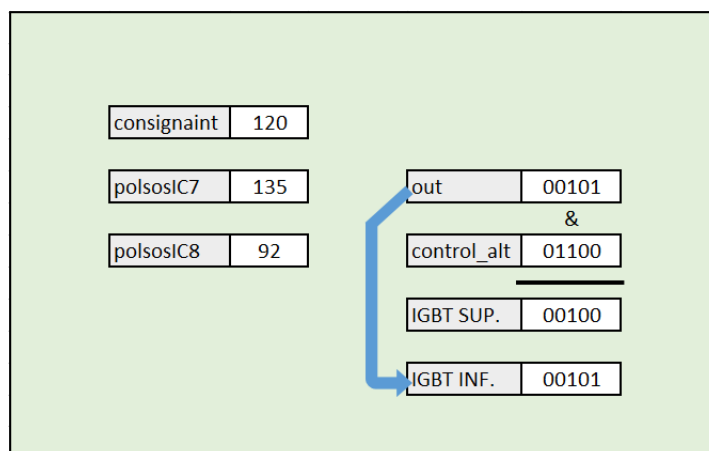


Fig.4.8. Exemple generació acció de control.

4.2.2. Gestió de les interrupcions.

4.2.2.1. Els mòduls “Input Capture” de Microchip.

Per l'execució de l'algorisme encarregat d'efectuar les interrupcions del programa, és necessari de l'estudi previ dels recursos hardware del microcontrolador. En el cas, del present projecte prenen especial rellevància els mòduls “Input Capture” que incorporen els microcontroladors de la família DSPIC30F de Microchip.

Es pretén introduir en aquest apartat tant el funcionament general d'aquests mòduls hardware com els principals registres utilitzats, per entendre la parametrització i el codi encarregat de la gestió de les interrupcions, detallat en els punts posteriors.

Els mòduls “Input Capture”, a partir d'ara en la present memòria indicats com a IC, tenen la funció de capturar via hardware el valor d'un temporitzador predeterminat a cada esdeveniment o pols d'entrada de senyal que rebi el microcontrolador a un dels pins dedicats a tal efecte; i guardar aquesta lectura a un buffer de registres FIFO. És un mòdul molt utilitzat per mesurar freqüències, períodes o temps de cicles. En el cas del microcontrolador utilitzat en el present projecte, el DSPIC30F4011, es disposa de quatre mòduls IC: el IC1, IC2, IC7, IC8, però se n'utilitzen realment tres, ja que el pin d'entrada pel mòdul IC1 no s'utilitza per a lectura de senyals de corrent.

Cada un dels mòduls IC, té la possibilitat de treballar en múltiples modes operatius, sempre configurant el registre del microcontrolador ICxCON corresponent a cada mòdul:

NOM	ADR	15	14	13	12-8	7	6	5	4	3	2	1	0
IC2BUF	0x0144	Registre Buffer de mòdul IC2											
IC2CON	0x0146	-	-	ICSIDL	-	ICTMR	ICI<1:0>	ICOV	ICBNE	ICM<2:0>			

Taula 4.4. Registres de control del mòdul IC2

Parametritzant els registres ICI i ICM, és possible que un mateix mòdul treballi de forma completament diferent en dues interrupcions consecutives. En el present projecte, per exemple, s'utilitzen dues configuracions per a la lectura final del temps de cicle. Tal i com s'indica en el punt 4.2.2.2 de principi de funcionament, primer es configura el mòdul IC per llegir tots els flancs negatius que entrin pel pin d'entrada, generant una interrupció al moment i posteriorment es configura el mòdul IC per llegir fins a quatre lectures de flancs positius abans no es genera la interrupció. Aquesta gestió és possible modificant el valor

del registre ICxCON a la pròpia interrupció provocant que els paràmetres ICI i ICM prenguin els següents valors:

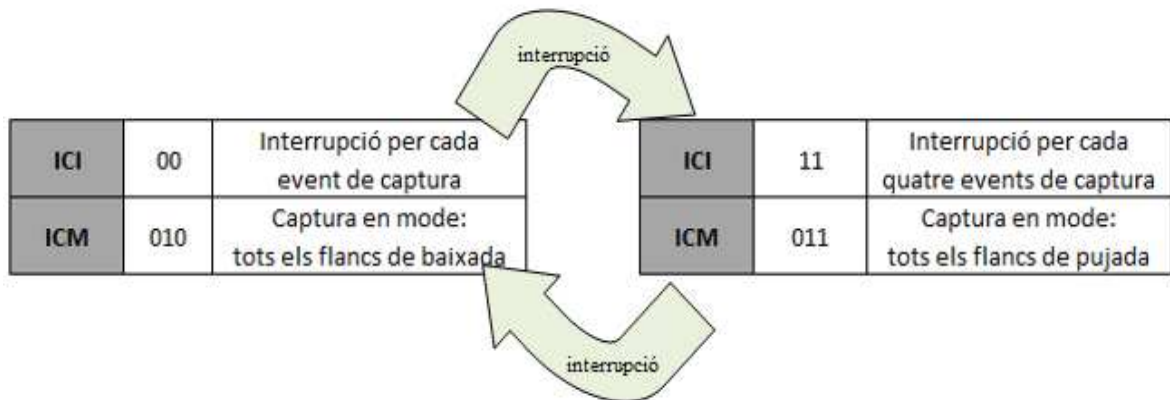


Fig. 4.9. Alternança registres ICI i ICM dels mòduls IC a les interrupcions.

Els registres ICxCON tenen altres paràmetres que també es configuren per la captura dels mòduls IC, encara que aquests, a diferència del ICI i el ICM, en aquest projecte són invariables un cop parametritzats a la configuració inicial del codi. Aquests paràmetres són els següents:

- ICSIDL: es deixa a 0. El sistema no funciona quan el microcontrolador està en mode IDLE.
- ICTMR: es deixa a 0. Tots els mòduls IC utilitzats utilitzen el mateix temporitzador (temporitzador 3). D'aquesta manera l'algorisme de lectura de corrents no utilitza excessius recursos hardware del microcontrolador, ja que deixa operatius quatre temporitzadors més, a lliure disposició per la rutina d'execució principal del programa.

A més, els registres ICxCON tenen dos flags, de només lectura, que s'utilitzen a la seqüència de les interrupcions:

- ICOV: quan està a "1", indica quan hi ha un sobrepassament al registre buffer FIFO, és a dir, s'activa quan el registre buffer acumula més de quatre captures sense realitzar-hi cap lectura.
- ICBNE: quan està a "1", indica que el registre buffer FIFO està buit.

4.2.2.2. Principi de funcionament.

La lectura d'un cycle de servei o duty-cycle (d) d'una senyal digital amb un microcontrolador, es realitza necessàriament capturant els valors (quan es produeixen els flancs de pujada i de baixada de la senyal) d'un temporitzador o comptador, que està permanentment en marxa, sincronitzat amb el rellotge del propi microcontrolador. Quan es tenen capturats els dos valors (el de baixada i el de pujada), simplement es tracta de restar el valor de baixada (t_b) al de pujada (t_p). El valor d'aquesta resta retorna el nombre de polsos de rellotge del microcontrolador que la senyal ha estat a nivell alt (T_{ON}) (4.1). Per senyals amb una freqüència constant, és suficient la variable T_{ON} per determinar el cycle de servei, ja que el període (T) és constant (4.2).

$$T_{ON} = t_b - t_p \quad (4.1)$$

$$d = \frac{T_{ON}}{T}; T = \{cnt\} \rightarrow d = T_{ON} = t_b - t_p \quad (4.2)$$

Les senyals provinents dels integrats IR2175 (Fig.3.6), són un tren de polsos d'aproximadament 130 kHz, on el cycle de servei de la senyal és funció de la intensitat que circula per la resistència shunt situada en el circuit de potència de les bobines. Aquesta freqüència si bé és constant, es pot considerar elevada ja que el microcontrolador DSPIC30F4011 que utilitza Innovem està configurat a 6 MHz, el que implica que entre un pols i el següent com a màxim es tenen uns 7,7 μ s. Per aquest motiu l'algorisme encarregat de capturar els polsos mitjançant interrupcions es desenvolupa íntegrament en llenguatge ensamblador, que és molt més ràpid i òptim que el llenguatge C.

Altrament, és necessari indicar també que, segons indicacions d'Innovem, quan el tren està en marxa es produeix solapament entre fases, és a dir, que és necessari que encara que es treballi amb interrupcions, es capturin fins a dues lectures simultànies.

A més, l'algorisme de captura de corrents ha de ser capaç de capturar múltiples flancs del tren de polsos en una mateixa execució per reduir o minimitzar possibles lectures errònies per soroll.

En definitiva, es desenvolupa una solució tècnica que conceptualment realitzi quelcom similar al explicat al inici d'aquest punt, és a dir, realitzar la lectura d'un temps de cycle d'una senyal digital mitjançant la captura d'un temporitzador en els flancs de pujada i baixada de la senyal, per finalment operar amb aquestes captures.

La solució dissenyada, però és necessàriament més complexa que la ideal que es realitzaria si no existissin aspectes tècnics com: elevada freqüència de la senyal respecte el rellotge del microcontrolador, la necessitat de capturar múltiples flancs en una mateixa execució o que sigui necessari capturar més d'una senyal alhora.

Com que la freqüència dels polsos de baixada és constant, es planteja un algorisme en el que primer es capturi un flanc de baixada, i tot seguit es canviï la configuració (com s'explica en el punt 4.2.2.1) per capturar quatre flancs de pujada. Els flancs de baixada necessaris per calcular el cycle de servei (representats a la figura 4.11 amb els cercles numerats de color verd del 1 al 4), no es prenen d'una captura real, si no que es calculen per software mitjançant la rutina *fpolsosICx*, fora de les interrupcions. Això és possible perquè els integrats IR2175 garanteixen que la freqüència dels polsos de baixada és robusta i per tant, constant [13]. D'aquesta manera s'assegura que les interrupcions no siguin llargues en excés, i que es puguin realitzar dues captures simultànies, al reduir significativament el nombre d'interrupcions necessàries.

En definitiva, la solució dissenyada per capturar les interrupcions consta de tres fases:

- Captura d'un flanc de baixada.
- Captura quatre flancs de pujada.
- Càlcul de polsos de rellotge amb senyal a nivell alt (*fpolsosICx*)

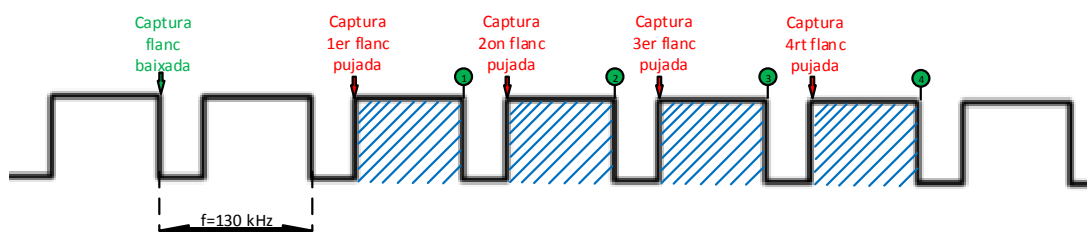


Fig. 4.10. Captura dels flancs de lectura de corrents.

Aquest desenvolupament i la utilització del mòdul de captura IC de Microchip, permeten que per obtenir la lectura de quatre cycles, sigui necessari l'ús de només dues interrupcions,

i que en el cas de que coincideixin dues interrupcions alhora, al disposar del registre FIFO de captura de senyals en segon pla per hardware, no es perdi informació. A la figura 4.12 es pot observar el temps que ocupen les interrupcions en la captura de flancs de lectura de corrents.

La interrupció 1, encarregada de capturar el primer flanc de baixada i de canviar la configuració per capturar flancs de pujada té una longitud de 27 cicles d'instruccions.

La interrupció 2, encarregada de llegir les quatre lectures emmagatzemades al registre FIFO de flancs de pujada té una longitud de 50 cicles d'instruccions.

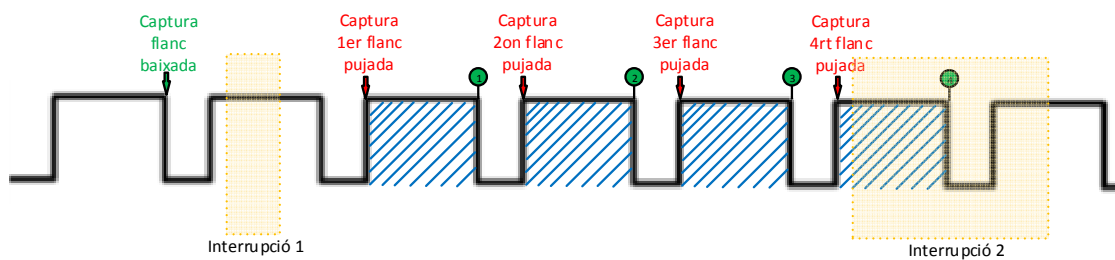


Fig. 4.11. Interrupcions en la captura de flancs de corrent.

4.2.2.3. Diagrama de flux de les interrupcions.

A continuació s'introdueix el diagrama de flux encarregat de realitzar les interrupcions i s'indica breument les variables principals en aquest codi.

L'alternança d'interrupcions entre la interrupció 1 i la 2 es gestiona mitjançant les subrutines *ICxInterrupt*. Aquestes subrutines estan programades íntegrament en llenguatge ensamblador i són les encarregades de capturar els flancs de pujada i de baixada de la senyal provinent dels integrats IR2175.

Bàsicament aquestes subrutines, que funcionen per activació d'interrupció, es dediquen a parametritzar els mòduls IC, mitjançant els registres ICM i ICI, i guardar els valors del registre ICxBUF a la variable *BufferbaixadaICx* (si és un flanc de baixada) o a la variable *BufferpujadaICx* (si es tracta d'un flanc de pujada).

Quan l'algorisme completa un cicle complet de captura de dades, és a dir, captura el flanc de baixada i els quatre flancs de pujada, s'activa un flag anomenat *ICxcount*. Aquest flag és l'encarregat de comunicar a la seqüència principal del programa que totes les captures necessàries pel mòdul ICx en qüestió ja han sigut realitzades i donar l'ordre de calcular el nombre de polsos de la senyal en estat alt mitjançant la rutina *fpolsosICx*.

A la figura 4.12 es pot observar el diagrama de flux de les interrupcions:

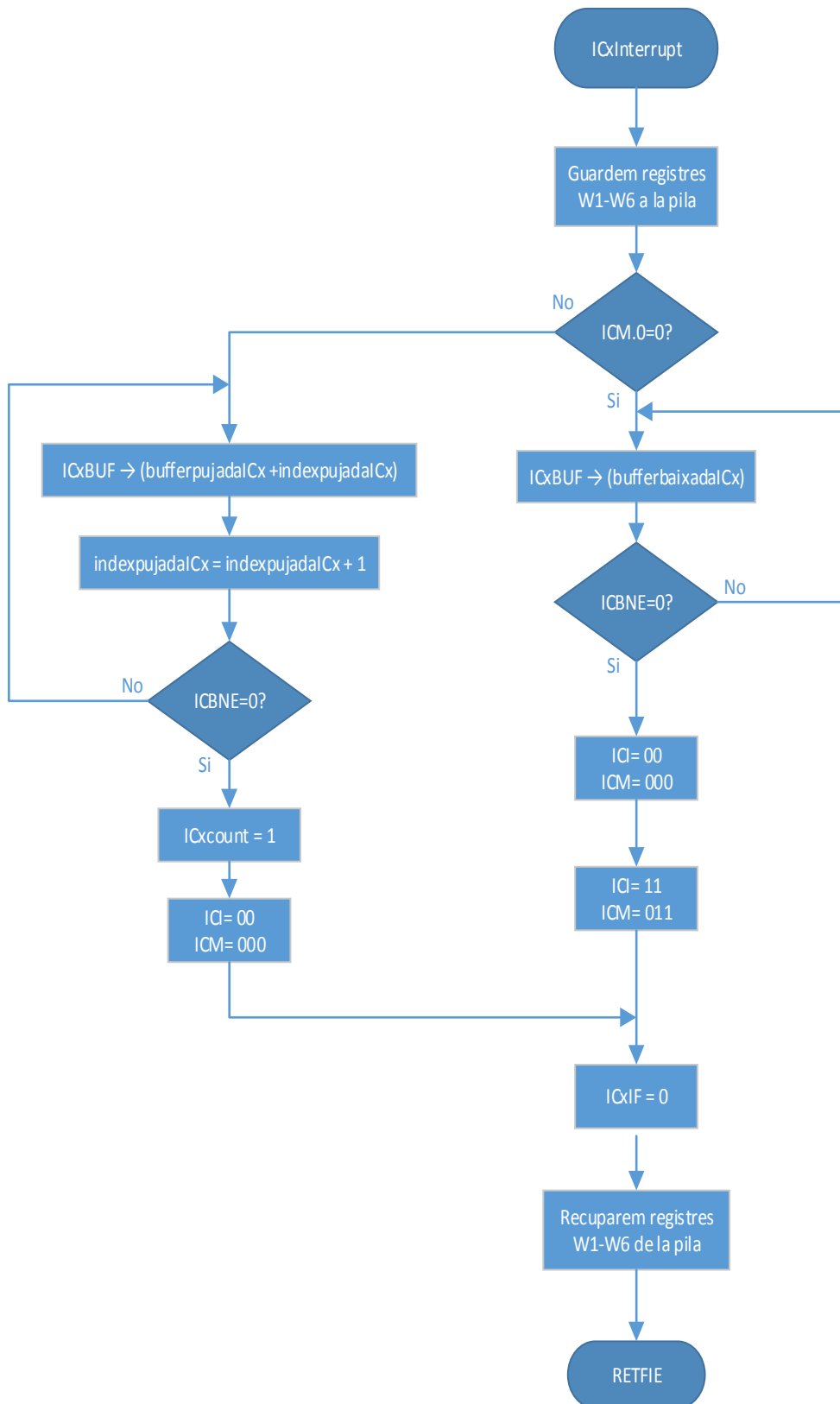


Fig.4.12. Diagrama de flux de les interrupcions

4.2.3. Subrutina de generació de consigna.

Aquesta subrutina, per petició d'Innovem, no s'executa en el cicle principal del programa, si no que en el present projecte s'executa només un cop, durant la inicialització del microcontrolador. La idea és que quan s'integri al codi ja realitzat per Innovem, aquesta subrutina s'executi només quan el microcontrolador detecti un canvi en la informació provinent de la xarxa de comunicació CAN.

A qualsevol llaç de control, és necessari que la consigna i la sortida del llaç tinguin la mateixa unitat. La funció d'aquesta subrutina és transformar la unitat d'enginyeria que es vol controlar (consigna en Ampers) a la mateixa unitat que utilitza l'algorisme per mesurar la intensitat (polsos de rellotge en estat alt).

Es desenvolupa una senzilla subrutina en C, que no és més que una funció que transforma una entrada en Ampers a una sortida en polsos de microcontrolador.

A l'annex III, s'adjunten els càlculs realitzats per la programació d'aquesta subrutina.

4.3. Desviacions.

Durant l'execució del projecte es detecten certes desviacions que modifiquen tant la planificació com algun objectiu definit al document avantprojecte. Aquestes desviacions són les següents:

- Resolució de la lectura de corrents.

L'elevada freqüència de la senyal provinent dels IR2175 i el fet de que aquesta senyal només modula del 50% al 91% del cicle de servei (perquè les intensitats que es llegeixen només són positives), provoca que la resolució final de l'algorisme de lectura de corrents (1,36 A/pols) sigui molt inferior a la prevista a l'avantprojecte, ja que el microcontrolador està configurat a 6 MHz.

Aquest fet no té solució possible sense sortir de l'abast d'aquest projecte, és a dir, modificant aspectes del hardware o configuració del microcontrolador perquè el seu rellotge intern sigui més ràpid.

El resultat d'això és que les hores realitzades pel desenvolupament del llaç de control siguin realment inferiors a les planificades. Aquest fet, és degut a que després d'analitzar

les diferents alternatives pels llaços de control, es conclou que no té sentit realitzar un algorisme de control més complicat al realitzat, com per exemple un sistema PID o un sistema predictiu, ja que provocaria una execució més lenta del llaç principal del programa i tampoc es podria afinar amb la poca resolució de lectura de corrents aconseguida.

Per calcular la resolució de la lectura de corrents, primer es calcula el període del rellotge intern del microcontrolador (4.3), per després calcular el període dels límits inferior i superior del cycle de servei de la senyal de lectura de corrents: 0 A amb cycle de servei al 50% i 26 A amb cycle de servei al 91% (4.4). Després es calcula el període efectiu de treball (4.5) restant els dos extrems, i el nombre de polsos és la divisió del període efectiu entre el període del rellotge intern del microcontrolador. Finalment es calcula la resolució dividint el rang d'unitats d'enginyeria (A) entre el nombre de polsos (4.7).

$$T_{clk} = \frac{1}{f_{microcontrolador}} = \frac{1}{6.000.000} \approx 0,166 \mu s \quad (4.3)$$

$$I = 0 A \rightarrow T_{50} = 0.5 \cdot \frac{1}{f_{IR2175}} = 0.5 \cdot \frac{1}{130000} \approx 3,84 \mu s$$

$$I = 26 A \rightarrow T_{91} = 0.91 \cdot \frac{1}{f_{IR2175}} = 0.91 \cdot \frac{1}{130000} = 7 \mu s \quad (4.4)$$

$$T_{ef} = T_{91} - T_{50} = 7 \mu s - 3,84 \mu s \approx 3,16 \mu s \quad (4.5)$$

$$n = \frac{T_{ef}}{T_{clk}} = \frac{3,16 \mu s}{0,166 \mu s} \approx 19,03 \text{ polsos} \quad (4.6)$$

$$resolució = \frac{26 A}{n} = \frac{26 A}{19,03 \text{ polsos}} \approx 1,36 A/pols \quad (4.7)$$

En definitiva, la resolució obtinguda és de 19 polsos o passos per un rang operatiu de 26 amperes, el que equival a una resolució de quatre bits. Aquesta resolució es considera suficient per efectuar un control de velocitat del tren que canviï segons consigna programada, però és insuficient per justificar l'aplicació d'un sistema PID o predictiu al llaç de control, ja que la sintonització és gairebé impossible. L'algorisme de control realitzat, donada la seva simplicitat, té, a més, una freqüència d'actualització molt més ràpida.

- Implementació final al prototip

Degut a diversos factors, no ha estat possible realitzar la implementació final al prototip del tren. Aquests factors són:

1. Desviació a la planificació.

Quan es realitza la planificació, no s'estima correctament els recursos necessaris per assimilar els conceptes del microcontrolador, de l'electrònica del prototip i de l'entorn de programació MPLAB per la realització del projecte. Finalment s'han necessitat 20 hores més en aquest punt de la planificació per a la realització del projecte.

2. Desviació a la validació del hardware de lectura de corrents.

Durant la fase de validació del hardware de lectura de corrents es produeix una desviació important en la planificació original. Degut a que els IR2175 no donaven la informació esperada es decideix reproduir el circuit de lectura de corrents en una protoboard, per així aïllar l'error i finalment detectar on està el problema. Finalment es detecta que hi ha dos integrats IR2175 que no funcionen correctament, motiu pel qual s'han de substituir. A més, durant el procés de validació del hardware de lectura de corrents també hi ha un problema amb la instrumentació de laboratori. El fet que l'oscil·loscopi estigués connectat a la font d'alimentació per la pressa de terra de l'endoll provocava una lectura incorrecta als integrats IR2175. Tot aquest procés de validació del hardware de lectura de corrents provoca un endarreriment d'unes tres setmanes més.

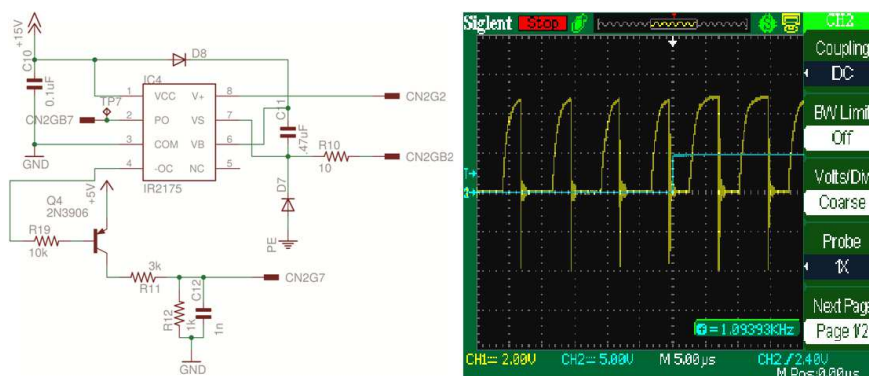


Fig 4.13. Muntatge circuit lectura de corrents a protoboard i lectura senyal IR2175.

Així doncs, degut a l'endarreriment provocat per les dues desviacions comentades, i al fet que el laboratori de treball no està operatiu el mes d'agost, es decideix validar la programació realitzada amb instrumentació de laboratori sobre la targeta de control del propi tren. Aquest procés es realitza simulant escrupolosament les senyals que venen de l'electrònica del tren, segons data-sheet de components.

5. Resultats.

Per la validació del codi realitzat es dissenyen una sèrie de tests i proves que es poden consultar a l'annex II, on es comproven alguns aspectes tècnics necessaris que ha de complir el codi quan es planteja el projecte.

A la redacció del present projecte es comproven i validen els següents aspectes que efectua l'algorisme:

- ✓ Linealitat en la mesura de corrents.
- ✓ Correcte lectura de dues fases actives alhora.
- ✓ Activació independent de les cinc fases.
- ✓ Funcionament del llaç de control (resposta dependent de la consigna programada).
- ✓ Freqüència de commutació dels IGBT acceptable (entre 2,2-8,5 kHz).

A nivell d'utilització de recursos hardware, s'aconsegueix acomplir l'objectiu d'utilitzar poca memòria de dades i programa, ja que el microcontrolador ha d'incorporar més codi per part d'Innovem. Els recursos hardware utilitzats són:

- 144 bytes de memòria de dades (7% de la capacitat total del microcontrolador).
- 1147 words de memòria de programa (7% de la capacitat total del microcontrolador).
- 1 temporitzador dels cinc disponibles (Temporitzador 3).

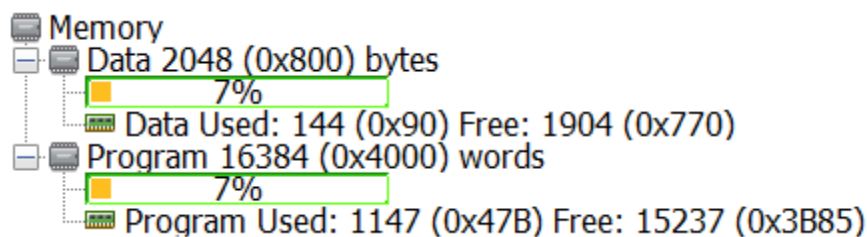


Fig. 5.1. Ocupació de memòria del microcontrolador.

6. Planificació.

Durant la realització del projecte apareixen certes desviacions o desajustos no contemplats durant la planificació original de l'avantprojecte. Es presenten els principals desajustos i la planificació final realitzada tot seguit.

Per motius laborals, s'ha redefinit l'horari de treball del projecte a la següent jornada:

- Dilluns a divendres: 18:00h a 21:00h
- Dissabtes: 17:00h a 20:00h

També per motius laborals, es defineix finalment l'inici del projecte el 02/03/15 i durant el període del 11/05/15 al 29/05/15 no es pot avançar en el desenvolupament del projecte.

A nivell de definició de tasques i de relació de precedència entre elles, el projecte no ha patit variacions destacables respecte la planificació inicial. La planificació s'ha dividit en quatre grans blocs:

- Familiarització entorn de programació i microcontrolador.
 - Estudi en profunditat de l'entorn MPLAB X IDE
 - Realització de la primera configuració per realitzar proves.
 - Elaboració del primer programa (Encendre un LED) i familiarització amb ICD3.
- Programació mòdul de lectura de corrents.
 - Estudi especificacions circuit de lectura corrents i arquitectura d'entrades microcontrolador.
 - Realització de disseny i càlculs necessaris per afrontar la programació mòdul lectura de corrents.
 - Programació mòdul lectura de corrents.
 - Validació mòdul de lectura de corrents.
- Programació mòdul de control de corrents
 - Estudi especificacions drivers de potència i arquitectura de sortida PWM del microcontrolador.
 - Realització primer mòdul de programació que activi una bobina en funció del temps de cicle desitjat.
 - Estudi alternatives mòdul de control estudiant el model experimental.

- Disseny i elaboració mòdul de control de corrent per una bobina.
- Validació i sintonització mòdul de control per una bobina.
- Adaptació mòdul de control a les 5 bobines.
- Elaboració escrita i edició dels documents del projecte.
 - Edició i redacció final de tots els documents del projecte

Pel que fa a la durada de les tasques si que hi ha hagut modificacions, explicades a continuació:

1. Bloc familiarització entorn de programació del microcontrolador.

Aquest bloc tenia una duració planificada de 43 hores de treball. Es realitzen finalment 63 hores de treball. El motiu d'aquesta desviació és que el procés de conceptualització dels conceptes bàsics de l'arquitectura del microcontrolador i del software MPLAB no va ser correctament dimensionat a l'avantprojecte.

2. Bloc programació mòdul lectura de corrents.

Aquest bloc tenia una duració planificada de 85 hores de treball, però finalment es requereixen 135 hores per completar aquesta part de la solució tècnica. El motiu principal d'aquesta desviació es produeix durant la fase de validació del mòdul de lectura de corrents. Tal i com s'explica en el punt 4.3., en aquesta fase s'endarrerix l'execució del projecte, perquè es detecten dos integrats IR2175 avariats i hi ha molts problemes amb la utilització de la instrumentació del laboratori.

3. Bloc programació mòdul control de corrents.

La duració planificada a l'avantprojecte per aquest bloc és inicialment de 160 hores, però finalment s'han requerit 110 hores pel desenvolupament de la solució tècnica. La raó d'aquesta desviació és que el mòdul de control dissenyat és més senzill del que inicialment estava previst implementar, tal com s'indica en el punt 4.3.

En definitiva, el desenvolupament del projecte té una durada total de 433 hores respecte les 408 inicialment planificades. Malgrat que això suposa una desviació d'un 6,12% respecte les hores planificades, la data finalització varia del 24/05/2015 al 31/08/2015 principalment pels motius indicats a l'inici: modificació horari de treball, parèntesis de no treball durant part del mes de maig i endarreriment de l'inici del projecte, per motius laborals.

A continuació, es mostra la taula amb les activitats o tasques a fer en el projecte de detall, indicant la relació de precedència entre elles i la durada de cadascuna de les activitats.

	Codi	Activitat	Activitat predecessora	Durada (h)
Familiarització entorn programació i microcontrolador	A	Estudi en profunditat de l'entorn MPLAB X IDE	-	40
	B	Realització de la primera configuració per realitzar proves.	A	8
	C	Elaboració del primer programa (Encendre un LED) i familiarització amb ICD3	B	15
Programació mòdul de lectura de corrents	D	Estudi especificacions circuit de lectura corrents i arquitectura d'entrades microcontrolador	C	20
	E	Realització de disseny i càlculs necessaris per afrontar la programació mòdul lectura de corrents.	D	25
	F	Programació mòdul lectura de corrents	E	40
	G	Validació mòdul de lectura de corrents.	F	50
Programació mòdul de control de corrents	H	Estudi especificacions drivers de potència i arquitectura de sortida PWM del microcontrolador.	G	10
	I	Realització primer mòdul de programació que activi una bobina en funció del temps de cicle desitjat.	H	40
	J	Estudi alternatives mòdul de control estudiant el model experimental.	I	5
	K	Disseny i elaboració mòdul de control de corrent per una bobina.	J	20
	L	Validació i sintonització mòdul de control per una bobina.	K	25
	M	Adaptació mòdul de control a les 5 bobines.	L	15
Redacció	N	Edició i redacció final de tots els documents del projecte	M	90
	O	Preparació de la presentació	N	30

Taula 6.1. Taula d'activitats.

Es presenta diagrama de Gantt i taula de costos. El cost total del projecte son 10.825 €, amb un totalde 433 hores de desenvolupament a raó de 25€/h.



Fig. 6.1. Llistat de tasques i data de termini. Diagrama de Gantt.

Nombre de tarea	Duration	Start	Finish	Resource Names	Cost	% Complete	Actual Cost	Fixed Cost
Planificació projecte control de corrent tren Telmag	89,25 days	Mon 02/03	Mon 31/08/15		10.825,00 €	100%	10.825,00 €	0,00 €
Familiarització entorn de programació i microcontrolador	10,25 days	Mon 02/03	Sun 22/03/15		1.575,00 €	100%	1.575,00 €	0,00 €
Estudi de l'entorn MPLAB X IDE	40 hours	Mon 02/03	Sat 14/03/15	Projectista	1.000,00 €	100%	1.000,00 €	0,00 €
Realització de la primera configuració per realitzar proves.	8 hours	Sun 15/03	Tue 17/03/15	Projectista	200,00 €	100%	200,00 €	0,00 €
Elaboració del primer programa (Encendre un LED) i familiarització amb ICD3	15 hours	Tue 17/03	Sun 22/03/15	Projectista	375,00 €	100%	375,00 €	0,00 €
Programació mòdul de lectura de corrents	38,38 days	Sun 22/03	Mon 01/06/15		3.375,00 €	100%	3.375,00 €	0,00 €
Estudi especificacions circuit de lectura corrents i arquitectura d'entrades microcontrolador	20 hours	Sun 22/03/15	Sat 28/03/15	Projectista	500,00 €	100%	500,00 €	0,00 €
Realització de disseny i càlculs per programació mòdul lectura de corrents	25 hours	Sat 28/03/15	Sun 05/04/15	Projectista	625,00 €	100%	625,00 €	0,00 €
Programació mòdul lectura de corrents	40 hours	Thu 16/04/15	Tue 28/04/15	Projectista	1.000,00 €	100%	1.000,00 €	0,00 €
Validació mòdul de lectura de corrents	50 hours	Wed 29/04	Mon 01/06/15	Projectista	1.250,00 €	100%	1.250,00 €	0,00 €
Programació mòdul de control de corrents	19,75 days	Mon 01/06	Wed 15/07/15		2.875,00 €	100%	2.875,00 €	0,00 €
Estudi especificacions drivers de potència i hardware del microcontrolador.	10 hours	Mon 01/06/15	Thu 04/06/15	Projectista	250,00 €	100%	250,00 €	0,00 €
Realització primer mòdul de programació que activi una bobina en funció del temps de cycle desitjat.	40 hours	Fri 05/06/15	Sat 20/06/15	Projectista	1.000,00 €	100%	1.000,00 €	0,00 €
Estudi alternatives mòdul de control estudiant el model experimental.	5 hours	Sat 20/06/15	Mon 22/06/15	Projectista	125,00 €	100%	125,00 €	0,00 €
Disseny i elaboració mòdul de control de corrent per una bobina.	20 hours	Tue 23/06/15	Tue 30/06/15	Projectista	500,00 €	100%	500,00 €	0,00 €
Validació i sintonització mòdul de control per una bobina.	25 hours	Tue 30/06/15	Thu 09/07/15	Projectista	625,00 €	100%	625,00 €	0,00 €
Adaptació mòdul de control a les 5 bobines.	15 hours	Fri 10/07/15	Wed 15/07/15	Projectista	375,00 €	100%	375,00 €	0,00 €
Redacció	20,63 days	Thu 16/07	Mon 31/08/15		3.000,00 €	100%	3.000,00 €	0,00 €
Edició i redacció final de tots els documents del projecte	120 hours	Thu 16/07/15	Mon 31/08/15	Projectista	3.000,00 €	100%	3.000,00 €	0,00 €

Fig. 6.2. Taula de costos.

7. Impacte Mediambiental.

Per la realització de la viabilitat mediambiental s'ha realitzat una metodologia de llistes de control, annex IV, basada en la Directiva 97/11/CEE per l'avaluació de les repercussions de determinats projectes públics i privats sobre el medi ambient, aplicada a les diferents fases del projecte.

Un cop realitzada l'avaluació d'impacte mediambiental es conclou que el projecte no presenta riscos mediambientals perquè està centrat a la programació d'un software d'un model a escala.

8. Conclusions.

A l'inici del projecte, durant la fase de l'avantprojecte, s'estableixen una sèrie d'objectius a realitzar. Finalment, s'aconsegueixen acomplir tots els objectius inicials menys l'objectiu final d'integració del codi realitzat a l'electrònica i programa del tren Telmag.

Malgrat això, el codi realitzat s'ha dissenyat modularment, i s'ha validat al laboratori amb instrumentació que simula les senyals del tren, per facilitar una possible futura integració al software i hardware del tren Telmag. Aquest procés de validació inclou tots els aspectes tècnics definits com a necessaris perquè el control de velocitat sigui funcional, amb resultats positius.

Com a possible millora detectada pel projecte Telmag, s'identifica la possible redefinició de la base del rellotge intern del microcontrolador. Si es canviés per exemple, la freqüència d'oscil·lació a 36 MHz, s'aconseguiria una resolució de lectura de corrents sis cops millor. Aquest canvi però no és trivial, perquè tot el programa ja dissenyat per Innovem està realitzat perquè treballi amb la base de temps actual, i seria necessari realitzar modificacions al codi creat per Innovem.

En quan al pressupost, s'ha produït una desviació d'un 3,29% respecte l'original previst a l'avantprojecte. El motiu d'aquesta desviació és la redefinició de la durada d'algunes tasques durant l'execució del projecte.

A nivell personal, valoro molt positivament els conceptes adquirits durant l'elaboració del projecte. La possibilitat de treballar en un projecte amb una electrònica en fase de desenvolupament, aprofundir en la programació de microcontroladors d'última generació i en general sentir-se part d'un projecte de recerca i desenvolupament. En aquest sentit és important destacar la tasca d'Innovem, amb la cessió del seu material i disponibilitat davant qualsevol consulta.

El projecte Telmag té l'ambició objectiu de desenvolupar un nou sistema de transport massiu. Crec que és necessari invertir més recursos en aquest tipus de projectes de recerca i desenvolupament, perquè al final són els que marquen l'avenç tecnològic d'una societat. En concret, el motor de reluctància lineal pot esdevenir molt interessant per aplicacions amb molt gradient o inclús verticals. La nova tecnologia de superconductors i les cada cop

més potents bateries, poden fer realitzable en un futur proper el que a dia d'avui no és viable tècnicament, però per això és necessari seguir treballant en la recerca i desenvolupament dels projectes actuals.

9. Referències.

- [1] A.E. FITZGERALD, C. KINGSLEY JR, S.D.UMANS (1992). *Máquinas eléctricas*. McGraw Hill. Mèxic.
- [2] T.J.E. MILLER (1989). *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. Clarendon Press. Oxford.
- [3] J.P. ROMERA, J.A. LORITE (1994). *Automatización*. Thomson Paraninfo.
- [4] R.C. DORF, R.H. BISHOP (2005), *Sistemas de control moderno*. Pearson Education.
- [5] J.M. ANGULO USATEGUI, A.ETXEARRIA RUIZ, I.ANGULO MARTÍNEZ, I.TRUEBA PARRA (2006). *DsPIC. Diseño práctico de aplicaciones*. McGraw Hill. Espanya.
- [6] DATA-SHEET SENSOR INDUCTIU SIEMENS 3RG4022.
http://www.electroson.com/documentos/D_3RG40220AG01_0_SIEMENS_3RG40220AG01_INDUCTIVO_PDF.pdf
- [7] DATA-SHEET MICROCONTROLADOR MICROCHIP DS30F4011.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70135C.pdf>
- [8] DATA-SHEET INTEGRAT INTERNATIONAL RECTIFIER IR2175.
<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2175.pdf>
- [9] DATA-SHEET MÒDUL DE POTENCIA FAIRCHILD FCAS50SN60.
http://81.233.9.161:800/_pdf/FC/FCAS50SN60.pdf
- [10] Guia d'usuari MPLAB X IDE V.2.30.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002027C.pdf>
- [11] Guia d'usuari MPASM, MPLINK i MPLIB.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/33014L.pdf>
- [12] Guia d'usuari MPLAB ICD3.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002081B.pdf>

- [13] J. Adams, Using the IR217x Linear Current Sensing ICs. Application Note AN-1052 (2003).

<http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1052.pdf>

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

CONTROL DE VELOCITAT PEL MOTOR DE RELUCTÀNCIA LINEAL DEL TREN TELMAG

Estudi econòmic

**MARC PRATS RÀFALES
PONENT: SALVADOR ALEPUZ**

PRIMAVERA 2015



TecnoCampus
Mataró-Maresme

Índex.

1. Viabilitat econòmica.	3
1.1. Pressupost.	3
1.1.1. Amidaments	4
1.1.2. Quadre de preus.....	4
1.1.3. Pressupost parcial.....	4
1.1.4. Pressupost global.....	6

1. Viabilitat econòmica.

Aquest projecte està enfocat a una part molt puntual del desenvolupament del prototip del tren Telmag, i per tant, és molt difícil quantificar quan aportarà al prototip final, ja que el prototip tindrà molts més mòduls de programació a nivell de software, a part de tenir també tot el hardware electrònic desenvolupat durant anys i la millora constant del disseny de la mecànica i del tren en successius prototips.

A nivell d'inversió només consisteix en pagar les hores de projectista en el desenvolupament del projecte i una petita provisió per si es fa malbé algun material o component durant l'execució d'aquest.

Així doncs, es pot afirmar que aquest projecte forma part del projecte de recerca i desenvolupament d'un model prototip a escala del tren no destinat encara a explotació comercial.

Per calcular la viabilitat econòmica del desenvolupament sencer del projecte de realitzar un tren Telmag a escala real (no del projecte realitzat en la present memòria), seria necessari saber quan costaria realitzar el primer prototip a escala real del tren, i quina previsió de demanda hi ha del tren, mitjançant la realització d'un estudi de mercat, per finalment calcular la rendibilitat del projecte.

Aquestes dades necessàries per realitzar l'estudi de viabilitat econòmica del projecte Telmag en global, que no del projecte actual, no s'han pogut aconseguir perquè de moment no s'ha realitzat l'estudi d'escalar el model prototip a mida real, ja que encara no s'ha finalitzat el desenvolupament a menor escala.

1.1. Pressupost.

El pressupost recull els costos directes d'enginyeria (hores de l'avantprojecte i del projecte de detall), els costos indirectes de l'elaboració del projecte i els costos d'amortitzacions dels equips de desenvolupament.

També incorpora els materials que s'han hagut de substituir perquè durant l'execució del projecte s'ha detectat que estaven malmesos.

1.1.1. Amidaments

Capítol I: Elaboració del projecte		
Codi	Descripció	Parts iguals
1.1	Hores de projectista destinades a la cerca d'antecedents i informació prèvia diversa	40
1.2	Hores de projectista destinades a l'estudi estudi previ del Hardware del prototip i d'alternatives	30
1.3	Hores de projectista destinades a familiarització de l'entorn de programació i microcontrolador	63
1.4	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de lectura de corrents	135
1.5	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de control de corrents	110
1.6	Hores de projectista destinades a la documentació de tots els documents del treball	150

1.1.2. Quadre de preus

Capítol I: Elaboració del projecte		
Codi	Descripció	Preu unitari (€)
1.1	Hores de projectista destinades a la cerca d'antecedents i informació prèvia diversa	25 €
1.2	Hores de projectista destinades a l'estudi estudi previ del Hardware del prototip i d'alternatives	25 €
1.3	Hores de projectista destinades a familiarització de l'entorn de programació i microcontrolador	25 €
1.4	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de lectura de corrents	25 €
1.5	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de control de corrents	25 €
1.6	Hores de projectista destinades a la documentació de tots els documents del treball	25 €

1.1.3. Pressupost parcial

Capítol I: Elaboració del projecte				
COST D'ENGINYERIA				
Codi	Descripció	Unitats totals	Preu unitari (€)	Import
1.1	Hores de projectista destinades a la cerca d'antecedents i informació prèvia diversa	40	25 €	1.000 €
1.2	Hores de projectista destinades a l'estudi estudi previ del Hardware del prototip i d'alternatives	30	25 €	750 €
1.3	Hores de projectista destinades a familiarització de l'entorn de programació i microcontrolador	63	25 €	1.575 €
1.4	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de lectura de corrents	135	25 €	3.375 €

1.5	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de control de corrents	110	25 €	2.750 €
1.6	Hores de projectista destinades a la documentació de tots els documents del treball	150	25 €	3.750 €
COSTOS INDIRECTES¹				
1.7	Costos indirectes de mà d'obra			2.640 €

¹ S'aplica un 20% de costos indirectes per provisió davant possibles desviacions a la planificació.

TOTAL CAPÍTOL I 15.840 €

Capítol II: Material				
COSTOS INDIRECTES²				
Codi	Descripció	Unitats totals	Preu unitari (€)	Import
2.1	74HC58	1	0,32	0,32 €
2.2	IR2175	2	6,31	12,62 €
TOTAL CAPÍTOL II		12,94 €		

Capítol III: Amortitzacions³				
EQUIPS INFORMÀTICS I SOFTWARE				
Codi	Descripció	Cost Inversió	N (anys)	€/any
1.1	Ordinador	800 €	3	133 €
1.2	MPLAB ICD 3 In-Circuit Debugger	350 €	3	58 €
1.3	MS Office	300 €	3	50 €

³ Les amortitzacions es calculen en previsió a la realització de dos projectes a l'any.

TOTAL CAPÍTOL III 242€

1.1.4. Pressupost global

TOTAL CAPÍTOL I	15.840,00 €
TOTAL CAPÍTOL II	12,94 €
TOTAL CAPÍTOL III	242,00 €
<hr/>	
TOTAL	16.094,94 €
<hr/>	
IVA (21%)	3379,93 €
<hr/>	
TOTAL PRESSUPOST	19.474,87 €

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA**

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

CONTROL DE VELOCITAT PEL MOTOR DE RELUCTÀNCIA LINEAL DEL TREN TELMAG

Avantprojecte

**MARC PRATS RÀFALES
PONENT: SALVADOR ALEPUZ MENENDEZ**

PRIMAVERA 2015



**TecnoCampus
Mataró-Maresme**

Índex.

Índex de figures.....	III
Índex de taules.....	V
Glossari de termes.	VII
1. Objecte.....	1
2. Antecedents i necessitats d'informació.....	3
2.1. Antecedents tècnics.....	3
2.1.1. Motor de reluctància variable.....	4
2.1.2. Modulació per ample de pols (PWM).....	5
2.1.3. Sistemes de control.....	6
2.2. Necessitats d'informació.....	6
3. Abast del projecte.....	9
4. Objectius i especificacions tècniques.....	11
4.1. Definició dels objectius del projecte.....	11
4.2. Especificacions tècniques. Descripció del Hardware.	11
4.2.1. Sensors de posició.	12
4.2.2. Circuit de control.....	13
4.2.3. Circuit de mesura de corrents.....	14
4.2.4. Circuit de potència.	15
5. Plantejament de possibles solucions.	17
5.1. Control de corrent per banda d'histèresis.	17
5.2. Control d'acció proporcional i integral (PI).....	18
5.3. Control d'acció PID.	20
6. Anàlisi Viabilitat	23
6.1. Viabilitat tècnica.	23
6.1.1. Eines de desenvolupament	23
6.2. Viabilitat econòmica.	23
6.3. Viabilitat mediambiental.....	24
6.4. Desenvolupament de la solució tècnica.	24
7. Planificació.....	29
8. Pressupost.....	33

8.1 Medicions	33
8.2 Quadre de preus	33
8.3 Pressupost parcial	34
9. Referències	37

Índex de figures.

Fig. 1.1. Representació evolució corrent sense sistema de control.....	1
Fig 2.1. Exemple màquina reluctància variable 4/2.....	4
Fig. 2.2. Sortida PWM que genera una Vmitjana.....	5
Fig. 4.1. Resposta característica del sensor inductiu 3RG4022.....	12
Fig. 4.1. Resposta característica del sensor inductiu 3RG4022.....	12
Fig. 4.2. Targeta de control (cortesia d'Innovem S.L.).....	14
Fig. 4.3. Targeta de mesura de corrents (cortesia d'Innovem S.L.).....	14
Fig. 4.4. Sortida de mesura de corrents del IR2175.....	15
Fig. 4.5. Esquema intern equivalent FCAS5SN60.....	16
Fig. 5.1. Exemple de funcionament de control de corrent per banda d'histèresis amb acció de control executada per modulació per ample de polsos (PWM).....	18
Fig. 5.2. Controlador d'acció proporcional + integral.....	19
Fig. 5.3. Controlador Proporcional-Integral-Derivatiu (PID).....	20
Fig. 6.1. Diagrama de blocs del mode de captura d'entrades ICx del microcontrolador.....	25
Fig. 6.2. Exemple entorn MPLAB X IDE.....	26
Fig 7.1. Llistat de tasques i dates de termini. Diagrama de Gantt.....	31
Fig. 7.2. Taula de costos.....	32

Índex de taules.

Taula 7.1. Taula d'activitats.....	30
Taula 8.1. Elaboració del projecte.....	33
Taula 8.2. Cost unitari de l'elaboració del projecte.....	33
Taula 8.3. Cost de l'elaboració del projecte.....	34
Taula 8.4. Cost total dels materials.....	34
Taula 8.5. Amortitzacions.....	35

Glossari de termes.

IGBT	Transistor bipolar de porta aïllada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
T	Parell
L	Inductància
PWM	Modulació de l'ample de pols (<i>Pulse Width Modulation</i>)
RAM	Memòria d'accés aleatori (<i>Random Acces Memory</i>)
EEPROM	ROM Programable i esborrable elèctricament (<i>Electrically Eresable Programmable Read-Only Memory</i>)
ADC	Convertidor analògic-digital (<i>Analog Digital Converter</i>)
MIPS	Milions d'instruccions per segon.
CPU	Unitat central de processament (<i>Central Processing Unit</i>)

1. Objecte.

El Telmag és un prototip de tren que té la singularitat d'utilitzar un motor de reluctància lineal com a mètode de propulsió.

Després de múltiples prototips està en una fase en la que a nivell electrònic, té tot el hardware necessari per implementar-hi un sistema de control de velocitat del tren, però no se li ha implementat encara. Actualment, per fer demostracions del tren en moviment i per protegir els drivers, l'única entrada de consigna que té el sistema de control és el cicle de treball de commutació dels drivers. Així doncs, el que es fa és limitar el cicle de treball dels drivers a consignes baixes constants per imposar-hi una freqüència mínima de commutació (obligant-los a commutar per no fer-los malbé) i garantir intensitats baixes de funcionament.

Les bobines del tren es magnetitzen quan el sensor de posició de tren respecte la via ho indica (hi ha un sensor per cada bobina) i deixen de fer-ho quan el sensor de posició deixa de detectar.

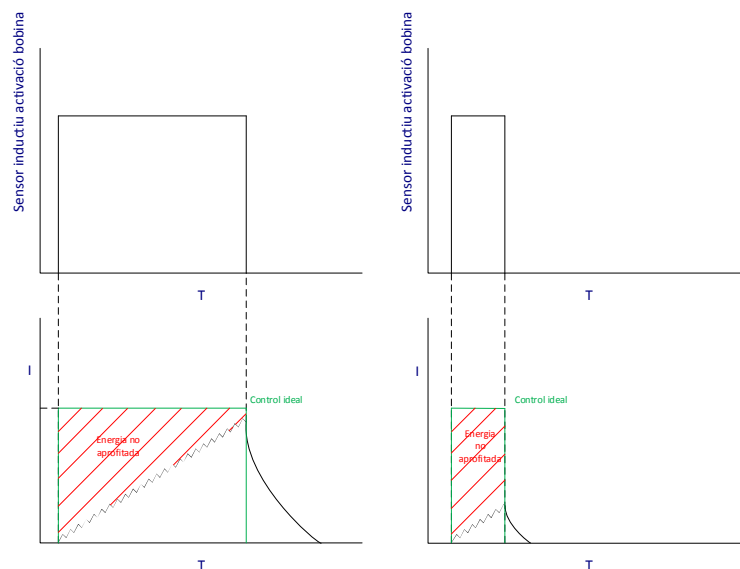


Fig 1.1. Representació evolució corrent sense sistema de control.

Com es pot veure a la representació del sistema actual, no s'aprofita la potencial energia de les bateries del tren, sobretot quan aquest circula a alta velocitat (temps d'activació dels sensors inductius inferior, cas dret).

En el present projecte es pretén realitzar la programació d'un mòdul de sistema de control de velocitat del motor de reluctància lineal del tren Telmag, aprofitant al màxim els recursos hardware ja instal·lats al prototip, mitjançant les senyals de modulació PWM d'un dsPIC 30F4011 per commutar els IGBT del circuit de potència.

Per realitzar-ho s'estudiarà primer el funcionament dels motors de reluctància variable. Un cop assimilats els conceptes d'aquest tipus de motor s'estudiarà el motor de reluctància lineal, en concret l'instal·lat al prototip del Telmag.

Un cop realitzat aquest punt, s'analitzarà el circuit de potència que integra el tren, format per drivers IGBT que permeten la commutació de corrent i, per tant, el control de velocitat del tren.

Posteriorment, s'analitzarà el circuit de control i el de lectura de corrents per poder realitzar la programació d'un mòdul per mesurar les corrents de les bobines del tren, fent tests amb instrumentació de laboratori i comparant amb les mesures realitzades per el microcontrolador per així calibrar-lo per la posterior programació del mòdul de control.

Seguidament es dissenyarà el mòdul de control, que haurà de reaccionar amb una resposta de control a una consigna d'intensitat desitjada. El mòdul de control haurà de crear una resposta de control que tingui una freqüència òptima per el treball dels drivers, garantint la resposta desitjada i vida útil d'aquests.

Finalment s'integrarà el mòdul de control a la resta de codi del microcontrolador per tenir la possibilitat, si es vol, de realitzar una prova dinàmica amb el tren en funcionament.

2. Antecedents i necessitats d'informació.

2.1. Antecedents tècnics.

“Controlador de velocidad para tren electromagnético” (Serra Mendoza, Ramón Alberto. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Mérida, 2000)

El projecte Telmag de l'empresa Innovem S.L. està ara mateix immers en un procés de patent, per tant l'empresa es reserva el dret a no publicar informació reservada. A nivell informatiu es pot comentar que el projecte consta de vuit prototips:

El primer prototip es va dissenyar l'any 1971 i consta d'un motor de reluctància rotatiu que interacciona amb una banda ferromagnètica.

L'any 1980, la Universitat de los Andes dissenya el primer prototip amb motor de reluctància lineal.

Quatre anys mes tard, el 1984, el tercer prototip incorpora importants millores en el sistema de control.

El prototip número quatre, dissenyat a l'any 1987 va ser presentat internacionalment a diverses exposicions. Incorpora un disseny de xassís més rígid i lleuger i un controlador electrònic més sofisticat.

A l'any 1991, es presenta el cinquè prototip, dotat per primer cop d'un sistema de control per microprocessador i redisseny complet del xassís del vehicle i dels rails.

A l'any 2005 es construeix una pista circular de 86 metres de longitud que permet millorar el sistema de control del motor de reluctància lineal perquè es poden fer proves a més velocitat.

Dos anys mes tard, al 2007, es realitza el setè prototip. En aquest prototip es redissenya completament el sistema de control i es realitzen millores a les vies i el disseny dels vehicles.

Actualment l'empresa amb la col·laboració de l'Escola Universitària Politècnica de Mataró esta en fase de desenvolupament del vuitè prototip.

2.1.1. Motor de reluctància variable.

Per entendre el motor de reluctància lineal emprat al projecte Telmag (que és part de la informació reservada de l'empresa Innovem), és necessari abans estudiar el seu precursor, és a dir el motor de reluctància variable rotatiu.

Els motors de reluctància variable o reluctància commutada rotatius son una de les màquines elèctriques més senzilles de construir. Consten d'un estator amb debanats d'excitació i un rotor magnètic sortint. No es necessiten conductors al rotor perquè el par es produeix per la tendència del rotor a alinear-se amb les ones de flux produïdes a l'estator, que intenten maximitzar els encadenaments de flux del propi estator produïts per la corrent aplicada sobre aquest.

El parell generat per una màquina de reluctància variable 4/2 ideal ve descrit per per l'expressió (2.1):

$$T = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2(\theta)}{d\theta} \quad (2.1)$$

És a dir, es té una expressió en la que el parell és funció de les derivades de la inductància de fase respecte la posició angular del rotor, cadascuna multiplicades per el quadrat de la corrent de fase corresponent [1].

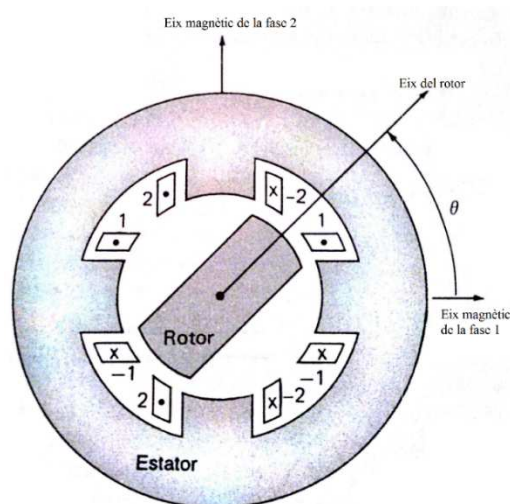


Fig 2.1. Exemple màquina reluctància variable 4/2.

Si s'enten θ com l'angle entre l'eix del rotor i l'eix magnètic de la fase 1, es pot observar com per generar un parell, les corrents de fase s'han d'aplicar en funció de la posició del

rotor. Així que en el funcionament de les màquines de reluctància variable és necessari algun tipus de control que determini tant la seqüència com la forma d'ona desitjada de les corrents de fase per aconseguir l'operació desitjada. Així doncs, el control d'aquest tipus de màquines elèctriques s'implementa normalment amb dispositius electrònics de commutació amb la supervisió d'un element controlador (base microprocessador) [2].

Un altre singularitat de les màquines de reluctància variable és la necessitat d'incorporar un sensor de posició del rotor, ja que és necessari conèixer la posició del rotor per controlar la sincronització i forma d'ona de l'excitació de fase.

2.1.2. Modulació per ample de pols (PWM)

La modulació PWM (Pulse-Width Modulation) d'un senyal o d'una font d'energia és una tècnica en la que es modifica el cicle de treball d'un senyal periòdic amb l'objectiu de transmetre informació a través d'un canal de comunicacions o per a controlar la quantitat d'energia que s'envia a una càrrega, com ara un motor elèctric [15].

Per definició, el cicle de treball d'un senyal periòdic (duty ratio) és la relació que existeix entre el temps que el senyal es troba en estat actiu (T_{ON}) i el seu període (T) (2.2). De manera que:

$$d = \frac{T_{ON}}{T} \quad (2.2)$$

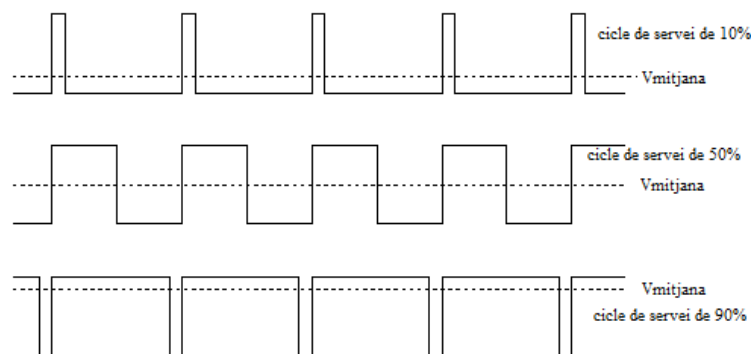


Fig. 2.2. Sortida PWM que genera una $V_{mitjana}$.

2.1.3. Sistemes de control.

L'objectiu de qualsevol estratègia de control és la de mantenir una variable que anomenem controlada, pròxima a un valor desitjat i conegut, anomenat consigna o "set-point". El terme regulació s'utilitza per descriure l'acció de control d'agents de pertorbació de l'estat d'equilibri d'una variable controlada. Un sistema de control, només pot arribar a la regulació, aplicant en oposició a les forces pertorbadores (o càrregues), correccions equivalents en una o més variables anomenades manipulades. La variable controlada romandrà estable en el procés quan estigui en estat estacionari [3].

Els sistemes de control clàssic es poden dividir en:

- Sistemes de control en llaç obert.

S'anomena sistema de control en llaç obert quan la sortida no té afecte sobre l'acció de control, és a dir, no es compara la sortida amb l'entrada de referència o consigna. Per tant, per cada entrada de consigna, correspon una condició d'operació fixe. La precisió del sistema depèn, per tant, del correcte calibratge i del operador que realitzi la funció de controlador.

- Sistemes en llaç tancat.

S'anomena sistema de control en llaç tancat quan davant la presència de pertorbacions, el sistema és capaç d'anar reduint la diferència entre la sortida del sistema i el valor desitjat de consigna, realitzant el control de forma automàtica utilitzant realimentació [4].

2.2. Necessitats d'informació.

Per realitzar aquest projecte serà necessari utilitzar les següents fonts d'informació:

- Documentació interna projecte Telmag de l'empresa Innovem (plànols, esquemes, codi programa, documents explicatius interns).
- Datasheets dels components que conformen el hardware del prototip (sensors inductius Siemens 3RG4022 [6], Microchip dsPIC 30F4011 [7], integrats IR2175 [8], FCAS50SN60 [9]...)

- Guia d'usuari v.2.25 de l'entorn de desenvolupament MPLAB X IDE [10], Guia d'usuari MPASM, MPLINK i MPLIB [11] i Guia d'usuari MPLAB ICD3 [12].
- Bibliografia [1], [2] sobre la teoria de control de màquines de reluctància variable.
- Bibliografia [3], [4] sobre sistemes de control i automatització.
- Bibliografia [5] o webs especialitzades en aplicacions dsPIC.

3. Abast del projecte.

S'ha definit l'abast del projecte de la següent manera:

- Primer, es realitzarà la programació d'un mòdul en el DSpic 30F4011 de lectura de corrents en del debanats de les bobines, que utilitzi com a entrada les senyals d'entrada l'electrònica provinent de la targeta de lectura de corrents ja instal·lada al prototip.
- Seguidament, es realitzarà un test al laboratori en buit, és a dir amb la targeta aïllada del tren, del mòdul de lectura de corrents dissenyat anteriorment per validar tant la programació del mòdul com l'electrònica de l'equip. Es realitzarà una calibratge per software, si és necessari, per assegurar la correcta lectura de corrents dels debanats de les bobines.
- Després es realitzarà la programació d'un mòdul de control per a una sola bobina, que utilitzi com a consigna una corrent desitjada i que apliqui una retroalimentació d'aquesta al llaç de control.
- Es realitzarà tests al laboratori en buit, és a dir amb la targeta aïllada del tren, per ajustar la programació del mòdul programat en el punt anterior fins obtenir una resposta satisfactòria a les 5 bobines que disposa el tren.
- Un cop realitzat això es realitzarà l'adaptació del mòdul de control perquè treballi amb totes les bobines alhora.
- Finalment s'integrarà el mòdul de control dissenyat amb la resta de rutina de programa del microcontrolador, per realitzar si es vol i si hi ha disponibilitat de material, una prova dinàmica amb el tren en funcionament.

En el projecte no es realitzaran determinades accions, que són les següents:

- No es realitzaran modificacions en el hardware del prototip.
- No es realitzarà el codi necessari per preparar el microcontrolador durant els tests a laboratori, aquests seran facilitats per l'empresa Innovem ja que disposa de software preparat per realitzar proves on l'únic que falta és el mòdul de control de velocitat i de mesura de corrents.
- No es programaran altres blocs de programa com per exemple els de comunicacions amb perifèrics o els essencials per el funcionament general del microcontrolador.

- No es realitzarà un test del mòdul de control 'en línia', és a dir llegint les corrents de les bobines amb el tren en funcionament, perquè donada l'arquitectura del motor de reluctància lineal no es pot mesurar aquestes corrents quan el tren està en marxa actualment.

4. Objectius i especificacions tècniques.

4.1. Definició dels objectius del projecte.

Els objectius a assolir en aquest projecte son els descrits a continuació.

- En primer lloc, es dissenyarà un mòdul de programació utilitzant el software MPLAB X IDE al microcontrolador que garanteixi la possibilitat de mesurar les corrents dels debanats de les bobines, mitjançant com a instrumentació els propis circuit de lectura de corrents que incorpora el prototip del tren. Les proves d'aquest mòdul es realitzaran en estàtic amb la targeta aïllada del tren i comparant les mesures realitzades per el microcontrolador amb les que ens pot donar els aparells d'instrumentació de laboratori, com un oscil·loscopi o amperímetre. És imprescindible validar el correcte funcionament d'aquest mòdul de programació i de l'electrònica del prototip abans de realitzar la programació del mòdul de control.
- Tot seguit es realitzarà la programació del mòdul de control de velocitat del tren. Aquest mòdul de control haurà de respondre a una consigna d'intensitat desitjada, fent actuar els drivers IGBT del tren per crear un sistema de llaç tancat, que aplicant la retroalimentació amb la pròpia mesura constant de la corrent de la bobina, sigui capaç d'optimitzar el temps de pujada de la corrent fins arribar a la consigna desitjada, sempre mantenint un comportament estable i treballant en freqüències de commutació acceptables per els drivers IGBT que incorpora el tren.
- Finalment s'integrarà el mòdul de control de velocitat programat al programa que incorpora actualment el prototip.

4.2. Especificacions tècniques. Descripció del Hardware.

Les especificacions tècniques d'aquest projecte van lligades al hardware facilitat per l'empresa Innovem, donat que per efectuar la programació del mòdul de control serà necessari conèixer les eines de les quals es disposa i les limitacions dels components. A continuació es presenta de manera resumida una descripció de l'electrònica que està relacionada amb el projecte. La documentació tècnica de cada integrat o component

s'adjunta als annexos del treball. El Hardware del que es disposa per a la realització del projecte és pot resumir a grans trets en:

- Sensors de posició.
- Circuit de control.
- Circuit de mesura de corrent.
- Circuit de potència.

4.2.1. Sensors de posició.

Per mesurar la posició del vehicle respecte la via s'utilitzen cinc sensors inductius de l'empresa Siemens, model 3RG4022.

El sensor està dimensionat per detectar metalls a una distància no superior a 4 mm. En l'instant en que el sensor es situa sobre un pol ferromagnètic de la via, la seva sortida puja a nivell alt (+15V) i deixa d'estar-ho (0 V) quan el sensor deixa de detectar el pol ferromagnètic [6].

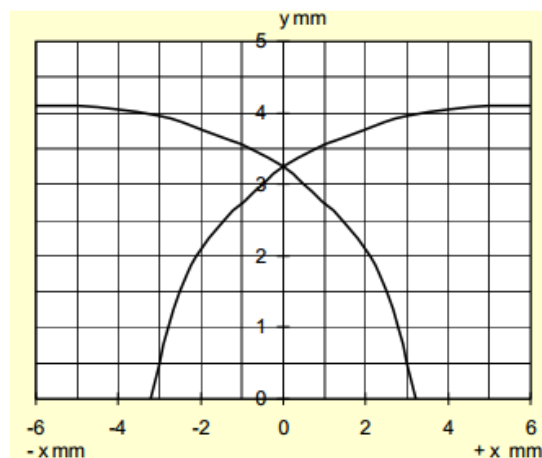


Fig. 4.1. Resposta característica del sensor inductiu 3RG4022.

Per la disposició física dels sensors, sempre hi ha un dels cinc que està detectant la presència d'un pol ferromagnètic de la via. De fet en moments de transició es produeix solapament durant aproximadament un 20% del cicle de detecció, en la qual es detecten dos sensors alhora.

4.2.2. Circuit de control.

El cervell del circuit de control és un microcontrolador de l'empresa Microchip model dsPIC 30F4011, que està configurat amb la configuració bàsica, només treballant amb la memòria interna del dispositiu i un cristall de quars de 6 Mhz.

Les característiques principals d'aquest microcontrolador relacionades directe o indirectament amb el projecte a realitzar son [7]:

- 48 Kbytes de memòria de programa Flash
- Memòria RAM de 2048 Bytes
- Memòria EEPROM de dades de 1024 Bytes.
- Velocitat de CPU de fins a 30 MIPS
- 30 fonts d'interruptió, de les quals 3 externes. Fins 8 nivells de selecció de prioritat per cada font d'interruptió.
- Multiplicador de nombres sencers i fraccionaris per hardware de 17 bits x 17 bits en un sol cicle d'instruccions.
- 6 canals PWM.
- 5 temporitzadors de 16 bits (configurables fins a 32 bits).
- ADC de 10 bits amb 9 canals d'entrada.
- Desplaçament de 16 bits en un sol cicle de scan.
- Flexible Watchdog Timer (WDT).
- Possibilitat de programació mitjançant tecnologia ICSP (In-circuit serial programming) mitjançant port RJ11.
- Voltatge d'operació de +2,5 V a 5,5V.

A part de l'esmentat microcontrolador el circuit de la targeta de control (annex 4.1) incorpora dos integrats més, un MCP2551 i un 74HC58; el primer es un transductor per la capa física de la xarxa CAN, que en principi no s'utilitzarà en aquest projecte, i el segon és un integrat de comporta AND-OR dual, que s'utilitza per multiplexar 4 de les 5 senyals de les mesures de corrents, ja que el microcontrolador només disposa de 3 entrades de polsos. A nivell de entrades i sortides, la targeta de control disposa del següent:

- Polsador de reset.
- 5 leds de color verd per definir l'estat de les sortides.

- 1 led de color vermell per indicar un error o advertència.
- Connector ICSP (RJ11) per programació del microcontrolador des de l'ordinador.
- 11 Test Points, per monitoritzar senyals de control dels drivers de potència.
- Interruptor d'ús general configurable per software.
- 2 connectors RJ45 per xarxa CAN.
- 1 Connector d'alimentació a +5V, per alimentar la targeta durant les proves.

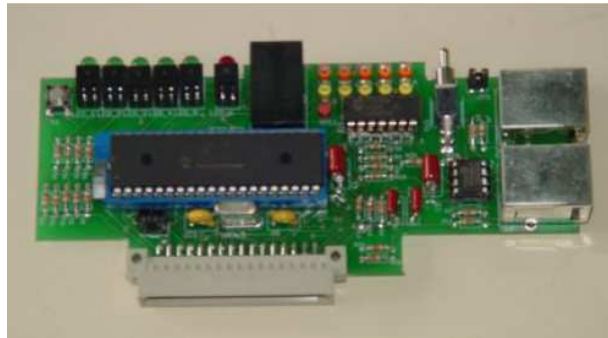


Fig. 4.2. Targeta de control (cortesia d'Innovem S.L.)

4.2.3. Circuit de mesura de corrents.

El circuit de mesura de corrents (annex 4.2) s'utilitza per mesurar les corrents en els debanats de les cinc fases (bobines) del motor de reluctància lineal. Aquest circuit és indispensable per poder controlar la potència i forma d'ona quan es realitzi l'estratègia de control.



Fig. 4.3. Targeta de mesura de corrents (cortesia d'Innovem S.L.)

El circuit està format per cinc integrats de International Rectifier IR2175, que permeten mesurar corrents a las fases, garantint també l'aïllament de la potència amb el circuit de control. La sortida d'aquest integrat és un tren de polsos d'aproximadament 130 kHz, en al qual el cycle de servei es funció de la corrent mesurada [8].

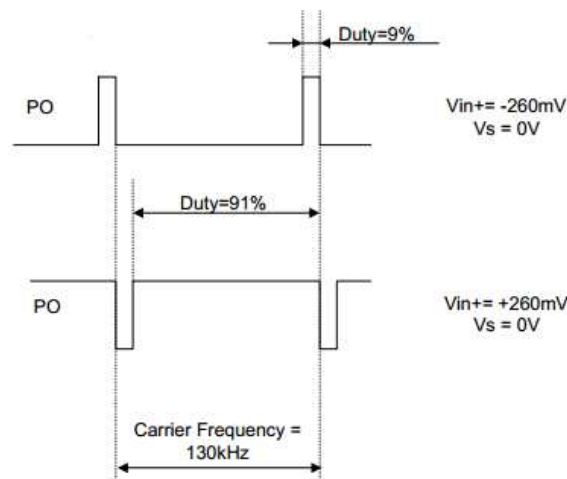


Fig. 4.4. Sortida de mesura de corrents del IR2175.

Aquests cinc trens de polsos que contenen la informació de la intensitat mesurada es connecten (després de ser multiplexats en el circuit de control) a tres entrades del microcontrolador, més concretament la IC2, IC7 i IC8.

El circuit també incorpora una resistència Shunt de $0,01\ \Omega$ i $3\ \text{W}$ connectada en sèrie amb els connectors de les bobines. Quan el circuit detecta que sobre la resistència Shunt hi cau una tensió superior a $250\ \text{mV}$ ($25\ \text{A}$ a les bobines), s'activa per hardware un protecció que envia una senyal als drivers per deshabilitar-los.

La targeta de mesura de corrents disposa de 8 Test Points per analitzar tensions i trens de polsos durant les proves.

4.2.4. Circuit de potència.

El circuit de potència (annex 4.3) és l'encarregat d'alimentar la corrent que circula per les bobines del motor de reluctància lineal.

Bàsicament està format per cinc encapsulats FCAS50SN60 de l'empresa Fairchild. Aquest dispositiu està format bàsicament per dos transistor IGBT, dos díodes de protecció i un control de porta flotant [9].

Aquest driver és alimentat directament a $160\ \text{V}$, però necessita $15\ \text{V}$ per alimentar els mòduls de control. Amb la implementació d'aquest integrat s'assegura l'absoluta separació entre la potència i el control.

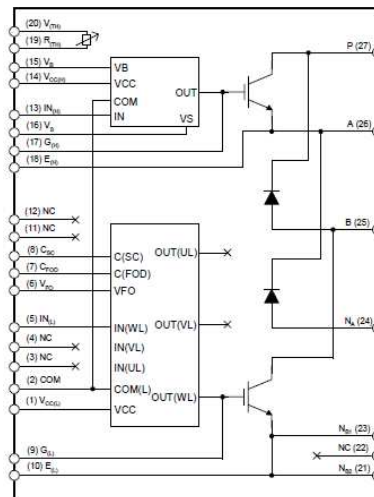


Fig 4.5. Esquema intern equivalent FCAS5SN60.

La targeta de potència té a part del circuit de potència, la font d'alimentació, els connectors que alimenten les targetes de control i de mesura de corrent; i finalment tots els connectors necessaris per connectar-hi: les bobines, l'alimentació, els sensors de posició i els termistors de les bobines.

5. Plantejament de possibles solucions.

Donat que aquest projecte està enfocat al disseny d'un mòdul de control, utilitzant la programació del microcontrolador incorporat, les possibles alternatives de solució s'enfoquen a la decisió del disseny del sistema de control.

Independentment del sistema de control emprat, l'acció de control s'implementarà mitjançant senyals de modulació per ample de polsos (PWM), per excitar els IGBT del circuit de potència, ja que tot el hardware del prototip ha estat concebut amb tal fi.

Un cop estudiat el hardware disponible al prototip es descarten els sistemes en llaç obert, perquè no permet un control precís. A més, aquest tipus de controls són difícilment aplicables a un motor de reluctància variable atès que les inductàncies dels debanats de fase canvien tant amb la posició dels pols ferromagnètics com amb els nivells de les corrents (degut als efectes de saturació en el material magnètic). En definitiva, en general no és possible realitzar un control eficient de velocitat en un motor de reluctància variable amb un algoritme precalculat i resulta invariable en el temps sense retroalimentació.

Per tant, enfocant el projecte al desenvolupament d'un sistema de control en llaç tancat es plantegen a continuació les possibles alternatives d'accions de control.

5.1. Control de corrent per banda d'histèresis.

El control de corrent per banda d'histèresis es pot considerar també de llaç tancat, perquè s'utilitza el propi corrent per avaluar cada cert temps de mostreig, si aquesta està definida dins d'una banda d'histèresis pre-configurada, i actua canviant el temps de cicle dels drivers per aconseguir la resposta desitjada.

És un control senzill, on tot el càlcul de l'algoritme (excepte el de la mesura de l'error) es realitza només davant un canvi de consigna. És necessari establir un rang de banda d'histèresis (que és funció de la variable consigna, com pot ser per exemple un percentatge) el més afinat possible.

Estudiant el comportament de les bobines excitées a un cicle de servei fix a nivell estacionari es pot veure per cada corrent quin és el temps el cicle de servei òptim per mantenir la variable dins la banda d'histèresis.

Després durant la pujada es pot estudiar si realitzar una commutació fixa amb un temps de cycle alt, o realitzar iteracions en les quals els temps de cycle es modifiqués, d'un nivell alt al començament a un nivell moderat posterior, per evitar un excessiu sobreimpuls quan finalment la corrent entra dins la banda d'histèresis.

En definitiva, es un tipus de control de corrent que a nivell de programació i de recursos del microcontrolador, no és complicat de realitzar, però es necessari realitzar moltes proves experimentals per veure el comportament de les corrents en funció del cycle de servei dels IGBT.

De fet, realitzar un primer control per banda d'histèresis pot ser útil igualment encara que no s'implementi, perquè pot ajudar a adquirir conceptes de com reacciona les corrents de les bobines davant la sortida en PWM.

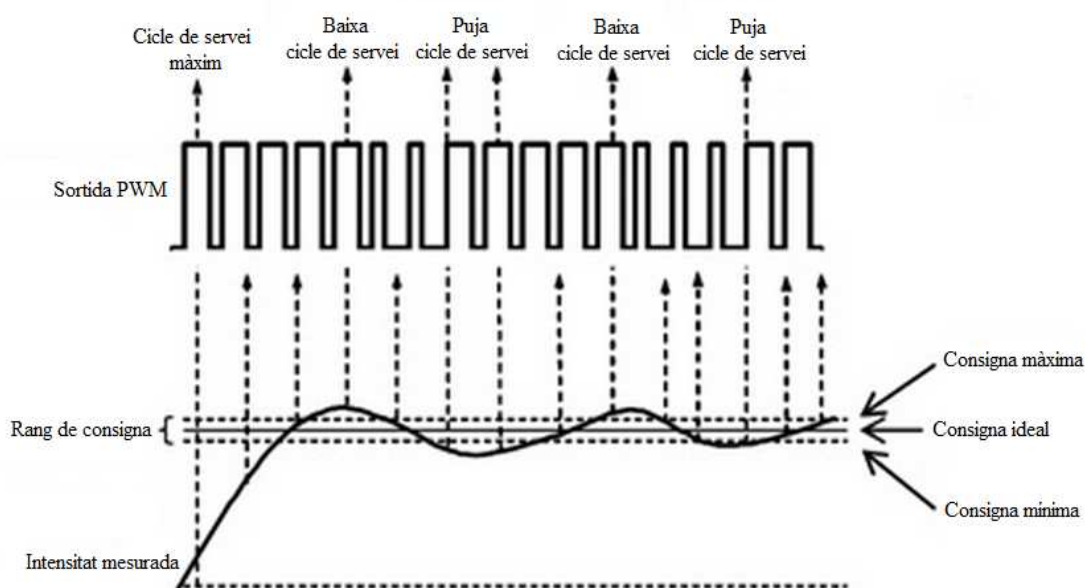


Fig. 5.1. Exemple de funcionament de control de corrent per banda d'histèresis amb acció de control executada per modulació per ample de polsos (PWM).

5.2. Control d'acció proporcional i integral (PI).

El control basat en una acció integral (I) té una senyal de sortida que varia en funció de la desviació i del temps en que es manté en aquesta, dit d'un altre manera el valor de l'acció de control es proporcional a l'integral de la senyal d'error. Això implica que, a diferència d'un control purament proporcional, en aquest tipus de control, l'acció de control varia segons la desviació de la sortida i el temps durant el qual es manté.

Si es defineix $y(t)$ com la senyal de sortida (sortida del controlador) i $e(t)$ la senyal d'error (entrada al regulador), en un control integral la funció de transferència del bloc controlador quedarà definida per l'equació (5.1):

$$\frac{Y(S)}{E(S)} = \frac{Ki}{s} \quad (5.1)$$

On:

- $Y(S)$ és la sortida del regulador o controlador en el domini de Laplace.
- $E(S)$ és la senyal d'error en el domini de Laplace.
- Ki es el pendent de la rampa d'acció integral, el que implica que la velocitat de resposta del sistema de control dependrà del valor de Ki .

El principal problema del controlador (I) és que es un controlador lent. La resposta inicial es lenta, i fins passat un temps el controlador no comença a ser efectiu. No obstant, el controlador (I) elimina l'error romanent o d'offset, que produeix un controlador proporcional.

A la pràctica no existeixen els controladors que només tinguin acció integral sinó que es combina una acció integral amb una acció proporcional (PI). Aquestes dues accions es complementen, ja que la primera en actuar es l'acció proporcional (que ho fa idealment de manera instantània), mentre que l'acció integral actua durant un interval de temps. Així doncs, mitjançant l'acció integral s'elimina la desviació romanent provinent de l'acció proporcional.

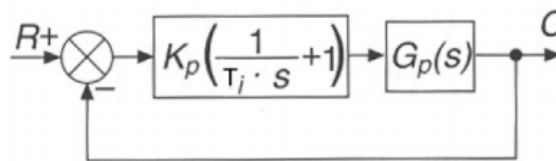


Fig. 5.2. Controlador d'acció proporcional + integral

Per tant la funció de transferència d'un bloc de control PI és (5.2):

$$\frac{Y(S)}{E(S)} = Kp * \left(1 + \frac{1}{Ti * s}\right) \quad (5.2)$$

On:

- $Y(S)$ es la sortida del controlador en el domini de Laplace.
- $E(S)$ és la senyal d'error en el domini de Laplace.
- K_p es el guany del bloc de control.

T_i es el temps integral i controla per tant l'acció integral del sistema.

5.3. Control d'acció PID.

Aquest tipus de controlador aprofita les característiques del regulador esmentat anteriorment (PI), afegint l'acció derivativa. de manera que si la senyal d'error varia lentament en el temps, predomina l'acció proporcional i integral, mentre que si la senyal d'error varia ràpidament, predomina l'acció derivativa. Té l'avantatge de tenir una resposta més ràpida i una compensació immediata de la senyal d'error en cas de canvis o pertorbacions. Les principals desavantatges d'aquest tipus de controlador és que el bucle de regulació tendeix a oscil·lar més i és més difícil d'ajustar.

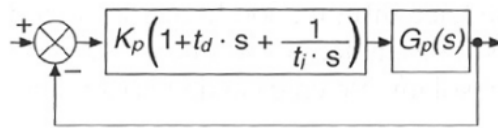


Fig. 5.3. Controlador Proporcional-Integral-Derivatiu (PID)

La funció de transferència d'aquest controlador és (5.3):

$$\frac{Y(S)}{E(S)} = K_p * \left(1 + T_d * S + \frac{1}{T_i} * s \right) \quad (5.3)$$

On:

- $Y(S)$ és la sortida del controlador en el domini de Laplace.
- $E(S)$ és la senyal d'error en el domini de Laplace.
- K_p és el guany del bloc de control.
- T_d és el temps derivatiu, que controla l'acció derivativa del sistema.
- T_i és el temps integral i controla l'acció integral del sistema.

Quan hi ha un canvi de consigna, en una maniobra normal, l'acció de control predominant en el sistema és la proporcional, que aproximarà la direcció al punt desitjat de forma més o

menys precisa. Un cop la direcció està a prop del punt desitjat, començarà a actuar l'acció integral que eliminarà el possible error produït per el control proporcional, fins a posicionar-se en el punt desitjat. Si la maniobra es lenta, l'acció derivativa no té quasi efecte. Si la maniobra requereix major velocitat d'actuació, l'acció de control derivativa adquirirà major importància, augmentant la velocitat de resposta inicial del sistema perquè actuï posteriorment l'acció proporcional i finalment l'integral. Si la maniobra és molt extrema, el control derivatiu tindrà màxima rellevància, fent que quedi quasi sense efecte l'acció proporcional i integral, el que pot provocar poca precisió a la maniobra i es pot traduir en inestabilitat en el sistema.

6. Anàlisi Viabilitat

6.1. Viabilitat tècnica.

Com s'ha explicat anteriorment, aquest projecte es defineix per la programació del software d'un microcontrolador per realitzar un mòdul de control. Tot el hardware del que es disposa, ha estat dissenyat i comprovat per l'empresa Innovem, durant successius prototips tal i com s'explica a la secció d'antecedents.

A més, existeixen també antecedents de programació de mòduls de control de velocitat al propi prototip, en els quals es va comprovar amb èxit el bon funcionament del prototip.

En definitiva, es considera que per la naturalesa del projecte i el hardware disponible, el projecte es viable tècnicament.

6.1.1. Eines de desenvolupament

A continuació es presenten amb detall les eines de desenvolupament que hauran de ser emprades en el projecte de treball.

- MPLAB X IDE v.2.30: editor IDE gratuït distribuït per l'empresa MicroChip per a programació dels seus microcontroladors
- MPLAB ICD3: In Circuit Debugger per microcontroladors Microchip és un dels recursos mes populars com a programador/depurador. S'integra molt bé amb el software MAPLAB X IDE.
- Microsoft Office Word: editor de textos per realitzar la memòria del projecte.
- Microsoft Office Excel: software de fulla de càlculs, s'utilitzarà per realitzar gràfics, càlculs..
- Microsoft Office Project: indispensable per la realització de la planificació del projecte.

6.2. Viabilitat econòmica.

Aquest projecte està enfocat a una part molt puntual del desenvolupament del prototip del tren Telmag, i per tant, és molt difícil quantificar quan aportarà al prototip final, ja que el prototip tindrà molts mes mòduls de programació a nivell de software, a part de tenir també tot el hardware electrònic desenvolupat durant anys i la millora constant del disseny de la mecànica i del tren en successius prototips.

A nivell d'inversió només consistirà en pagar les hores de projectista en el desenvolupament del projecte i una petita provisió per si es fa malbé algun material o component durant l'execució d'aquest. S'adjunta al punt 7 el pressupost del projecte.

Així doncs, es pot afirmar que aquest projecte forma part del projecte de recerca i desenvolupament d'un model prototip a escala del tren no destinat encara a explotació comercial.

Per calcular la viabilitat econòmica del desenvolupament sencer del projecte de realitzar un tren Telmag a escala real (no del projecte realitzat en la present memòria), seria necessari saber quan costaria realitzar el primer prototip a escala real del tren, i quina previsió de demanda hi ha del tren, mitjançant la realització d'un estudi de mercat, per finalment calcular la rendibilitat del projecte.

Aquestes dades necessàries per realitzar l'estudi de viabilitat econòmica del projecte Telmag en global, que no del projecte actual, no s'han pogut aconseguir perquè de moment no s'ha realitzat l'estudi d'escalar el model prototip a mida real, ja que encara no s'ha finalitzat el desenvolupament a menor escala.

6.3. Viabilitat mediambiental.

Per la realització de la viabilitat mediambiental s'ha realitzat una metodologia de llistes de control (annex 6.1) basada en la Directiva 97/11/CEE per l'avaluació de les repercussions de determinats projectes públics i privats sobre el medi ambient, aplicada a les diferents fases del projecte.

Un cop realitzada l'avaluació d'impacte mediambiental es conclou que el projecte no presenta riscos mediambientals perquè està centrat a la programació d'un software d'un model a escala.

6.4. Desenvolupament de la solució tècnica.

La solució final del projecte consisteix en realitzar la programació d'un bloc de control al software del dsPIC30F4011 que controli la intensitat als debanats de les fases del motor de reluctància lineal instal·lat al tren.

S'utilitzarà les senyals dels IR2175 (que dona una sortida d'un tren de polsos de 130 kHz, on el cicle de treball és funció de la intensitat mesurada), connectades a les entrades del

microcontrolador IC2, IC7 i IC8 per mesurar les corrents dels debanats, podent així crear la retroalimentació per el llaç de control. Aquestes entrades del microcontrolador ja tenen una arquitectura que facilita i permet la lectura de polsos, freqüència o períodes.

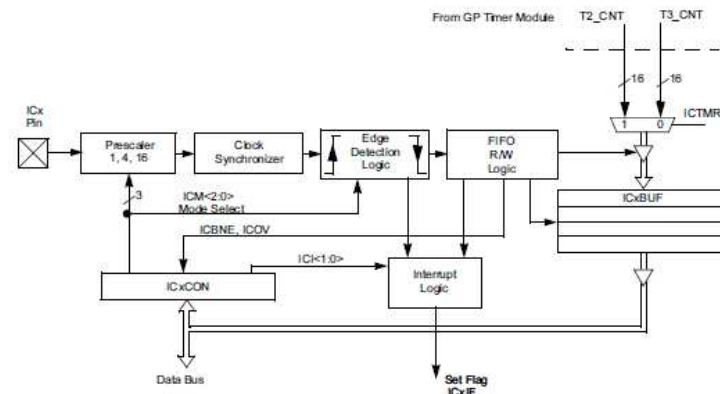


Fig. 6.1. Diagrama de blocs del mode de captura d'entrades ICx del microcontrolador.

L'algoritme de control del microcontrolador es realitzarà utilitzant una de les alternatives mostrades a l'apartat 5 d'aquest document. Per definir quina alternativa s'utilitzarà, és necessari veure primer quan robusta serà la targeta de mesura de corrents i veure com reacciona la planta davant pertorbacions. També serà necessari definir quan ràpid ha de ser el model estudiant l'evolució de les corrents del motor. En definitiva, l'elecció de l'algoritme de control es realitzarà un cop dissenyat i programat el mòdul de mesura de corrents, quan es puguin treure dades de com reacciona el model o planta reals.

L'acció de control del microcontrolador és realitzarà mitjançant senyals de modulació per ample de polsos (PWM), ja que la potència del prototip està dissenyada amb drivers IGBT. Així doncs el controlador modificarà el cicle de treball dels IGBT seguint una lògica de control per aproximar la senyal mesurada a la senyal de consigna desitjada.

El desenvolupament de la solució tècnica constarà de les següents fases:

1. Familiarització amb dsPIC30F4011 i entorn de programació MPLAB X IDE.

En aquest punt inicial del projecte s'estudiarà en profunditat l'entorn de programació MPLAB X IDE i les eines que ofereix. Es realitzarà també la primera configuració per poder connectar-se a la targeta de control. Finalment es realitzarà un primer algoritme per controlar els LEDs de la targeta de control i familiaritzar-se també amb el MPLAB ICD3.

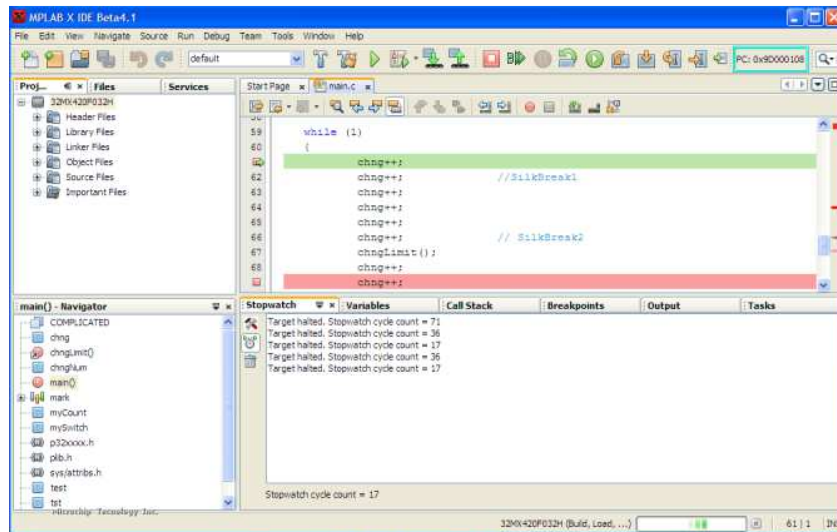


Fig. 6.2. Exemple entorn MPLAB X IDE

2. Programació mòdul mesura de corrents

En aquest punt es realitzarà un estudi del circuit de mesura de corrents i de l'arquitectura del microcontrolador, per dissenyar el mòdul de programació capaç de llegir les corrents als debanats de les bobines.

Serà necessari definir una freqüència de mostreig que no comprometi els recursos hardware del microcontrolador, però que sigui suficient per després poder realitzar el control de corrent en una fase superior.

Es compararan els resultats que ens mostra el microcontrolador de corrent llegida amb instrumentació de laboratori, utilitzant els Test Points disponibles a l'electrònica del prototip.

3. Programació mòdul de control d'intensitat d'una bobina.

En aquesta fase es dissenyarà el primer mòdul de control. L'objectiu es que utilitzant la retroalimentació que vindrà donada per la informació del mòdul de mesura de corrents, s'estableixi un llaç de control a la corrent d'una bobina del motor. En aquesta fase serà necessari, al màxim possible, simular les condicions que tindrà la bobina en règim dinàmic, quan el tren estigui en funcionament. És a dir, s'intentarà reproduir el control simulant la mateixa freqüència d'activació i desactivació dels sensors inductius que marquen la presència dels pols ferromagnètics de la via, quan el tren va a velocitat lenta, a velocitat moderada i a velocitat ràpida.

4. Adaptació del mòdul de control a les 5 bobines.

Un cop dissenyat el mòdul de control per una bobina, serà necessari realitzar l'adaptació de l'algoritme a les cinc bobines de les que disposa el tren. El fet de que hi hagi un solapament d'aproximadament un 20% en el que coincideixen dos sensors inductius detectant el mateix pol ferromagnètic de la via, complica la solució. S'estudiarà si realitzar un algorisme amb clàusules de decisió que estructurin i condicionin el programa o cinc algorismes diferents, un per cada bobina.

5. Integració del mòdul de control al software del prototip.

Aquesta és la fase final del projecte. Consisteix en integrar el mòdul de control dissenyat amb la resta de programa del prototip.

7. Planificació.

Per fer la planificació del projecte de detall, mitjançant el Microsoft Project, s'han hagut de definir totes les tasques que es realitzaran i establir les precedències entre elles, a més d'assignar a les activitats els recursos corresponents.

La planificació s'ha dividit en quatre grans blocs:

- Familiarització entorn de programació i microcontrolador.
 - Estudi en profunditat de l'entorn MPLAB X IDE
 - Realització de la primera configuració per realitzar proves.
 - Elaboració del primer programa (Encendre un LED) i familiarització amb ICD3.
- Programació mòdul de lectura de corrents.
 - Estudi especificacions circuit de lectura corrents i arquitectura d'entrades microcontrolador.
 - Realització de disseny i càlculs necessaris per afrontar la programació mòdul lectura de corrents.
 - Programació mòdul lectura de corrents.
 - Validació mòdul de lectura de corrents amb instrumentació de laboratori.
- Programació mòdul de control de corrents
 - Estudi especificacions drivers de potència i arquitectura de sortida PWM del microcontrolador.
 - Realització primer mòdul de programació que activi una bobina en funció del temps de cicle desitjat.
 - Estudi alternatives mòdul de control estudiant el model experimental.
 - Disseny i elaboració mòdul de control de corrent per una bobina.
 - Validació i sintonització mòdul de control per una bobina.
 - Adaptació mòdul de control a les 6 bobines.
 - Integració mòdul de control a la resta del software del microcontrolador.
- Elaboració escrita i edició dels documents del projecte.
 - Edició i redacció final de tots els documents del projecte

Per poder dur a terme aquest seguit de tasques en la programació indicada en el diagrama de GANTT, s'ha establert una jornada laboral de:

- Dilluns a divendres: 16:00h a 20:00h
- Dissabtes: 15:00h a 20:00h
- Diumenges: 15:00 a 19.00h

A partir del 03/05/2015, es treballa diumenges de 13.00h a 19.00h per agilitzar la documentació del projecte.

A continuació, es mostra la taula amb les activitats o tasques a fer en el projecte de detall, indicant la relació de precedència entre elles i la durada de cadascuna de les activitats.

	Codi	Activitat	Activitat predecesora	Durada (h)
Familiarització entorn programació i microcontrolador	A	Estudi en profunditat de l'entorn MPLAB X IDE	-	30
	B	Realització de la primera configuració per realitzar proves.	A	8
	C	Elaboració del primer programa (Encendre un LED) i familiarització amb ICD3	B	5
Programació mòdul de lectura de corrents	D	Estudi especificacions circuit de lectura corrents i arquitectura d'entrades microcontrolador	C	10
	E	Realització de disseny i càlculs necessaris per afrontar la programació mòdul lectura de corrents.	D	10
	F	Programació mòdul lectura de corrents	E	40
	G	Validació mòdul de lectura de corrents amb instrumentació de laboratori.	F	25
Programació mòdul de control de corrents	H	Estudi especificacions drivers de potència i arquitectura de sortida PWM del microcontrolador.	G	15
	I	Realització primer mòdul de programació que activi una bobina en funció del temps de cicle desitjat.	H	25
	J	Estudi alternatives mòdul de control estudiant el model experimental.	I	20
	K	Disseny i elaboració mòdul de control de corrent per una bobina.	J	40
	L	Validació i sintonització mòdul de control per una bobina.	K	25
	M	Adaptació mòdul de control a les 6 bobines.	L	20
Redacció	N	Integració mòdul de control a la resta del software del microcontrolador.	M	15
	O	Edició i redacció final de tots els documents del projecte	N	120

Taula 7.1. Taula d'activitats

S'utilitza el software Microsoft Project per realitzar la planificació del projecte. A continuació es presenta diagrama de Gantt.

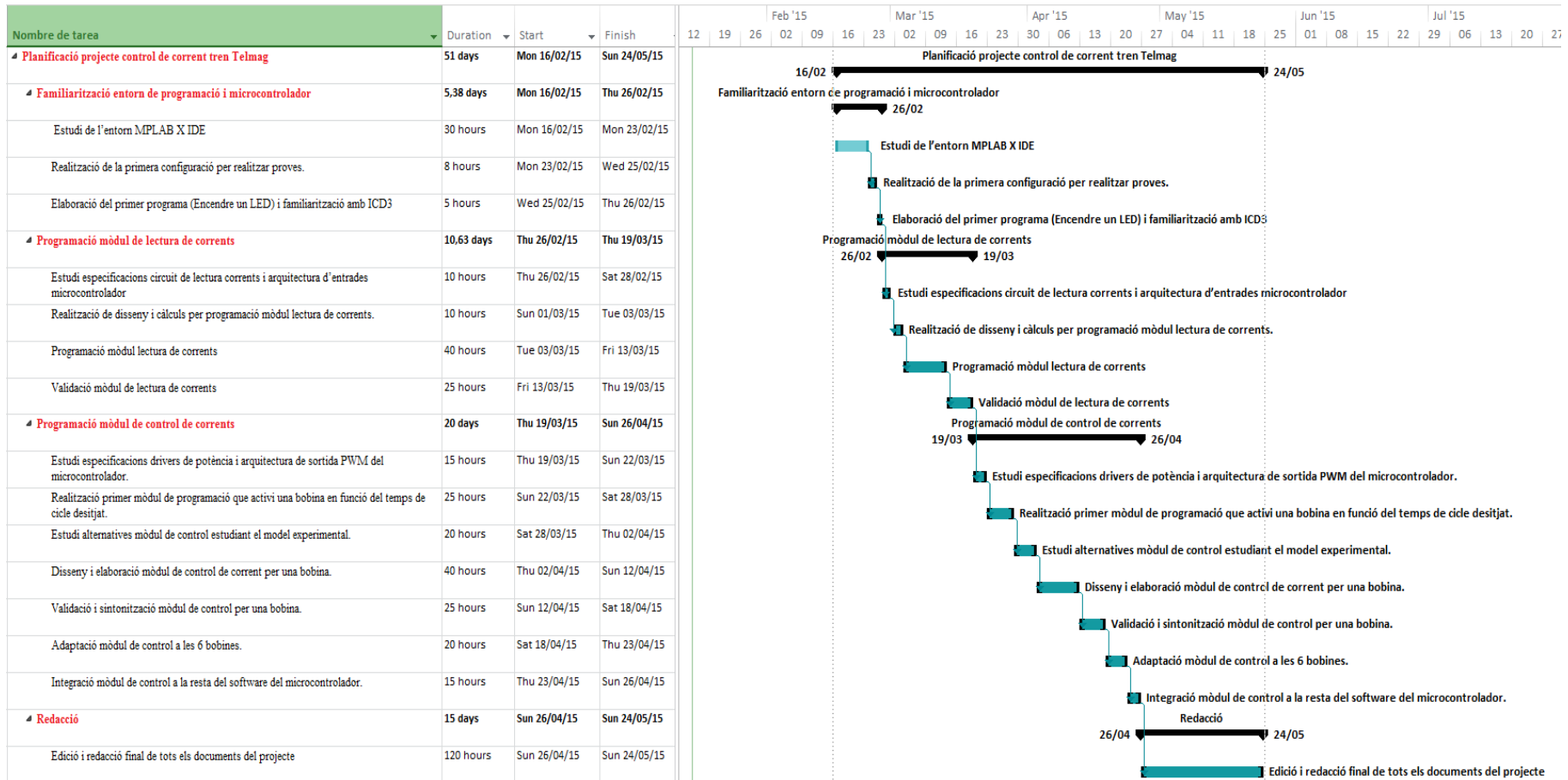


Fig. 7.1. Llistat de tasques i dates de termini. Diagrama de Gantt.

Com es pot observar els costos directes estimats a la planificació del projecte sumen la quantitat de 10.200€. S'estima una càrrega de treball de 408 hores per l'execució del projecte de detall, a raó de 25€/h:

Nombre de tarea	Costo fijo	Acumulación de costos fijos	Costo total	Previsto	Variación	Real	Restante
Estudi de l'entorn MPLAB X IDE	0,00 €	Promateo	750,00 €	0,00 €	750,00 €	0,00 €	750,00 €
Realització de la primera configur	0,00 €	Promateo	200,00 €	0,00 €	200,00 €	0,00 €	200,00 €
Elaboració del primer programa (E	0,00 €	Promateo	125,00 €	0,00 €	125,00 €	0,00 €	125,00 €
Estudi especificacions circuit de la	0,00 €	Promateo	250,00 €	0,00 €	250,00 €	0,00 €	250,00 €
Realització de disseny i càlculs pe	0,00 €	Promateo	250,00 €	0,00 €	250,00 €	0,00 €	250,00 €
Programació mòdul lectura de con	0,00 €	Promateo	1.000,00 €	0,00 €	1.000,00 €	0,00 €	1.000,00 €
Validació mòdul de lectura de con	0,00 €	Promateo	625,00 €	0,00 €	625,00 €	0,00 €	625,00 €
Estudi especificacions drivers de r	0,00 €	Promateo	375,00 €	0,00 €	375,00 €	0,00 €	375,00 €
Realització primer mòdul de progr	0,00 €	Promateo	625,00 €	0,00 €	625,00 €	0,00 €	625,00 €
Estudi alternatives mòdul de contr	0,00 €	Promateo	500,00 €	0,00 €	500,00 €	0,00 €	500,00 €
Disseny i elaboració mòdul de cor	0,00 €	Promateo	1.000,00 €	0,00 €	1.000,00 €	0,00 €	1.000,00 €
Validació i sintonització mòdul de	0,00 €	Promateo	625,00 €	0,00 €	625,00 €	0,00 €	625,00 €
Adaptació mòdul de control a les t	0,00 €	Promateo	500,00 €	0,00 €	500,00 €	0,00 €	500,00 €
Integració mòdul de control a la re	0,00 €	Promateo	375,00 €	0,00 €	375,00 €	0,00 €	375,00 €
Edició i redacció final de tots els c	0,00 €	Promateo	3.000,00 €	0,00 €	3.000,00 €	0,00 €	3.000,00 €
	0,00 €	Promateo	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
	0,00 €		10.200,00 €	0,00 €	10.200,00 €	0,00 €	10.200,00 €

Fig. 7.2. Taula de costos.

8. Pressupost

8.1 Medicions

Capítol I: Elaboració del projecte		
Codi	Descripció	Parts iguals
1.1	Hores de projectista destinades a la cerca d'antecedents i informació prèvia diversa	40
1.2	Hores de projectista destinades a l'estudi estudi previ del Hardware del prototip i d'alternatives	30
1.3	Hores de projectista destinades a familiarització de l'entorn de programació i microcontrolador	43
1.4	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de lectura de corrents	85
1.5	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de control de corrents	160
1.6	Hores de projectista destinades a la documentació de tots els documents del treball	150

Taula 8.1. Elaboració del projecte

8.2 Quadre de preus

Capítol I: Elaboració del projecte		
Codi	Descripció	Preu unitari (€)
1.1	Hores de projectista destinades a la cerca d'antecedents i informació prèvia diversa	25 €
1.2	Hores de projectista destinades a l'estudi estudi previ del Hardware del prototip i d'alternatives	25 €
1.3	Hores de projectista destinades a familiarització de l'entorn de programació i microcontrolador	25 €
1.4	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de lectura de corrents	25 €
1.5	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de control de corrents	25 €
1.6	Hores de projectista destinades a la documentació de tots els documents del treball	25 €

Taula 8.2. Cost unitari de l'elaboració del projecte

8.3 Pressupost parcial

Capítol I: Elaboració del projecte				
COST D'ENGINYERIA				
Codi	Descripció	Unitats totals	Preu unitari (€)	Import
1.1	Hores de projectista destinades a la cerca d'antecedents i informació prèvia diversa	40	25 €	1.000 €
1.2	Hores de projectista destinades a l'estudi estudi previ del Hardware del prototip i d'alternatives	30	25 €	750 €
1.3	Hores de projectista destinades a familiarització de l'entorn de programació i microcontrolador	43	25 €	1.075 €
1.4	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de lectura de corrents	85	25 €	2.125 €
1.5	Hores de projectista destinades al desenvolupament de mòdul de control de corrents	160	25 €	4.000 €
1.6	Hores de projectista destinades a la documentació de tots els documents del treball	150	25 €	3.750 €
COSTOS INDIRECTES¹				
1.7	Costos indirectes de mà d'obra			2.540 €

Taula 8.3. Cost de l'elaboració del projecte.

¹ S'aplica un 20% de costos indirectes per provisió davant possibles desviacions a la planificació.

TOTAL CAPÍTOL I 15.240 €

Capítol II: Material				
COSTOS INDIRECTES²				
Codi	Descripció	Unitats totals	Preu unitari (€)	Import
2.1	Costos indirectes de material			100 €

Taula 8.4. Cost total dels materials.

² Es realitza provisió per possibles desviacions per averia o ruptura de components del hardware del projecte. S'adjunta (annex 8.1) quadre de preus dels components més sensibles a possibles averies.

TOTAL CAPÍTOL II 100 €

Capítol III: Amortitzacions³				
EQUIPS INFORMÀTICS I SOFTWARE				
Codi	Descripció	Cost Inversió	N (anys)	€/any
1.1	Ordinador	800 €	3	133 €
1.2	MPLAB ICD 3 In-Circuit Debugger	350 €	3	58 €
1.3	MS Office	300 €	3	50 €

Taula 8.5. Amortitzacions.

³ Les amortitzacions es calculen en previsió a la realització de dos projectes a l'any.

TOTAL CAPÍTOL III 242€

8.4 Pressupost global

TOTAL CAPÍTOL I	15.240,00 €
TOTAL CAPÍTOL II	100,00 €
TOTAL CAPÍTOL III	242,00 €
<hr/>	
TOTAL	15.582,00 €
<hr/>	
IVA (21%)	3272,22 €
<hr/>	
TOTAL PRESSUPOST	18854,22 €

9. Referències

- [1] A.E. FITZGERALD, C. KINGSLEY JR, S.D.UMANS (1992). *Máquinas eléctricas*. McGraw Hill. Mèxic.
- [2] T.J.E. MILLER (1989). *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. Clarendon Press. Oxford.
- [3] J.P. ROMERA, J.A. LORITE (1994). *Automatización*. Thomson Paraninfo.
- [4] R.C. DORF, R.H. BISHOP (2005), *Sistemas de control moderno*. Pearson Education.
- [5] J.M. ANGULO USATEGUI, A.ETXEARRIA RUIZ, I.ANGULO MARTÍNEZ, I.TRUEBA PARRA (2006). *DsPIC. Diseño práctico de aplicaciones*. McGraw Hill. Espanya.
- [6] DATA-SHEET SENSOR INDUCTIU SIEMENS 3RG4022.
http://www.electrosn.com/documentos/D_3RG40220AG01_0_SIEMENS_3RG40220AG_01_INDUCTIVO_PDF.pdf
- [7] DATA-SHEET MICROCONTROLADOR MICROCHIP DS30F4011.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70135C.pdf>
- [8] DATA-SHEET INTEGRAT INTERNATIONAL RECTIFIER IR2175.
<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2175.pdf>
- [9] DATA-SHEET MÒDUL DE POTENCIA FAIRCHILD FCAS50SN60.
http://81.233.9.161:800/_pdf/FC/FCAS50SN60.pdf
- [10] Guia d'usuari MPLAB X IDE V.2.30.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002027C.pdf>
- [11] Guia d'usuari MPASM, MPLINK i MPLIB.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/33014L.pdf>

[12] Guia d'usuari MPLAB ICD3.

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002081B.pdf>

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

CONTROL DE VELOCITAT PEL MOTOR DE RELUCTÀNCIA LINEAL DEL TREN TELMAG

Annexos

**MARC PRATS RÀFALES
PONENT: SALVADOR ALEPUZ MENENDEZ**

PRIMAVERA 2015



**TecnoCampus
Mataró-Maresme**

Índex.

Annex I. Programa del control del prototip.	1
Annex II. Tests de validació de resultats.	21
Annex III. Càlculs subrutina generació consigna.	31
Annex IV. Viabilitat mediambiental.	33
Annex V. Esquemes electrònics (cortesia Innovem).	45
Annex VI. Contingut del CD-ROM.	49

Annex I. Programa del control del prototip.

Main.c

```
/*
 * File:   main.c
 * Author: Marc Prats
 * Control de velocitat pel motor de reluctància lineal del Tren Telmag
 * Created on 30 / juny / 2015, 18:36
 */

/*****
Declaració #Includes
*****/
#include <xc.h>
#include <libpic30.h>
#include <p30F4011.h>
#include "constants.h"

/*****
Declaració variables
*****/

int cons=21;           // Variable Consigna (AMPERS)
int out;              // Variable que defineix fases actives
int inicialitza =0;   // Variable per entrar al bucle principal
int lecturaICS;      // Variable que defineix mòduls IC llegits
int byte_ICS;        // Variable que defineix mòduls IC per llegir
int bufferpolsosIC2[10]; // Matriu visualització polsos IC2
int bufferpolsosIC7[10]; // Matriu visualització polsos IC7
int bufferpolsosIC8[10]; // Matriu visualització polsos IC8
int indexpolsosIC2=0; // Punter polsos IC2
int indexpolsosIC7=0; // Punter polsos IC7
int indexpolsosIC8=0; // Punter polsos IC8
int consignapolsosint; // Variable de consigna (en polsos)
int control_alt=0;    // Variable sortida control rutina fcontrol

/***** IC 7 *****/

unsigned short IC7count; //Contador iteracions IC7
unsigned int bufferbaixadaIC7; //Buffer captures baixada IC7
unsigned int bufferpujadaIC7[6]; //Buffer captures pujada IC7
unsigned int indexbaixadaIC7=0; //Punter captures baixada IC7
unsigned int indexpujadaIC7=0; //Punter captures pujada IC7
int polsosIC7; //Sumatori de 4 Dutys IC7
```



```

/***** IC 2 *****/
unsigned short IC2count; //Contador iteracions IC2
unsigned int bufferbaixadaIC2; //Buffer captures baixada IC2
unsigned int bufferpujadaIC2[6]; //Buffer captures pujada IC2
unsigned int indexbaixadaIC2=0; //Punter captures baixada IC2
unsigned int indexpujadaIC2=0; //Punter captures pujada IC2
int polsosIC2; //Sumatori de 4 Dutys IC2

/***** IC 8 *****/
unsigned short IC8count; //Contador iteracions IC8
unsigned int bufferbaixadaIC8; //Buffer captures baixada IC8
unsigned int bufferpujadaIC8[6]; //Buffer captures pujada IC8
unsigned int indexbaixadaIC8=0; //Punter captures baixada IC8
unsigned int indexpujadaIC8=0; //Punter captures pujada IC8
int polsosIC8; //Sumatori de 4 Dutys IC8

/*****
*****

Declaració subrutines

*****
*****/

/*****
*****

SUBROUTINA: fcalculconsigna
S'encarrega de transformar la variable consigna (ampers) a consignapolsosint
(polsos).
*****/

int fcalculconsigna(int consigna)
{
consignapolsosint=2.9112*consigna+92.30;
//Transforma entrada consigna (A) en polsos

return consignapolsosint;
}

/*****
*****

SUBROUTINA: fcontrol
S'encarrega de mesurar el rebut a les subrtines fpolsosICx i comparar-ho
amb el que hi ha per consigna a la variable consignapolsosint.
Genera l'acció de control amb la variable control_alt
*****/

int fcontrol(int polIC7, int polIC8, int polIC2)
{
//control_alt
// X---- IC2
// -XX-- IC8
// ---XX IC7

control_alt=0;
if (polIC7<consignapolsosint)

```

```

{control_alt=control_alt+3;}

if (polIC8<consignapolsosint)
{control_alt=control_alt+12;}

if (polIC2<consignapolsosint)
{control_alt=control_alt+16;}

return control_alt;
}

/*****
SUBROUTINA: fpolsosIC2
Retorna el valor de polsos mesurats durant 4 cicles a la variable polsosIC2
*****/

int fpolsosIC2 (int index3, int pujada3, int baixada3)
{

for (index3=0; index3<4; index3++)
{pujada3=pujada3 + bufferpujadaIC2[index3]; //Acumula valors de flancs de
//pujada llegits.
}
baixada3=((bufferbaixadaIC2*4)+644); //calcul per SW dels polsos de
//baixada.
//644= 14 cicles x 46 pols/cicle
//Freq: 130 kHz.
indexpujadaIC2=0; //Reinicialitza punter pujada.
indexbaixadaIC2=0; //Reinicialitza punter baixada.
IC2count=0; //Reset flag.
polsosIC2= baixada3-pujada3; //Calcula polsos.
bufferpolsosIC2[indexpolsosIC2]=polsosIC2; //Guarda resultat al buffer.
indexpolsosIC2=indexpolsosIC2+1; //Incrementa punter buffer.
if (indexpolsosIC2==10) //S'acumulen fins a 10 lectures.
{asm("nop"); //Punt reservat per a breakpoint
indexpolsosIC2=0;} //Reinicialitza punter.
return polsosIC2;
}

/*****
SUBROUTINA: fpolsosIC7
Retorna el valor de polsos mesurats durant 4 cicles a la variable polsosIC7
*****/

int fpolsosIC7 (int index, int pujada, int baixada)
{

for (index=0; index<4; index++)
{pujada=pujada + bufferpujadaIC7[index]; //Acumula valors de flancs de
//pujada llegits.
}
baixada=((bufferbaixadaIC7*4)+644); //calcul per SW dels polsos de
//baixada.
//644= 14 cicles x 46 pols/cicle

```

```

//Freq: 130 kHz.
indexpujadaIC7=0; //Reinicialitza punter pujada.
indexbaixadaIC7=0; //Reinicialitza punter baixada.
IC7count=0; //Reset flag.
polsosIC7= baixada-pujada; //Calcula polsos.
bufferpolsosIC7[indexpolsosIC7]=polsosIC7; //Guarda resultat al buffer.
indexpolsosIC7=indexpolsosIC7+1; //Incrementa punter buffer.
if (indexpolsosIC7==10) //S'acumulen fins a 10 lectures.
{asm("nop"); //Punt reservat per a breakpoint
indexpolsosIC7=0;} //Reinicialitza punter.
return polsosIC7;
}

/*****
SUBROUTINA: fpolsosIC8
Retorna el valor de polsos mesurats durant 4 cicles a la variable polsosIC8
*****/

int fpolsosIC8 (int index2, int pujada2, int baixada2)
{
for (index2=0; index2<4; index2++)
{pujada2=pujada2 + bufferpujadaIC8[index2]; //Acumula valors de flancs de
//pujada llegits.
}
baixada2=((bufferbaixadaIC8*4)+644); //calcul per SW dels polsos
//baixada.
//644= 14 cicles x 46 polsos
//Freq: 130 kHz.
indexpujadaIC8=0; //Reinicialitza punter pujada
indexbaixadaIC8=0; //Reinicialitza punter baixada
IC8count=0; //Reset flag.
polsosIC8= baixada2-pujada2; //Calcula polsos.
bufferpolsosIC8[indexpolsosIC8]=polsosIC8; //Guarda resultat al buffer
indexpolsosIC8=indexpolsosIC8+1; //Incrementa punter buffer
if (indexpolsosIC8==10) //S'acumulen fins a 10 lectures.
{asm("nop"); //Punt reservat per a breakpoint
indexpolsosIC8=0;} //Reinicialitza punter.
return polsosIC8;
}

/*****
*****/

Configuration Bit Setting DSPIC30F4011

*****/

// FOSC
#pragma config FPR = XT_PLL4 // Primary Oscillator Mode (XTL)
#pragma config FOS = PRI // Oscillator Source
// (Primary Oscillator)
#pragma config FCKSMEN = CSW_FSCM_OFF // Clock Switching and Monitor
//(Sw Disabled, Mon Disabled)

```

```

// FWDT
#pragma config FWPSB = WDTPSB_1           // WDT Prescaler B (1:1)
#pragma config FWPSA = WDTPSA_8           // WDT Prescaler A (1:8)
#pragma config WDT = WDT_ON               // Watchdog Timer (Enabled)

// FBORPOR
#pragma config FPWRT = PWRT_64            // POR Timer Value (64ms)
#pragma config BODENV = BORV27           // Brown Out Voltage (2.7V)
#pragma config BOREN = PBOR_ON           // PBOR Enable (Enabled)
#pragma config LPOL = PWMxL_ACT_HI        // Low-side PWM Output Polarity
                                           // (Active High)
#pragma config MCLR = MCLR_EN            // Master Clear Enable (Enabled)

// FGS
#pragma config GWRP = GWRP_OFF           // General Code Segment
                                           // Write Protect (Disabled)
#pragma config GCP = CODE_PROT_OFF       // General Segment Code
                                           // Protection (Disabled)

// FICD
#pragma config ICS = ICS_PG1             // Comm Channel Select
                                           // (Use PGC/EMUC and PGD/EMUD)

/*****
*****

M A I N

*****/

int main(void)
{

/*****
*****
*           Configuració de Temporitzadors
*****

/*****
*****
T3           *****/

T3CON = 0b1000000000000000;
// Temporitzador 3 activat amb mode bàsic de funcionament
// T3CON
// TON =      x----- el fiquem a '1' per activar el temporitzador.
// TISDL =    --X-----
// TGATE =    -----X-----
// TCKPS =    -----XX----
// TCS =      -----X-

PR3= 0xFFFF; // fiquem el comptador de períodes al màxim

```

```

/*****
*TON = Timer on control bit (TON=1 starts the timer, TON=0 stops the timer)
*TSIDL = Stop in IDLE mode bit (TSIDL=1 discontinue timer operation when is in
*IDLE mode, TSIDL=0 continue timer operation in IDLE mode)
*TGATE = Timer gated time accum. enable bit(TCS must be set to 0 when *TGATE=1)
* TCKPS<1:0> - Timer input clock prescale select bits
  * 00 = 1:1 prescale value
  * 01 = 1:8 prescale value
  * 10 = 1:64 precale value
  * 11 = 1:256 prescale value
  * TCS = Timer clock source select bit
  * (TCS=1 external clock from pin T1CK, TCS=0 internal clock FOSC/4)
* *****/

/*****
Configuració de Mòduls IC
*****/
IPC4bits.IC7IP=0b010;          //Prioritat Interrupció IC7=2

IPC4bits.IC8IP=0b010;          //Prioritat Interrupció IC8=2

IPC1bits.IC2IP=0b010;          //Prioritat Interrupció IC2=2

IEC1bits.IC7IE=1;              //Habilitem Interrupcions mòdul IC7

IEC1bits.IC8IE=1;              //Habilitem Interrupcions mòdul IC8

IEC0bits.IC2IE=1;              //Habilitem Interrupcions mòdul IC2

/*****
*****          IC7          *****/

PORTBbits.RB4=1;                // IC7 definit com entrada
IC7CONbits.ICSIDL=0;            // 0- sistema INPUT CAPTURE no funciona en mode IDLE
IC7CONbits.ICTMR=0;            // 0- utilitza el TIMER3 , 1-utilitza TIMER2
IC7CONbits.ICI=0b00;           // ICI <1:0> -
                                // Seleccciona nombre de captures per interrupt bits
                                // 00 = interrupció a cada event de captura
                                // 01 = interrupció a cada segon event de captura
                                // 10 = interrupció a cada tercer event de captura
                                // 11 = interrupció a cada quart event de captura

IC7CONbits.ICM=0b000;           // 000 = Mòdul Input Capture apagat
                                // 001 = Mode captura cada flanc (pujada i baixada)
                                // 010 = Mode captura tots flancs de baixada
                                // 011 = Mode captura tots flancs de pujada
                                // 100 = Mode captura, cada 4rt flanc de pujada
                                // 101 = Mode captura, cada 16è flanc de pujada
                                // 110 = Unused (module disabled)
                                // 111 = Input capture module in external signal
                                // (external source of interrupt requests)

/*****
*****          IC8          *****/

PORTBbits.RB5=1;                // IC8 definit com entrada
IC8CONbits.ICSIDL=0;            // 0- sistema INPUT CAPTURE no funciona en mode IDLE
IC8CONbits.ICTMR=0;            // 0- utilitza el TIMER3 , 1-utilitza TIMER2
IC8CONbits.ICI=0b00;           // ICI <1:0> -

```

```

// Selecciona nombre de captures per interrupt bits
// 00 = interrupció a cada event de captura
// 01 = interrupció a cada segon event de captura
// 10 = interrupció a cada tercer event de captura
// 11 = interrupció a cada quart event de captura

IC8CONbits.ICM=0b000; // 000 = Mòdul Input Capture apagat
// 001 = Mode captura cada flanc (pujada i baixada)
// 010 = Mode captura tots flancs de baixada
// 011 = Mode captura tots flancs de pujada
// 100 = Mode captura, cada 4rt flanc de pujada
// 101 = Mode captura, cada 16è flanc de pujada
// 110 = Unused (module disabled)
// 111 = Input capture module in external signal
// (external source of interrupt requests)

/*****                               IC2                               *****/

PORTDbits.RD1=1; //IC2 definit com entrada
IC2CONbits.ICSIDL=0; //0- sistema INPUT CAPTURE no funciona en mode IDLE
IC2CONbits.ICTMR=0; //0- utilitza el TIMER3 , 1-utilitza TIMER2
IC2CONbits.ICI=0b00; //ICI <1:0> -
// Select number of captures per interrupt bits
// 00 = interrupció a cada event de captura
// 01 = interrupció a cada segon event de captura
// 10 = interrupció a cada tercer event de captura
// 11 = interrupció a cada quart event de captura

IC2CONbits.ICM=0b000; // 000 = Mòdul Input Capture apagat
// 001 = Mode captura cada flanc (pujada i baixada)
// 010 = Mode captura tots flancs de baixada
// 011 = Mode captura tots flancs de pujada
// 100 = Mode captura, cada 4rt flanc de pujada
// 101 = Mode captura, cada 16è flanc de pujada
// 110 = Unused (module disabled)
// 111 = Input capture module in external signal
// (external source of interrupt requests)

ClrWdt(); // Esborra el Watchdog

// Esborra interrupcions

IFS0 = 0;
IFS1 = 0;
IFS2 = 0;

// === Definició de ports ===
// *** A/D Port Configuration Register
ADPCFG = 0b00011111; // Definició d'entrades analògiques
// (AN6 - AN8)

```

```

// *** A/D Control Register 1
// ADON = x----- A/D Operating Mode bit
// Unimp = -x-----
// ADSIDL --x----- Stop in Idle Mode bit
// Unimp = ---xxx-----
// FORM = -----00----- Data Output Format bits
// SSRC = -----111----- auto convert
// Unimp = -----x-----
// SIMSAM= -----0--- Samples multiple channels individually
//                               in sequence
// ASAM = -----1-- Sampling begins when SAMP bit set
// SAMP = -----x- A/D Sample Enable bit
// DONE = -----x A/D Conversion Status bit

ADCON1 = 0b0000000011100100;

// *** A/D Control Register 2

// VCFG = 000----- Voltage Reference Configuration bits
//                               VrefH=AVdd VrefL=AVss
//
// Unimp = ---x-----
// Reserv= ---x-----
// CSCNA = ----1----- Scan Input Selections for CH0+ S/H. *
// CHPS = -----00----- Converts CH0
// BUFS = -----x----- Buffer Fill Status bit
// Unimp = -----x-----
// SMPI = -----1110-- Interrupts at the completion of
//                               conversion for each 15th sample/convert
//                               sequence *
// BUFM = -----0- Buffer configured as one 16-word buffer
//                               //ADCBUF(15..0.)
// ALTS = -----0 Always use MUX A input multiplexer
//                               Settings

ADCON2 = 0b0000010000111000;

// *** A/D Control Register 3
// Unimp = xxx-----
// SAMC = ---11111----- Auto-Sample Time bits = 31Tad
// ADRC = -----0----- Clock derived from system clock
// Unimp = -----x-----
// ADCS = -----001000 A/D Conversion Clock Select bits =9/2Tcy

ADCON3 = 0b0001111100001000;

ADCHS = 0; // A/D Input Select Register
ADCSSL = 0b111000000; // A/D Input Scan Select Register
// (AN6 - AN8)
ADCON1bits.ADON = 1; // ADC on

TRISF = 0b0001111; // Sortides puerto F (LS IGBT)
TRISD = 0b0011; // Sortides puerto D (LS IGBT)

```


IC2Int.s

```

;*****
;
; Author      : Marc Prats
; Company    : Tecnocampus
; Filename    : IC2int.s
; Files Required :
; Processor   : dsPIC30F4011
; Tools Used  : MPLAB X IDE v1.90
;             : XC16 v1.11
;
;*****
; REVISION HISTORY:
;~~~~~
; Author      Date      Comments on this revision
;~~~~~
; Marc Prats Rafales      06/15      Initial release
;
;
;*****

;.....
; Declaració de subrutines:
;.....

;.....
; Declaració de Variables Globals:
;.....
.extern IC2count ; //Contador iteracions IC2
.extern bufferbaixadaIC2; //Buffer captures baixada IC2
.extern bufferpujadaIC2; //Buffer captures pujada IC2
.extern indexbaixadaIC2; //Punter captures baixada IC2
.extern indexpujadaIC2; //Punter captures pujada IC2

;.....
; Inici del programa
;.....

.global IC2Interrupt
IC2Interrupt:
    mov w0,[w15++] ;
    lnk #0x0 ;
    push.s ;
    push w1 ; Guardem
    mov w1,[w15++] ; registres
    mov w2,[w15++] ; a la
    mov w3,[w15++] ; pila
    mov w4,[w15++] ;
    mov w5,[w15++] ;

```


IC7Int.s

```

;*****
;
; Author      : Marc Prats
; Company    : Tecnocampus
; Filename    : IC7int.s
; Files Required :
; Processor   : dsPIC30F4011
; Tools Used  : MPLAB X IDE v1.90
;             : XC16 v1.11
;
;*****
; REVISION HISTORY:
;~~~~~
; Author      Date      Comments on this revision
;~~~~~
; Marc Prats Rafales    06/15    Initial release
;
;
;*****
; Additional Notes: Rutina d'interruptió de modul captura IC7
;
;
;
;*****

.text
;.....
; Declaració de subrutines:
;.....

;.....
; Declaració de Variables Globals:
;.....
.extern IC7count ; //Contador iteracions IC7
.extern bufferbaixadaIC7; //Buffer captures baixada IC7
.extern bufferpujadaIC7; //Buffer captures pujada IC7
.extern indexbaixadaIC7; //Punter captures baixada IC7
.extern indexpujadaIC7; //Punter captures pujada IC7

;.....
; Inici del programa
;.....

.global IC7Interrupt
IC7Interrupt:
    mov w0,[w15++] ;
    lnk #0x0 ;
    push.s ;
    push w1 ; Guardem
    mov w1,[w15++] ; registres
    mov w2,[w15++] ; a la
    mov w3,[w15++] ; pila
    mov w4,[w15++] ;
    mov w5,[w15++] ;

```


IC8Int.s

```

;*****
;
;   Author           :   Marc Prats
;   Company          :   Tecnocampus
;   Filename         :   IC8int.s
;   Files Required   :
;   Processor        :   dsPIC30F4011
;   Tools Used       :   MPLAB X IDE v1.90
;
;                   :   XC16 v1.11
;
;*****
; REVISION HISTORY:
;~~~~~
; Author           Date           Comments on this revision
;~~~~~
;   Marc Prats Rafales       06/15       Initial release
;
;
;*****
;   Additional Notes: Rutina d'interrupció de modul captura IC8
;
;
;
;
;*****

.text

;.....
; Declaració de subrutines:
;.....

;.....
; Declaració de Variables Globals:
;.....

.extern IC8count ;           //Contador iteracions IC7
.extern bufferbaixadaIC8;     //Buffer captures baixada IC7
.extern bufferpujadaIC8;     //Buffer captures pujada IC7
.extern indexbaixadaIC8;     //Punter captures baixada IC7
.extern indexpujadaIC8;     //Punter captures pujada IC7

;.....
; Inici del programa
;.....

.global IC8Interrupt
IC8Interrupt:
    mov w0,[w15++]           ;
    lnk #0x0                 ;
    push.s                   ;
    push w1                  ; Guardem
    mov w1,[w15++]           ; registres
    mov w2,[w15++]           ; a la
    mov w3,[w15++]           ; pila
    mov w4,[w15++]           ;
    mov w5,[w15++]           ;

```

```

mov IC8CON,w1
mov w1,w2 ; Guardem registre IC8CON
btsc w1,#0 ; Si el bit 0 del IC8CON esta a 0
; es baixada si no anem a flancpujada

goto flancpujada
mov #_bufferbaixadaIC8,w6 ; Seqüència Bucle1 per guardar
mov _indexbaixadaIC8,w4 ; els valors IC8BUF a la variable
bucle1: mov IC8BUF,w5 ; BufferbaixadaIC8 fins que el
mov w5,[w6] ; flag ICBNE estigui a 0
inc2 w4,w4 ;
btsc IC8CON,#0x3 ;
bra bucle1
mov w4,_indexbaixadaIC8 ; actualitzem comptador de baixada
and #0x398,w2
mov w2,IC8CON ; resetejem mòdul IC8
ior #0x063,w2
mov w2,IC8CON ; Programem mòdul IC8 amb captura de
; tots els events de pujada i
; interrupció a la 4a.

goto final
flancpujada:mov #_bufferpujadaIC8,w3
mov _indexpujadaIC8,w4
bucle2: add w3,w4,w6 ; Seqüència Bucle2 per guardar els
mov IC8BUF,w5 ; valors IC8BUF a la variable
mov w5,[w6] ; BufferbaixadaIC8 fins que el
inc2 w4,w4 ;
btsc IC8CON,#3 ; flag ICBNE estigui a 0
goto bucle2
mov w4,_indexpujadaIC8 ; Actualitzem comptador de pujada
mov _IC8count,w4
inc w4,w4
mov w4,_IC8count ; Incrementem valor IC8Count
and #0x398,w2 ; resetejem mòdul IC8
final: mov w2,IC8CON ;
BCLR IFS1,#2 ; Resetem Flag Interrupció IC8
mov [--w15],w6 ;
mov [--w15],w5 ;
mov [--w15],w4 ;
mov [--w15],w3 ; Recuperem
mov [--w15],w2 ; registres
mov [--w15],w1 ; de la
pop.s ; pila
ulnk ;
mov [--w15],w0 ;
retfie

.end ; End of program code in this file

```

S_byte_ICS.s

```

;*****;
;
; Author      : Marc Prats
; Company    : Tecnocampus
; Filename    : s_byte_ICS.s
; Files Required :
; Processor   : dsPIC30F4011
; Tools Used  : MPLAB X IDE v1.90
;             : XC16 v1.11
;
;*****;
; REVISION HISTORY:
;~~~~~;
; Author      Date      Comments on this revision
;~~~~~;
; Marc Prats  06/2015   Initial Release
;
;*****;
;
; Additional Notes: Rutina d'activació moduls IC
;*****;

.text

;.....;
; Declaració de subrutines:
;.....;

.global _s_byte_ICS

;.....;
; Declaració de Variables Globals:
;.....;

.extern byte_ICS
.extern lecturaICS

;.....;
; Inici del programa
;.....;

_s_byte_ICS:

    mov    #0,w1
    btsc  w0,#3
    bset  w1,#0 ;IC2
    btsc  w0,#0
    bset  w1,#1 ;IC7
    btsc  w0,#4
    bset  w1,#1 ;IC7
    btsc  w0,#1
    bset  w1,#2 ;IC8
    btsc  w0,#2
    bset  w1,#2 ;IC8
    mov    w1,_byte_ICS
    btsc  w1,#0
    bset  IC2CON,#1 ;ACTIVA IC2 BAIXADA
    btsc  w1,#1
    bset  IC7CON,#1 ;ACTIVA IC7 BAIXADA
    btsc  w1,#2

```

```
bset    IC8CON,#1    ;ACTIVA IC8 BAIXADA
mov     #0,w0
mov     w0, lecturaICS
RETURN
.end           ; End of program code in this file
```


Salida ALT.s

```

;*****;
;
; Author      : Marc Prats      ;
; Company    : Tecnocampus     ;
; Filename    : salida_ALT.s   ;
;
; Processor   : dsPIC30F4011   ;
; Tools Used  : MPLAB X IDE v1.90 ;
;             : XC16 v1.11     ;
;
;*****;
; REVISION HISTORY:
;~~~~~;
; Author      Date      Comments on this revision ;
;~~~~~;
; Marc Prats  06/2015   Initial Release          ;
;
;*****;
;
; Additional Notes: Rutina d'actualització de sortides del nivell alt dels ;
;                  drivers IGBT          ;
;*****;

.text

;.....;
; Declaració de subrutines:
;.....;

.global _salida_ALT

;.....;
; Declaració de Variables Globals:
;.....;

.extern control_alt

;.....;
; Inici del programa
;.....;

_salida_ALT:
    AND    W0, #0b11111, W0      ; Desglossament en els ports de sortida
    CLR    W1
    BTSC   W0, #0                ; W0.0->E0
    BSET   W1, #0
    BTSC   W0, #1                ; W0.1->E2
    BSET   W1, #2
    BTSC   W0, #2                ; W0.2->E3
    BSET   W1, #3
    BTSC   W0, #3                ; W0.3->E4
    BSET   W1, #4
    BTSC   W0, #4                ; W0.4->E1
    BSET   W1, #1

```


Annex II. Tests de validació de resultats.

Test 1: Linealitat i exactitud de la mesura de corrents

- Objectiu:

Mesurar la linealitat i exactitud de la mesura de corrents en tot l'espectre de mesura (desde duty del 50% al 91%), en intervals de 5%. Comparar els resultats observats amb les senyals reals provinents del generador de funcions amb les teòriques calculades amb simulador.

- Material necessari:
 - ICD3 Debugger
 - Targeta de control
 - Generador de funcions
 - Oscil·loscopi
 - Font d'alimentació
- Muntatge:

Es connecta el debugger ICD3 a l'ordinador mitjançant el connector USB i a la targeta de control mitjançant el port RJ45. Es connecta el generador de funcions a l'oscil·loscopi per configurar la senyal desitjada (freqüència constant de 130 kHz i duty cycle variable).

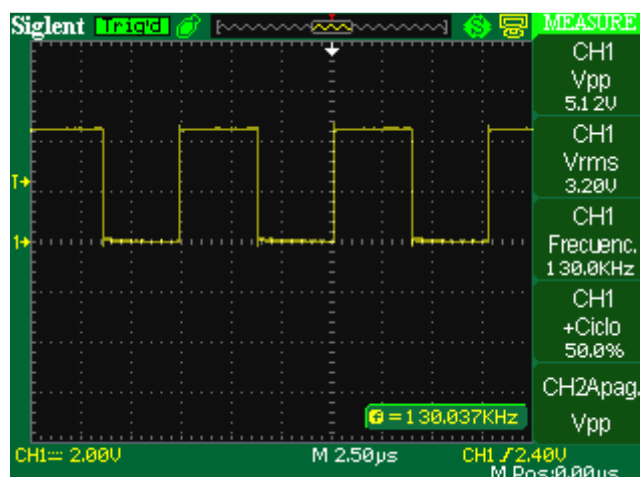


Figura II.1 Senyal configurada de 130 Khz i duty 50%

Un cop configurada la senyal es connecta al pin 8 del sòcol de l'integrat 74HC58, donat que aquest està connectat directament al pin 6 del microcontrolador DSPIC30f4011 (entrada IC7).

S'alimenta la targeta de control mitjançant la font d'alimentació +5 Vdc alimentant els pins 14 (VCC) i 7 (Gnd) del mateix sòcol de l'integrat 74HC58.

Es genera un codi addicional que s'incorpora a la subrutina `fpolsosIC7`, per crear una matriu a la memòria de dades del microcontrolador i així poder observar més fàcilment el resultat de les lectures:

```
bufferpolsosIC7[indexpolsosIC7]=polsosIC7;
indexpolsosIC7=indexpolsosIC7+1;
if (indexpolsosIC7==10)
{asm("nop");
indexpolsosIC7=0;}
```

Configurem un breakpoint a la línia `{asm("nop")}`; del codi superior, de tal manera que quan l'algorisme ha capturat 10 lectures el programa s'interromp i es poden llegir les dades del microcontrolador i copiar-les si es desitja a fulla de càlcul per el seu posterior anàlisi.

bufferpolsosIC7		int[10]	...	...	...
◆	bufferpolsosIC7[0]	int	...	...	...	92
◆	bufferpolsosIC7[1]	int	...	...	...	92
◆	bufferpolsosIC7[2]	int	...	...	...	92
◆	bufferpolsosIC7[3]	int	...	...	...	91
◆	bufferpolsosIC7[4]	int	...	...	...	92
◆	bufferpolsosIC7[5]	int	...	...	...	92
◆	bufferpolsosIC7[6]	int	...	...	...	94
◆	bufferpolsosIC7[7]	int	...	...	...	92
◆	bufferpolsosIC7[8]	int	...	...	...	92
◆	bufferpolsosIC7[9]	int	...	...	...	93

Fig. II.2. Lectures capturades amb cycle de servei 50%.

- Resultats:

Es repeteix el procediment presentat anteriorment per tot l'espectre de mesura (cycle de servei entre 50% i 91%) en intervals de 5%. Es calcula el valor mitjà de les mesures i

finalment es calcula l'error relatiu entre el valor mitjà mesurat i el valor que hauria de donar segons simulador:

Cicle de treball	50
Mesura esperada	92,3

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	\bar{X}
92	92	92	91	92	92	94	92	92	93	92,2

Error rel.	-0,1083%
-------------------	-----------------

Taula II.1. Resultats amb cicle de treball 50%.

Cicle de treball	55
Mesura esperada	101,62

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	\bar{X}
101	102	102	101	101	102	102	103	102	101	101,7

Error rel.	0,0787%
-------------------	----------------

Taula II.2. Resultats amb cicle de treball 55%.

Cicle de treball	60
Mesura esperada	110,93

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	\bar{X}
111	112	111	110	110	111	112	110	111	111	110,9

Error rel.	-0,0270%
-------------------	-----------------

Taula II.3. Resultats amb cicle de treball 60%

Cicle de treball	65
Mesura esperada	120,2

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	\bar{X}
120	121	121	121	120	120	120	120	120	120	120,3

Error rel.	0,0832%
-------------------	----------------

Taula II.4. Resultats amb cicle de treball 65%

Cicle de treball	70
Mesura esperada	129,28

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	\bar{X}
130	130	129	130	129	129	130	129	129	129	129,4

Error rel.	0,0928%
-------------------	----------------

Taula II.5. Resultats amb cicle de treball 70%.

Cicle de treball	75
Mesura esperada	138,59

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	\bar{X}
138	139	139	138	138	138	139	137	138	139	138,3

Error rel.	-0,2093%
-------------------	-----------------

Taula II.6. Resultats amb cicle de treball 75%.

Cicle de treball	80
Mesura esperada	147,7

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	\bar{X}
148	148	147	147	148	148	148	149	147	148	147,8

Error rel.	0,0677%
-------------------	----------------

Taula II.7. Resultats amb cicle de treball 80%.

Cicle de treball	85
Mesura esperada	156,93

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	\bar{X}
157	157	157	156	157	157	157	157	158	157	157

Error rel.	0,0446%
-------------------	----------------

Taula II.8. Resultats amb cicle de treball 85%.

Cicle de treball	91
Mesura esperada	167,9

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	\bar{X}
168	168	166	167	168	168	169	167	168	168	167,7

Error rel.	-0,1191%
-------------------	-----------------

Taula II.9. Resultats amb cicle de treball 91%.

Finalment després de recopilar les mesures en tot l'espectre de mesura, es presenta els resultats obtinguts a la figura II.3. En aquest gràfic es pot observar com les mesures reals realitzades (punts vermells) estan molt properes a la línia blava de funció ideal calculada amb simulador. Es considera doncs, que amb senyals provinents de l'electrònica de laboratori (generador de funcions), l'algorisme té un comportament lineal i les mesures s'aproximen molt a les previstes per simulador.

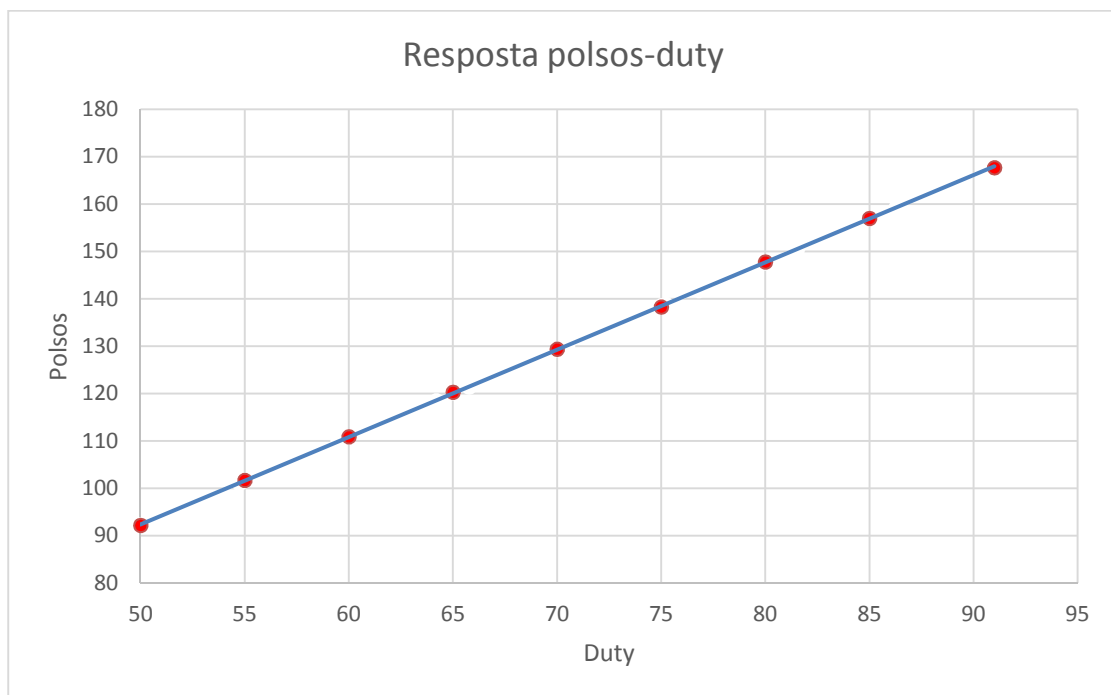


Figura II.3. Resposta real de mesures vs Resposta simulada

Test 2: Lectura de dues fases actives simultànies.

- Objectiu:

Demostrar que l'algorisme es capaç de gestionar dues lectures simultànies provinents dels ports IC. Observar si es produeixen errors o males lectures.

- Material necessari:
 - ICD3 Debugger
 - Targeta de control
 - 2 Generadors de funcions
 - Oscil·loscopi
 - Font d'alimentació
- Muntatge:

Es connecta el debugger ICD3 a l'ordinador mitjançant el connector USB i a la targeta de control mitjançant el port RJ45. Es connecta el primer generador de funcions al CH1 de l'oscil·loscopi per configurar la senyal desitjada (freqüència constant de 130 kHz i duty cycle de 91%).

Un cop configurada la senyal es connecta al pin 6 del sòcol de l'integrat 74HC58, donat que aquest està connectat directament al pin 7 del microcontrolador DSPIC30f4011 (entrada IC8).

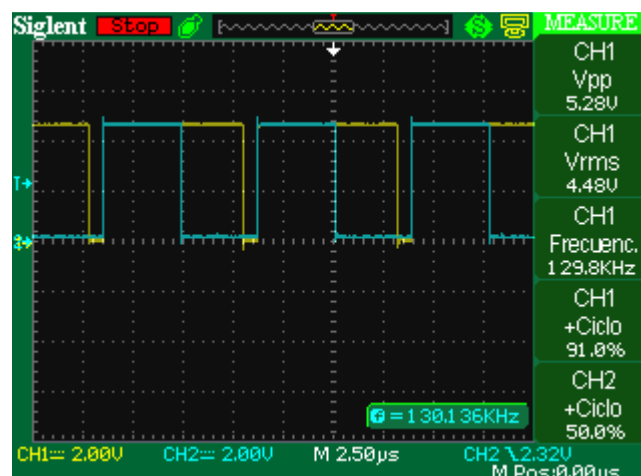


Figura II.4. Entrada de dues senyals d=50% i d=91%.

Es connecta el segon generador de funcions al CH2 de l'oscil·loscopi per configurar la senyal desitjada (freqüència constant de 130 kHz i duty cycle de 50%)

Un cop configurada la senyal es connecta al pin 8 del sòcol de l'integrat 74HC58, donat que aquest està connectat directament al pin 6 del microcontrolador DSPIC30f4011 (entrada IC7).

S'alimenta la targeta de control mitjançant la font d'alimentació +5 Vdc alimentant els pins 14 (VCC) i 7 (Gnd) del mateix sòcol de l'integrat 74HC58.

S'aprofita el codi realitzat al test 1 a la rutina fpolsosIC7 i es genera un codi addicional que s'incorpora a la subrutina fpolsosIC8, per crear una matriu a la memòria de dades del microcontrolador i així poder observar més fàcilment el resultat de les lectures de ambdues senyals:

```
bufferpolsosIC8[indexpolsosIC8]=polsosIC8;
indexpolsosIC8=indexpolsosIC8+1;
if (indexpolsosIC8==10)
{asm("nop");
indexpolsosIC8=0;}
```

Configurem un breakpoint a la línia {asm("nop");} del codi superior, de tal manera que quan l'algorisme ha capturat 10 lectures el programa s'interromp i es poden llegir les dades del microcontrolador.

- Resultats:

Es decideix utilitzar dues senyals situades en els dos extrems de l'espectre de mesura, és a dir, una detectant 0 A (duty cycle=50%) i l'altre detectant 26 A (duty cycle=91%), perquè s'entén que per l'execució de les interrupcions es el cas menys favorable. Es deixa el programa en execució durant 15 minuts per veure si passa quelcom inesperat després de tantes execucions. Es realitzen parades aleatòries per realitzar lectures dels últims deu polsos mesurats tant per la senyal provinent del primer generador de funcions com la senyal provinent del segon generador de funcions. S'observa un comportament estable en tot moment i el valor mesurat final, tal i com es pot veure a al figura II.5 no difereix del que es realitzaria si només s'estigués realitzant una mesura i no dues alhora.

🔒 bufferpolsosIC7	int[10]	...	...	...
◆ bufferpolsosIC7[0]	int	...	...	92
◆ bufferpolsosIC7[1]	int	...	...	92
◆ bufferpolsosIC7[2]	int	...	...	92
◆ bufferpolsosIC7[3]	int	...	...	92
◆ bufferpolsosIC7[4]	int	...	...	92
◆ bufferpolsosIC7[5]	int	...	...	92
◆ bufferpolsosIC7[6]	int	...	...	92
◆ bufferpolsosIC7[7]	int	...	...	91
◆ bufferpolsosIC7[8]	int	...	...	91
◆ bufferpolsosIC7[9]	int	...	...	90
🔒 bufferpolsosIC8	int[10]	...	...	...
◆ bufferpolsosIC8[0]	int	...	...	168
◆ bufferpolsosIC8[1]	int	...	...	168
◆ bufferpolsosIC8[2]	int	...	...	168
◆ bufferpolsosIC8[3]	int	...	...	168
◆ bufferpolsosIC8[4]	int	...	...	168
◆ bufferpolsosIC8[5]	int	...	...	168
◆ bufferpolsosIC8[6]	int	...	...	166
◆ bufferpolsosIC8[7]	int	...	...	168
◆ bufferpolsosIC8[8]	int	...	...	168
◆ bufferpolsosIC8[9]	int	...	...	168

Figura II.5. Lectura microcontrolador dues senyals simultànies (50-91%).

Es repeteix el test amb totes les combinacions possibles: IC7 i IC2, IC2 i IC8, amb resultats satisfactoris.

Test 3: Freqüència de commutació IGBTs.

- Objectiu:

Quantificar el cicle d'actualització de la generació de l'acció de control sobre els IGBTs.

- Desenvolupament i resultats:

La freqüència de commutació dels IGBTs serà com a màxim, equivalent al cicle d'actualització de la generació de l'acció de control. Després de cada execució del cicle principal de l'algorisme de control es genera una acció de control sobre els IGBT, que pot canviar o no l'estat d'aquests. Per calcular la freqüència de commutació màxima a la que es sotmet els IGBTs, es simula el pitjor cas possible, és a dir, un canvi de l'estat dels IGBT a cada cicle d'actualització de la generació de control.

Per tant, en aquest test es calcula quan val el cicle d'actualització de l'acció de control per definir la freqüència màxima de commutació a la que es poden veure sotmesos els IGBTs. Per realitzar aquesta prova, és suficient realitzar-ho amb simulador, donat que es tracta simplement de mesurar quan triga el programa en efectuar la rutina d'actualització de l'algorisme de control.

Per realitzar el test es genera un breakpoint amb la línia de codi "nop" d'assemblador a l'última línia de codi, just després de realitzar l'acció de control (rutina *salida_ALT*). Es captura el valor del temporitzador 3 en aquest punt, tal com es pot observar a la figura II.6.

The screenshot shows a debugger interface with two main panes. The left pane displays assembly code with line numbers 460 to 475. Line 465, containing the instruction `asm("nop");`, is highlighted in green. The right pane, titled "Variables", shows a list of variables with their names, types, addresses, and values. The variable `TMR3` is highlighted in red, with a value of `10390`.

Name	Type	Ad...	Value
polososIC2	int	...	0
polososIC7	int	...	92
polososIC8	int	...	0x00A8
consignapolosint	int	...	135
out	int	...	00000000 00000011
PORTE	SFR	...	00000000 00000001
PORTF	SFR	...	00000000 00000000
WREG0	SFR	0x0	00000000 00000011
WREG1	SFR	0x2	00000000 00000101
WREG2	SFR	0x4	00000000 00000000
control_alt	int	...	00000000 00010011
TMR3	SFR	...	10390

Figura II.6. Primera captura TMR3.

Es repeteix l'operació que s'acaba de realitzar, perquè el programa executi un cicle complet i capturar de nou el valor del temporitzador 3, tal i com es pot observar a la figura II.7.

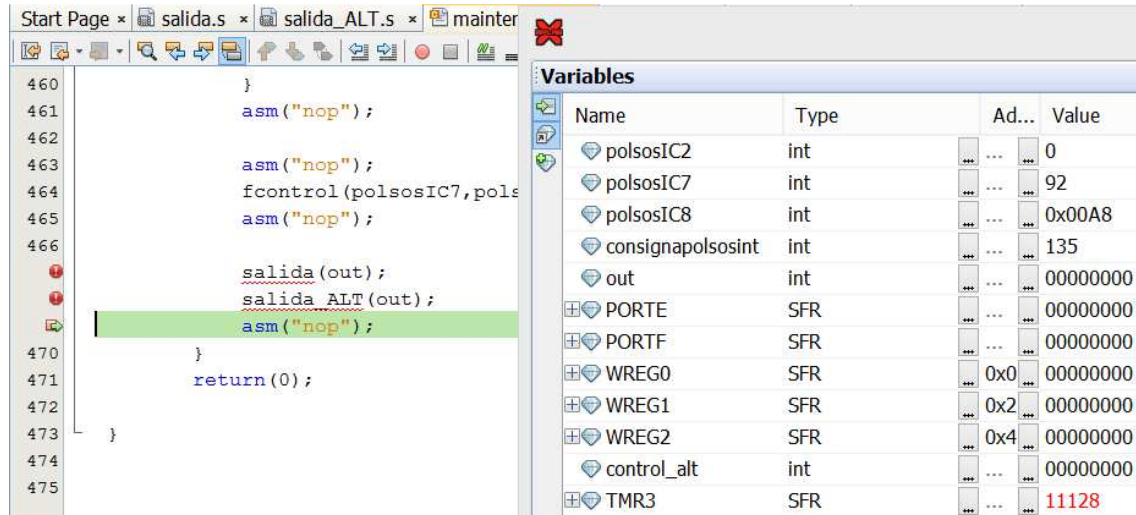


Figura II.7. Segona captura TMR3.

Finalment per calcular la freqüència màxima d'actualització dels IGBT, calclem primer el nombre de polsos per actualització (II.1). Després es calcula el període d'actualització T_{act} , multiplicant el nombre de polsos per actualització per el període del microcontrolador T_{μ} (II.2). La freqüència de commutació dels IGBT, serà igual o menor a la freqüència d'actualització F_{act} (II.3)

$$N_{act} = TMR3_2 - TMR3_1 = 11128 - 10390 = 738 \text{ polsos} \quad (\text{II.1})$$

$$T_{act} = N_{act} \cdot T_{\mu} = 738 \cdot 1,66 \cdot 10^{-7} = 0,123 \text{ ms} \quad (\text{II.2})$$

$$F_{IGBT} \leq \frac{1}{T_{act}} = \frac{1}{0,123 \cdot 10^{-3} \text{ s}} = 8.130,03 \text{ Hz} \quad (\text{II.3})$$

Es conclou que el fet que només amb l'execució de l'algorisme de control i mesura d'intensitats es situï la freqüència d'actualització dels IGBT's en el llindar superior admissible definit per data-sheet és positiu, ja que amb la incorporació de la resta de codi d'Innovem que realitza altres tasques aquesta ha de baixar forçosament; i el marge fins el llindar inferior (2 kHz) és suficient per garantir que els drivers treballen en un bon règim de freqüència.

Annex III. Càlculs subrutina generació consigna.

Per calcular la funció de transformació d'ampers a polsos es realitzen els següents càlculs:

La freqüència de l'integrat IR2175 és de 130 kHz, per tant el seu període serà (III.1):

$$T_{IR2175} = \frac{1}{f_{IR2175}} = \frac{1}{130.000 \text{ kHz}} = 7,69231 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (\text{III.1})$$

La funció duty-cycle dels sensors IR2175 segueix la següent relació segons data-sheet (III.2):

$$\begin{aligned} 0 \text{ A} &\Rightarrow d = 50\% \\ 26 \text{ A} &\Rightarrow d = 91\% \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Els integrats IR2175 estan dissenyats per tenir una resposta lineal, si s'escala la funció duty-cycle (en tant per 1) en funció de la I_{in} , s'extreu la següent expressió (III.3):

$$d(I_{in}) = 0.50 + I_{in} \cdot \frac{\Delta d}{\Delta I_{in}} = 0.50 + I_{in} \cdot \frac{0.91-0.50}{26 \text{ A}} \quad [I_{in} \text{ en Ampers}] \quad (\text{III.3})$$

Desenvolupant la fórmula del duty-cycle d'un període, sabem que el temps en estat alt (T_H) ve definit per l'equació (III.4). El període actiu d'una mesura de corrent (T_{ef}) però, consta de 4 períodes complets (III.5):

$$T_H = d \cdot T_{IR2175} \quad (\text{III.4})$$

$$T_{ef} = 4 \cdot T_H \quad (\text{III.5})$$

El nombre de cicles de rellotge que està la senyal en estat alt en el període actiu (T_{ef}) ve donat per la següent expressió, que depèn del període d'oscil·lació del rellotge intern del microcontrolador (T_{clk}) (III.6):

$$n_{ef} = \frac{T_{ef}}{T_{clk}} \quad (\text{III.6})$$

Per tant, si es vol tenir el nombre de cicles de rellotge efectius que està la senyal en estat alt en funció de I_{in} , es desenvolupa la següent funció (III.7):

$$Nef = \frac{4 \cdot T_H}{T_{clk}}$$

$$Nef(I_{in}) = \frac{4 \cdot d(I_{in}) \cdot T_{IR2175}}{T_{clk}} = \frac{4 \cdot \left(0.50 + I_{in} \cdot \frac{0.91 - 0.50}{26 A}\right) \cdot T_{IR2175}}{T_{clk}} = \frac{4 \cdot \left(0.50 + I_{in} \cdot \frac{0.91 - 0.50}{26 A}\right) \cdot 7,69 \cdot 10^{-6} s}{1,66 \cdot 10^{-7} s}$$

$$Nef(I_{in}) = 2,9122 \cdot I_{in} + 92,30 \quad (\text{III.7})$$

Annex IV. Viabilitat mediambiental.

Llistes de control:

Pregunta	SI	NO	Potser	OBSERVACIONS
1. Quines matèries primeres seran utilitzades?		X		NA. No s'utilitzen materies primeres
1. Com seran obtingudes aquestes matèries primeres?		X		
2. En el sistema d'enviament (transport) de les matèries primeres a la localització prevista, s'han tingut en consideració els possibles impactes de tipus ambiental?		X		
3. Existeix un pla que lligui el projecte als aspectes ambientals d'extracció, transport i emmagatzematge de les matèries primers?		X		

1.1 Capacitat assimilativa de la localització

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. S'han considerat llocs o localitzacions alternatius en un esforç d'evitar o mitigar la degradació ambiental?		X		
2. Es tenen estudis hidrològics, geològics i meteorològics de la localització per anticipar i minimitzar possibles danys a humans, flora i fauna?		X		
3. Les aigües residuals seran abocades directament o indirectament a l'exterior?		X		
4. Quin serà el medi receptor?		X		
5. S'han fet estudis de les propietats físiques, químiques i biològiques, del medi aquàtic receptor, com ara la temperatura, règim de cabals, oxigen dissolt, demanda química d'oxigen?		X		
6. Es generaran residus?, Està prevista la seva caracterització?, On es pensa tractar-los, en el cas que es		X		

1.2 Fase de Disseny del procés

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. Quins elements han de ser incorporats al disseny de la planta des d'un punt de vista ambiental?		X		
2. S'ha considerat la possibilitat d'utilitzar una tecnologia neta, per a tot el procés, o per alguna de les operacions involucrades?		X		

1.4. Fase de Construcció

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El pla constructiu ha pres en consideració els factors ecològics?		X		NA.
2. S'han previst accions per minimitzar el dany ambiental, per la construcció de carreteres, excavacions, farcits, etc.?		X		NA.

1.5. Fase d'Operació

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. S'han previst mecanismes de seguretat en el maneig de matèries perilloses, cas que n'hi hagi?		X		
2. Existeixen riscos d'explosió o abocaments per accident?		X		
3. Està previst un pla de seguretat interna, amb la incorporació de tots els mecanismes operatius necessaris?		X		
4. S'han pres mesures especials en els sistemes d'emmagatzematge de materials perillosos?		X		
5. S'han previst les precaucions corresponents per prevenir les pèrdues dels tancs d'emmagatzematge?		X		
6. Quins tipus i quantitats de corrents residuals es produiran?		X		
7. Quins sistemes de control de la contaminació estan previstos?		X		
8. Els abocaments previstos, en el cas que n'hi hagi, en sistemes aquàtics (rius, llacs, aigües litorals) són compatibles amb els seus usos presents i futurs, particularment durant els períodes d'estiatge?		X		
9. Poden els corrents residuals tenir efectes sinèrgics amb altres materials?		X		
10. Contenen els corrents residuals materials potencialment tòxics?		X		
11. S'han d'esperar efectes dels abocaments d'aigües residuals al medi receptor, com ara desenvolupament d'algues, mort de peixos, etc.?		X		
12. Està previst el seu monitoratge?, Mitjançant mesures puntuals, periòdiques o en temps real?		X		
13. Quins sistemes estan previstos per eliminar els materials tòxics?		X		
14. En cas de produir residus, quin sistema de tractament es pensa utilitzar?		X		
15. S'ha considerat el reciclatge d'aquests residus?		X		
16. Quines previsions hi ha per formar el personal de la planta en els aspectes ambientals de gestió de la mateixa?		X		
17. De quina manera seran controlades les olors?		X		

1.6 Aspectes socials i culturals

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. Com i en quin grau la presència i operació del resultat del projecte altera l'entorn de la seva localització, i afecta les activitats econòmiques i socials?		X		
2. Es crearan o accentuaran problemes d'urbanització?		X		
3. S'haurà produir un augment del trànsit?		X		

1.7 Aspecte de salut

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. S'hauran la produir emissions que afecten directament o indirectament la salut?		X		
2. Quins nous problemes de salut es poden plantejar?		X		
3. Pot el transport atmosfèric o pels aqüífers, de contaminants afectar la salut, a nivell local o regional?		X		
4. Quines mesures s'han pres per assegurar als treballadors un programa de seguretat i higiene?		X		

1.8 Residus finals

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. Quina gestió està prevista fer amb els residus finals?		X		

1.9 Futures expansions

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. De quina manera futurs projectes podran afectar el medi ambient?	X			Si el projecte es materialitza amb la construcció d'un tren

2. PREAVALUACIÓ D'IMPACTE AMBIENTAL

2.1 Factors relacionats amb el projecte

Generalitats

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte provocarà efectes especialment complexos en l'ambient?		X		
2. El projecte significarà una perturbació generalitzada del sòl, neteja del terreny o desbrossament, aplanat o obres subterrànies en gran escala?		X		
3. El projecte significarà alteracions significatives de l'utilització actual o prevista del sòl o de planificació urbanística?		X		
4. El projecte exigirà la construcció d'estructures auxiliars d'abastiment d'aigua, energia i combustible?		X		
5. El projecte pot ocasionar alteracions de les conduccions d'aigua?		X		
6. El projecte pot ocasionar la necessitat de modificar la xarxa de clavegueram?		X		
7. El projecte pot ocasionar modificacions dels desaigües en casos de pluges intenses?		X		
8. El projecte pot ocasionar canvis en les xarxes de conducció elèctrica?		X		
9. El projecte exigirà la construcció de noves carreteres o vies d'utilització de tot terreny?		X		
10. La construcció o explotació del projecte provocarà grans volums de trànsit?		X		
11. El projecte significarà desmunt amb explosius, o activitats semblants?		X		
12. El projecte pot ocasionar un increment de la demanda de fonts d'energia existents o un requeriment de noves fonts d'energia?		X		
13. El projecte serà tancat o clausurat després d'un temps limitat de vida?		X		

Medi atmosfèric

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte provocarà emissions atmosfèriques procedents de l'ús de combustibles, de processos de producció, de manipulació de materials, de les activitats de construcció o d'altres fonts?		X		
2. El projecte exigirà la destrucció de residus a través de la crema a cel obert (per exemple, residus d'explotació forestal o de construcció)?		X		

Medi aquàtic

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte exigirà grans quantitats d'aigua o la producció de grans volums d'aigües residuals o efluent industrial?		X		
2. El projecte significarà una degradació dels models de drenatge existents (incloent la construcció de preses o la desviació de cursos d'aigua o l'augment dels riscos d'inundació)?		X		
3. El projecte exigirà el dragatge de canals o la rectificació del traçat de travessies de cursos d'aigua?		X		
4. El projecte exigirà la construcció de molles o dics?		X		
5. El projecte exigirà la construcció d'estructures mar endins (espigons, plataformes petrolíferes, etc.)?		X		

Producció de residus

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte pot ocasionar gran quantitat de residus inerts?		X		
2. El projecte pot ocasionar gran quantitat de residus tòxics o especials?		X		
3. El projecte exigirà l'evacuació d'escòries o residus del procés d'explotació minera?		X		
4. El projecte exigirà l'evacuació de residus urbans o industrials?		X		
5. El projecte facilitarà la possibilitat d'increment de contaminants?		X		
6. El projecte podrà contaminar els sòls i les aigües subterrànies?		X		

Sorolls, etc.

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte provocarà emissions sonores, vibracions, llum, calor o altres formes de radiació en l'ambient?		X		

Riscos

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte violarà els estàndards d'efluent tòxic?		X		
2. La realització del projecte exigirà l'emmagatzematge, manipulació, utilització, producció o transport de substàncies perilloses (inflamables, explosives, tòxiques, radioactives, cancerígenes o mutagèniques)?		X		
3. L'explotació del projecte exigirà la producció de radiacions electromagnètiques o altres que puguin afectar la salut humana o equipaments electrònics?		X		
4. El projecte exigirà la utilització regular de productes químics de control de paràsits i d'herbes nocives?		X		
5. El projecte podrà registrar una fallada operacional que torni insuficient les mesures normals de protecció de l'ambient?		X		
6. El projecte pot ocasionar riscos d'explotació o emissió de substàncies perilloses (pesticides, substàncies químiques, radiacions) com a conseqüència d'un accident o anomalia?		X		
7. El projecte pot ocasionar possibles interferències amb un pla d'emergència o evacuació?		X		
8. El projecte pot ocasionar possibles descensos de la seguretat laboral?		X		

Aspectes socials

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte pot ocasionar una reducció substancial de la qualitat de l'entorn?		X		
2. El projecte pot ocasionar l'eliminació d'un element singular per la religió?		X		
3. El projecte pot ocasionar algun efecte substancial advers sobre els béns humans?		X		
4. El projecte implicarà llocs de treball per a un gran nombre de treballadors?		X		
5. La mà d'obra tindrà accés apropiat a allotjament i a altres estructures?		X		NA.
6. El projecte implicarà despeses significatives en l'economia local?		X		
7. El projecte provocarà alteracions de les condicions sanitàries?		X		
8. El projecte pot ocasionar alteracions de la localització, distribució, densitat o índex de creixement de la població de l'àrea?		X		
9. El projecte implicarà requisits significatius en termes d'instal·lació de serveis?		X		
10. El projecte pot ocasionar necessitats d'habitatge generant nova demanda?		X		
11. El projecte pot ocasionar alguna incidència o generació de noves necessitats de serveis públics en l'àrea de protecció contra el foc (bombers, ...)?		X		
12. El projecte pot ocasionar alguna incidència o generació de noves necessitats de serveis públics en l'àrea de la policia?		X		
13. El projecte pot ocasionar alguna incidència o generació de noves necessitats de serveis públics en l'àrea de les escoles?		X		
14. El projecte pot ocasionar alguna incidència o generació de noves necessitats de serveis públics en l'àrea de parcs o altres instal·lacions d'esbarjo?		X		
15. El projecte pot ocasionar alguna incidència o generació de noves necessitats de serveis públics en l'àrea de manteniment d'instal·lacions públiques incloent carreteres i carrers?		X		
16. El projecte pot ocasionar alguna incidència o generació de noves necessitats de serveis públics en l'àrea d'altres serveis governamentals?		X		

**2.2 Factors relacionats amb la localització
Protecció Jurídica**

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte es situa en zones designades o protegides per la legislació de l'Estat membre o pròximes a elles?		X		
2. El projecte se situa en una zona en què les normes de qualitat de l'ambient que estableix la legislació de l'Estat membre són violades?		X		

Característiques generals

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte se situa en una zona amb característiques naturals úniques?		X		
2. La capacitat de regeneració de les zones naturals, com zones costanera, muntanyoses i forestals, es veurà afectada, de manera negativa, pel projecte?		X		
3. La zona del projecte registra nivells elevats de contaminació o altres danys ambientals?		X		
4. El projecte se situa en una zona els sòls i / o aigües subterrànies de la qual poden haver estat contaminats ja per usos anteriors?		X		

Dades hidrològiques

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte es situa en terrenys pantanosos, cursos d'aigua o masses d'aigua o en la seva proximitat?		X		
2. El projecte es situa en la proximitat de fonts importants d'aigües subterrànies?		X		

Característiques paisatgístiques i estètiques

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte se situa en una zona d'elevada qualitat i / o sensibilitat paisatgística?		X		
2. El projecte se situa en una zona visible per a un nombre significatiu de persones?		X		

Condicions atmosfèriques

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte se situa en una zona subjecta a condicions atmosfèriques adverses (inversions de la temperatura, boires denses, vent violent)?		X		

Característiques històriques i culturals

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte es situa a les proximitats de patrimonis històric o cultural especialment importants o valuosos?		X		

Estabilitat

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte se situa en una zona propensa a desastres naturals o accidents provocats per causes naturals o artificials?		X		
2. El projecte se situa en una zona de topografia escarpada que pugui ser propensa a esllavissades del terreny, erosió, etc. ?		X		
3. El projecte se situa en una zona litoral, o pròxima a ella, propensa a erosió?		X		
4. El projecte se situa en una zona propensa a terratrèmols o falles sísmiques?		X		

Ecologia

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte es situa a les proximitats d'hàbitats especialment importants o valuosos?		X		
2. Hi ha a la zona espècies rares o en vies d'extinció?		X		
3. El lloc es podria revelar resistent a la reconstrucció natural o programada de la vegetació?		X		

Utilització del sòl

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte entrarà en conflicte amb la política de planificació urbanística o utilització del sòl en vigor?		X		
2. La utilització del sòl proposada podrà entrar en conflicte amb la utilització de sòls veïns (existent o proposta)?		X		
3. El projecte se situa en una zona d'elevada densitat de població o en les proximitats de zones residencials o altres d'utilització del sòl sensibles (ex.: hospitals, escoles, locals de culte, serveis públics)?		X		
4. El projecte se situa en un terreny d'elevat valor agrícola?		X		
5. El projecte se situa en una zona d'importància recreativa / turística?		X		

2.3. Factors relacionats amb l'impacte ambiental

Sòl i Propietats

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte causarà una degradació o pèrdua d'utilització		X		
2. El projecte pot ocasionar canvis de les condicions de sòls inestables o en les subestructures		X		
3. El projecte pot ocasionar trencaments, desplaçaments, compactació o descobriment del sòl?		X		
4. El projecte pot ocasionar canvis en la topografia o característiques del relleu de la superfície del sòl?		X		
5. El projecte pot ocasionar destrucció, modificació o cobriment d'alguna singularitat geològica o característica física?		X		
6. El projecte ocasionarà una degradació general del terreny?		X		
7. El projecte pot ocasionar contaminació del sòl?		X		
8. Hi ha risc d'impacte sobre la infraestructura de suport requerida pel projecte (facilitat de disposició de les aigües residuals, camins, subministrament de sistemes d'electricitat i aigua, escoles)?		X		
9. Hi ha risc d'impacte del projecte en l'ús dels sòls veïns?		X		
10. Hi ha risc d'impacte de les instal·lacions superficials de suport del projecte dels usos dels sòls veïns?		X		
11. Hi ha risc que les obres subterrànies puguin provocar desastres o accidents?		X		
12. El projecte provocarà la demolició d'estructures o l'ocupació de propietats (cases, jardins, establiments comercials)?		X		

Erosió

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. És probable que el projecte provoqui erosió?		X		
2. L'adopció de mesures de control de l'erosió podrà comportar altres efectes adversos?		X		
3. El projecte pot causar algun increment de l'erosió del sòl per vent o aigües tant dins de la instal·lació com fora?		X		
4. El projecte provocarà erosió de dunes, o arrossegament del litoral o alteracions adverses en els sistemes costaners?		X		
5. El projecte pot ocasionar canvis en la disposició de les sorres de les platges, modificació de les lleres de rius i llacs per deposició, sedimentació o erosió i canvis del fons del mar i la costa?		X		

Medi aquàtic

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte provocarà impactes en la quantitat i / o qualitat en els subministraments privats o municipals d'aigua?		X		
2. La utilització d'aigua afectarà la disponibilitat dels proveïments locals existents?		X		
3. El projecte afectarà de forma negativa la qualitat, direcció, flux o volum de les aigües superficials o subterrànies a causa de sedimentació, alteracions hidrològiques o abocaments?		X		
4. El projecte pot ocasionar abocament sobre aigües subterrànies o superficials, o alguna alteració de la qualitat de l'aigua superficial o subterrània incloent temperatura, oxigen dissolt, terbolesa i tots els paràmetres habituals?		X		
5. El projecte pot ocasionar canvis en els corrents, en el curs i direcció de moviments d'aigües, tant dolces com marines?		X		
6. El projecte provocarà un augment de partícules en suspensió?		X		
7. El projecte pot ocasionar canvis en els índexs d'absorció, models de drenatge o en els índexs d'evacuació i buidatge superficial?		X		
8. El projecte pot ocasionar alteracions en el curs o flux d'inundacions i avingudes?		X		
9. El projecte provocarà canvis de fluctuació del nivell d'aigua?		X		
10. El projecte provocarà canvis en els gradients de salinitat?		X		
11. El projecte pot ocasionar canvis en la quantitat d'aigües subterrànies, tant a través d'addicions directes o extraccions, o mitjançant la interrupció d'algun aquífer per tall o excavacions?		X		
12. L'alteració natural del curs de l'aigua exercirà un efecte negatiu en els hàbitats naturals (per exemple, velocitat del cabal d'aigua i piscicultura) o altres utilitzacions de l'aigua (pesca, navegació, banys)?		X		
13. El projecte provocarà impacte en la sostenibilitat de les piscifactories tant comercials com recreatives?		X		
14. El projecte provocarà impacte en tot el referent a activitats recreatives relacionades amb l'aigua?		X		
15. El projecte ocasionarà alteracions significatives dels models de l'acció de les ones, moviment de sediments o augment de la circulació de l'aigua?		X		
16. El projecte limitarà la utilització de l'aigua per a fins recreatius, de pesca esportiva, pesca, navegació, recerca, conservació o de caràcter científic?		X		
17. El projecte provocarà la possibilitat d'impacte en l'aigua segons els resultats de tests físics, químics i biològics?		X		
18. El projecte provocarà la possibilitat d'impactes en els sediments segons els resultats de tests físics, químics i biològics?		X		
19. El projecte provocarà la possibilitat d'impactes en els corrents aigües avall?		X		
20. El projecte provocarà impacte en els valors de producció d'aiguamolls?		X		
21. El projecte provocarà impacte en els valors per a la protecció de les zones humides dels desastres naturals (inundacions, grans tempestes ...)?		X		
22. El projecte provocarà impacte com a resultat de la sedimentació obstructiva?		X		
23. El projecte provocarà impacte en la separació i reciclatge dels nutrients inorgànics per les marees?		X		
24. El projecte provocarà impacte en les aigües dels estuaris?		X		
25. El projecte provocarà impacte en la presència d'aiguamolls únics o amb característiques geològiques úniques?		X		

26. El projecte pot ocasionar exposició de persones o propietats a riscos d'aigües com inundacions, temporals o sismes submarins?		X		
---	--	---	--	--

Qualitat de l'aire

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte pot ocasionar considerables emissions atmosfèriques o deteriorament de la qualitat de l'aire?		X		
2. Les emissions provocades pel projecte poden afectar de forma negativa la salut o el benestar humà, la fauna o la flora, els recursos materials o altres?		X		
3. Les emissions provocades pel projecte poden afectar de forma negativa la salut o el benestar humà, la fauna o la flora, els recursos materials o altres?		X		
4. El projecte pot ocasionar olors molestos?		X		
5. El projecte pot ocasionar generació de pols?		X		

Condicions atmosfèriques

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte pot ocasionar alteració dels moviments de l'aire, humitat o temperatura o canvis en el clima tant local com regional?		X		
2. El projecte provocarà alteracions del medi físic que puguin afectar les condicions microclimàtiques (turbulència, zones de gel, augment de la humitat, etc.)?		X		
3. El projecte pot ocasionar exposició de persones o béns a riscos geològics, com sismes, esllavissades de terra, allaus de fang, etc.?		X		

Soroll, etc.

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte pot ocasionar increment dels nivells de soroll existents?		X		
2. El projecte pot ocasionar exposició de les persones a sorolls excessius?		X		
3. El projecte pot ocasionar un augment considerable de les radiacions lumíniques o enlluernaments?		X		
4. El projecte tindrà repercussions en les persones, estructures o altres receptors / elements sensibles o sorolls, vibracions, llum, calor o altres formes de radiació?		X		

Ecologia

Pregunta	SI	NO	Quizás	Observaciones
1. El projecte provocarà una reducció de la diversitat genètica?		X		
2. El projecte provocarà la pèrdua física del substrat i del seu hàbitat?		X		
3. El projecte provocarà la pèrdua o degradació d'hàbitats especialment valuosos, d'ecosistemes o d'hàbitats		X		
4. El projecte provocarà impactes en la presència de plantes o animals rars o únics al lloc?		X		
5. El projecte provocarà impactes en la presència de		X		

6.	El projecte pot ocasionar un descens de la població piscícola o fauna per sota dels límits		X		
7.	El projecte pot ocasionar la introducció de noves espècies de plantes en l'àrea o de barreres per al desenvolupament normal de les espècies existents?		X		
8.	El projecte pot ocasionar la reducció del rendiment d'alguna plantació agrícola?		X		
9.	El projecte pot ocasionar canvis en la diversitat d'espècies vegetals, o el nombre d'algunes espècies de plantes (incloent arbres, arbusts, herbes, plantacions o plantes subaquàtiques)?		X		
10.	El projecte provocarà impactes en els components de la cadena alimentària aquàtica?		X		
11.	El projecte provocarà el deteriorament de la reproducció		X		
12.	El projecte provocarà impactes en els mamífers		X		
13.	El projecte provocarà impactes en els peixos associats amb els ecosistemes aquàtics?		X		
14.	El projecte provocarà impactes en les aus associats amb els ecosistemes aquàtics?		X		
15.	El projecte provocarà impactes en els rèptils associats amb els ecosistemes aquàtics?		X		
16.	El projecte provocarà impactes en localitzacions aquàtiques especials (marines, en refugis o en santuaris marins)?		X		
17.	El projecte provocarà impacte en / o eliminació dels aiguamolls?		X		
18.	El projecte provocarà impacte en / o eliminació de fangars?		X		
19.	El projecte provocarà impacte en / o eliminació de la vegetació en aigües poc profundes?		X		
20.	El projecte provocarà impacte en / o eliminació de		X		
21.	El projecte provocarà la possibilitat d'impactes en els bentos (flora i fauna que es troba al fons del llac o del mar)?		X		
22.	El projecte provocarà algun grau d'estrès en les estructures de comunitats biològiques?		X		
23.	El projecte pot provocar canvis en la diversitat d'espècies animals, o el nombre d'algunes espècies d'animals (aus, mamífers, rèptils, amfibis, peixos, insectes, crustacis, mol·luscs o qualsevol altre organisme superior)?		X		
24.	El projecte pot ocasionar la introducció de noves espècies d'animals en l'àrea o de barreres al moviment d'espècies migratòries?		X		
25.	El projecte pertorbarà o perjudicarà la capacitat de reproducció de les espècies o afectarà de forma negativa la migració o les zones d'alimentació, cria, reproducció o descans o comportarà obstacles significatius de les migracions?		X		
26.	Els impactes en termes de soroll, vibracions, llum o calor provocades pel projecte pertorbaran a les aus o altres		X		
27.	El projecte pertorbarà processos ecològics essencials als sistemes biòtics?		X		
28.	El projecte provocarà la introducció d'herbes nocives, paràsits o malalties, o ajudarà a la propagació d'organismes patògens coneguts, d'organismes nocius		X		
29.	El projecte implicarà a gran escala la utilització de plaguicides, fertilitzants o d'altres productes químics que puguin generar residus en el medi terrestre o		X		
30.	El projecte augmentarà de forma significativa els riscos d'incendi?		X		
31.	La sedimentació resultant del projecte provocarà efectes adversos en la vida aquàtica a causa d'una disminució de la llum disponible?		X		

Característiques paisatgístiques i estètiques

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte afectarà de manera significativa una zona paisatgísticament atractiva o històrica o culturalment important?		X		
2. El projecte afectarà el panorama del lloc, estant a la vista d'un nombre significatiu de persones?		X		
3. El projecte provocarà impacte en l'estètica-presència de plantes o animals amb alta qualitat visual?		X		
4. El projecte provocarà impacte en l'estètica-presència d'una massa d'aigua associada?		X		
5. El projecte provocarà impacte en l'estètica-tipus d'aiguamolls o diversitat topogràfica?		X		
6. El projecte pot ocasionar una obstrucció per la visibilitat del paisatge o suposarà una visió antiestètica del		X		

Impactes relacionats amb el trànsit

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte conduirà a alteracions significatives del trànsit (rodat o un altre), amb els conseqüents efectes per a la resta d'usuaris en termes de soroll, qualitat de l'aire, confort, etc., i impactes per altres		X		
2. Les alteracions de l'accessibilitat resultants del projecte conduiran a un augment del potencial del desenvolupament de la zona?		X		
3. El projecte pot ocasionar la generació d'un substancial increment en el moviment de vehicles?		X		
4. El projecte pot ocasionar un augment del nombre d'aparcaments?		X		
5. El projecte pot ocasionar un impacte substancial sobre els sistemes de transport existents?		X		
6. El projecte pot ocasionar una alteració dels models de circulació existents o moviments de persones i / o béns?		X		
7. El projecte pot ocasionar alteracions en el trànsit marí, aeri o ferroviari?		X		
8. El projecte pot ocasionar un increment dels riscos de trànsit per a vehicles de motor, ciclistes o transeünts?		X		

Impactes socials i de la salut

Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte afectarà de manera significativa el mercat laboral o immobiliari de la zona?		X		
2. El projecte provocarà la divisió física d'una població existent?		X		
3. El projecte conduirà a una escassetat d'infraestructures socials en haver de fer front a un augment temporal o permanent de població o de l'activitat econòmica?		X		
4. El projecte afectarà de manera significativa les característiques demogràfiques de la zona?		X		
5. El projecte provocarà impacte en qualitats educacionals o científiques?		X		
6. El projecte pot ocasionar l'exposició de la població a riscos potencials de salut?		X		
7. El projecte pot ocasionar una disminució de la qualitat i / o quantitat de possibles activitats recreatives?		X		
8. El projecte pot ocasionar una alteració o destrucció de béns arqueològics?		X		
9. El projecte pot ocasionar molèsties físiques o estètiques per a monuments arquitectònics existents?		X		
10. El projecte pot ocasionar un canvi potencial sobre el medi físic que podria afectar valors culturals ètnics?		X		
11. El projecte pot ocasionar restriccions dels usos religiosos i folklòrics a la seva zona d'influència?		X		

Altres

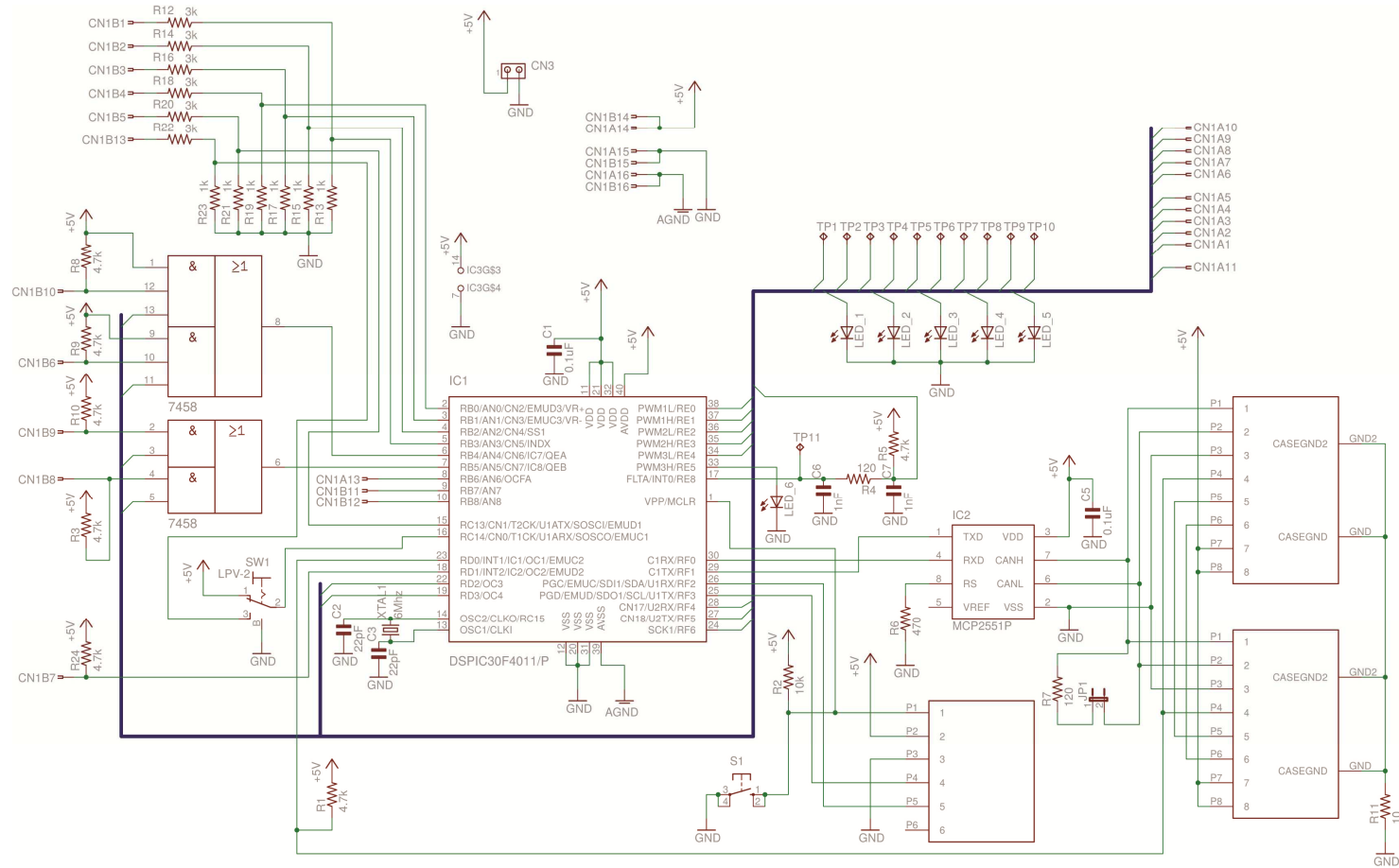
Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. Els efectes seran irreversibles?		X		
2. Els efectes són acumulatius amb els d'altres projectes?		X		
3. Els efectes seran sinèrgics?		X		
4. Existeix la possibilitat d'impactes secundaris adversos?		X		

2.4 Consideracions de caràcter general

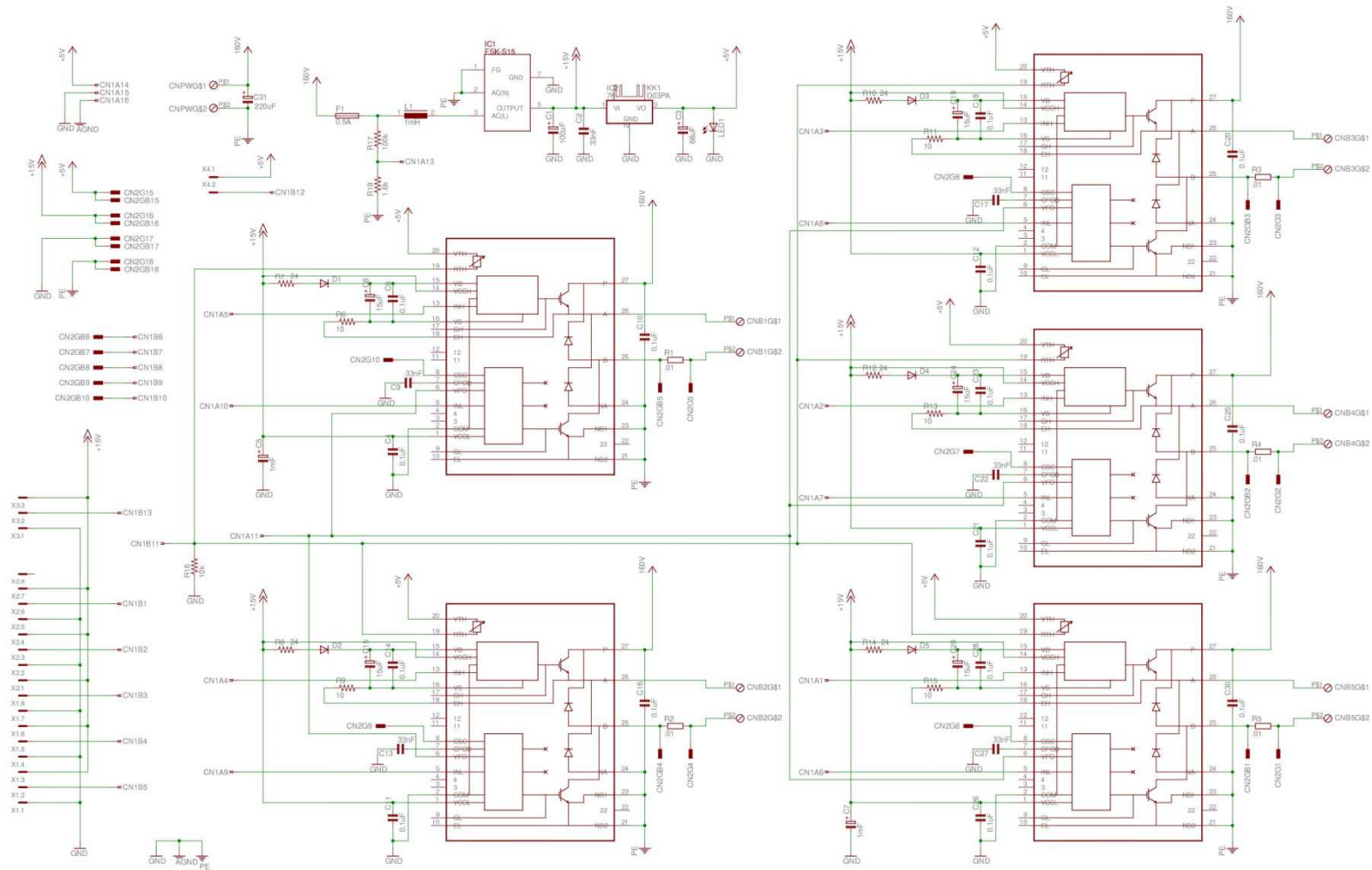
Pregunta	SI	NO	Potser	Observacions
1. El projecte provocarà controvèrsia pública? El projecte pot suscitar grans preocupacions?		X		
2. Hi ha efectes transfronterers que hagin de ser tinguts en compte?		X		
3. El projecte portarà a les generacions futures a efectes irreversibles o inevitables?		X		
4. El projecte entrarà en conflicte amb la política o legislació internacional, nacional o local en vigor?		X		
5. El projecte exigirà una alteració de la política ambiental en vigor?		X		
6. Existeix legislació sobre el control de la contaminació, que garanteixin l'atenció deguda als impactes ambientals del projecte?		X		
7. El projecte tindrà una importància que excedeixi de l'àmbit local?		X		
8. El projecte implicarà eventuais efectes incerts o que impliquin riscos únics o desconeguts?		X		
9. El projecte pot ocasionar algun rebuig per part d'associacions o organitzacions populars sobre els efectes mediambientals del projecte?		X		
10. El projecte proporcionarà estructures que aconseguixin incentivar un desenvolupament posterior (induït), per exemple a través de l'oferta d'una infraestructura de serveis (urbanització, desenvolupament industrial,		X		
11. El projecte necessitarà d'una manera significativa algun recurs l'oferta pugui tornar escassa?		X		
12. El projecte tindrà impacte en l'increment de despeses o ingressos de l'estat, país o govern local (increment de les despeses de les instal·lacions de suport o increment dels ingressos per impostos)?		X		
13. El projecte tindrà impacte econòmic - valor dels aiguamolls com a font de nutrients i / o hàbitat per a la vida aquàtica?		X		
14. El projecte tindrà impactes econòmics - valor com a àrea recreativa?		X		
15. El projecte tindrà impactes econòmics - valor per control d'inundacions / prevenció d'inundacions?		X		
16. El projecte tindrà impactes econòmics - costos de manteniment de ports?		X		
17. El projecte tindrà impacte econòmic en el públic (tant públic com privat) de les instal·lacions de suport al projecte?		X		
18. El projecte tindrà impacte econòmic (tant públic com privat) en la utilització de sòls veïns?		X		
19. Hi ha una o més alternatives del projecte raonablement practicables que compleixin amb els objectius del projecte amb un menor impacte ambiental advers?		X		

Annex V. Esquemes electrònics (cortesia Innovem).

1. Circuit de control



2. Circuit de potència.



Annex VI. Contingut del CD-ROM.

- Documentació del projecte (memòria, estudi econòmic, annexos).
- Datasheets dels components del prototip i guies d'usuari entorn programació.
- Notes d'aplicació del IR2175
- Arxius programa control i lectura corrents en MPLAB X.