

# Construcció i control d'un banc d'assajos per docència en accionaments elèctrics

Ivan Cortés i Pujadas

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú  
Universitat Politècnica de Catalunya

## Resum

En aquest treball de final de màster es realitza una aportació sobre la modelització i construcció d'una bancada d'assajos per un ús acadèmic.

En primer lloc es fa una presentació dels antecedents de la línia de treball i dels els objectius. En segon lloc, es realitza una recopilació mitjançant un estat de l'art dels elements del laboratori amb els que es construirà la bancada.

En tercer lloc es realitzen un seguit d'assajos amb el motor del laboratori per tal d'aconseguir les característiques del motor amb el que s'està treballant. En quart lloc es dissenya un model digital seguint aquestes característiques amb el que es pretén decisions sobre el tipus de control que es durà a terme. En cinquè lloc es simula el model per tal de validar que tingui els mateixos resultats que el del laboratori. També es simulen els diferents controls per tal d'extreure uns resultats amb els que poder comparar posteriorment.

Una vegada validats els models de control s'implementa el model dissenyat a la bancada del laboratori, fent en últim lloc un seguit d'assajos que permeten comparar amb els resultats de la simulació per validar la solució aportada.

## 1. Introducció

La idea del treball parteix d'unificar els coneixements de dues de les assignatures contingudes en el *Màster en Sistemes Automàtics i Electrònica Industrial*. Aquestes assignatures són *Modelització i Control de Màquines Elèctriques* i *Sistemes Encastats i de Temps Real*.

Amb el pla docent de totes dues assignatures en ment es pretén construir un banc d'assajos funcional en el que es puguin practicar exercicis tant de control del motor DC com diferents implementacions del codi a la plataforma del sistema encastat.

Una vegada modelat i implementat el sistema a la bancada, els diferents assajos que s'apliquen als accionaments podran ser visualitzats i controlats, a través de la aplicació sèrie de l'Arduino, a forma de poder canviar els valors de consigna i veure representades diferents gràfiques en temps real que donin informació sobre l'estat dels paràmetres del sistema com la velocitat i el parell.

## 2. Estat de l'art

Una bancada d'assajos és un espai de treball utilitzat per la verificació i constatació de la apropiada i correcta funcionalitat d'un objecte en particular. Pel que fa referència al treball, es tracta d'un sistema mecatrònic

capaç de realitzar proves i comprovacions d'un accionament elèctric en particular.

El sistema d'un banc d'assajos general es pot dividir en tres subsistemes:

- **El subsistema motor:** Elements que tenen acció directa a l'accionament del motor.
- **El subsistema de fre o carrega:** Elements relacionats amb la generació de carrega. Permet crear condicions determinades de velocitat i parell per assajar el motor.
- **El subsistema de monitorització i control:** Mesura els altres subsistemes i utilitza les dades obtingudes per realitzar control.

La bancada d'assajos del laboratori consta dels elements que es poden veure en la representació esquemàtica de la Figura 1.

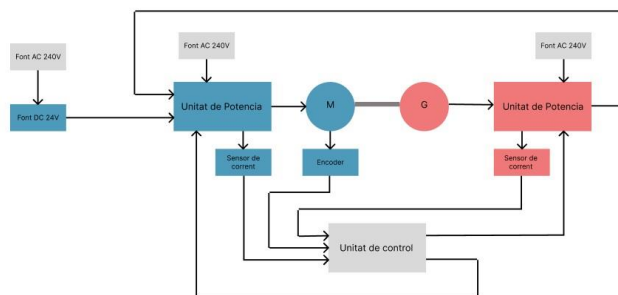


Fig. 1. Diagrama de blocs de la bancada del laboratori

- **Motor-Generador:** Es tracta de dos motors iguals acoblats entre si. La alimentació ve donada per una font de corrent contínua de 24V.
- **Encoder:** Encoder òptic incremental fotoelèctric, model HEDM-500.
- **Unitat de potència GPT-IGBT UV:** Es fa servir com a convertidor i trossejador per regular la tensió DC que alimenta el motor i així la seva velocitat. A la banda del fre la seva funcionalitat de trossejador, tancant i obrint un el circuit de la carrega a través d'un IGBT per regular el parell.
- **Unitat de control:** S'utilitza la placa Arduino UNO R3, que utilitza el microcontrolador ATmega328/P.

### 3. Modelització del sistema de bancada

El primer pas per modelar el motor en l'entorn digital es obtenir les característiques del motor perquè el model es comporti de manera aproximada al motor físic. Per fer-ho es fan un seguit d'assajos, que, junt amb la placa de característiques del motor permeten obtenir els seus paràmetres característics.

En primer lloc es mesura la corrent i la velocitat a la que gira el motor al vuit per diferents tensions. Per calcular la resistència interna del motor es bloqueja el motor manualment, de forma que no es generi FEM, i es calcula a partir de les mesures de corrent i voltatge.

A partir de les equacions del motor en règim permanent

$$R \left( \frac{I}{\omega} \right) + K = \left( \frac{V}{\omega} \right) \quad [1]$$

$$f \omega + c = KI \quad [2]$$

es pot trobar el valor de de la constant  $K$ .

Es mesura la inductància induïda.

Es pot observar de l'expressió [2] que s'assembla a l'equació d'una recta, on  $f$  es la pendent i  $c$  el desfasament. D'aquesta forma, coneixent la constant  $K$ , la corrent i la velocitat es poden calcular les constants de fricció viscos i  $\sec f$  i  $c$ .

El moment d'inèrcia s'obté mitjançant un assaig de desacceleració, girant en vuit i a la velocitat que s'obté quan s'alimenta el motor a tensió nominal. En aquest moment es deixa d'alimentar i es pren la forma d'ona de la velocitat. Degut a que es un motor d'imants permanents, el moment d'inèrcia calculat no té en compte les pèrdues magnètiques pels imants. Com el control que es vol fer es un control de velocitat i parell, aquestes pèrdues no afecten el resultat.

Com a resum dels resultats obtinguts es presenta la Taula 1, on hi trobem els paràmetres característics del motor.

Paràmetre	Valor	Unitat
R	0.6073	$\Omega$
L	298.6	$\mu\text{H}$
K	0.0624	
f	0.0001	
c	0.0283	
J	0.00029844	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$

Taula 1. Paràmetres del motor

Per tal de fer les simulacions en l'entorn digital Simulink, es fa servir el model elèctric equivalent del motor de corrent contínua ja que el programa es basa en la simulació de circuits elèctrics.

La FEM  $E$  es simularà mitjançant una font de tensió controlada per la intensitat del circuit, directament proporcional a la velocitat de rotació. El parell  $M$  serà simulat mitjançant una font de tensió controlada per la corrent del circuit de la part elèctrica. La carrega  $Mc$  es simularà a través d'una font de tensió controlada per una constant que tindrà el valor de la carrega que es vulgui simular. Finalment el model elèctric del motor queda tal i com es mostra a la Figura 2.

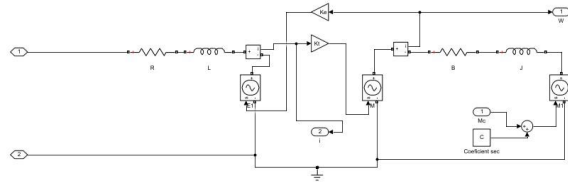


Fig. 2. Model elèctric del motor DC

Tot i ser el mateix accionament, en el model del motor de corrent contínua que funciona com a generador s'han de fer un seguit de modificacions perquè el comportament del model de simulació sigui una aproximació del comportament de l'accionament físic.

En aquest cas, la velocitat angular, en l'analogia una corrent, es una entrada al generador, reproduint l'acoblament al motor es la única simulació de la part mecànica del model. Aquesta intensitat controlarà una font de tensió controlable que simula la FEM  $E$  que es genera com a conseqüència del moviment del rotor, on s'hi troben les pèrdues en forma de resistència i inductància.

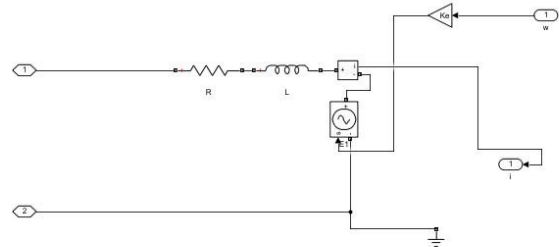


Fig. 3. Model elèctric del generador

Per comprovar que el model elèctric del motor es comporta de la forma desitjada es fa una simulació reproduint els assajos descrits al principi d'aquest apartat i es comparen els resultats amb els obtinguts al laboratori, tal i com es pot veure a la Figura 4.

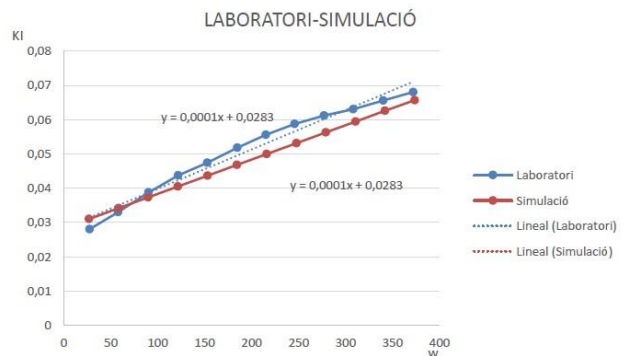


Fig. 4. Comparativa Laboratori-Simulació per la comprovació del model

Una vegada comprovat que el model funciona de manera adequada es fan un seguit de simulacions i d'assajos que permeten conèixer millor quines són les zones de treball del motor i els seus límits. L'objectiu es aconseguir el mapa motor de l'accionament i delimitar la carrega a la que pot treballar el motor així com obtenir informació de la potencia i el rendiment.

#### 4. Disseny i implementació del control de velocitat

Una vegada obtingut un model apte per realitzar simulacions en l'entorn digital es pot dissenyar un sistema de control. S'ha pres la decisió de dividir el control total del sistema en dos controls, el de velocitat i el de parell, que són dissenyats per separat.

La simulació de la regulació de velocitat del motor de corrent contínua es realitza a través d'un controlador PI, un control PWM i un trossejador de tensió. Per fer el control es fan dos realimentacions, un llaç de velocitat i un llaç de corrent, tal i com es veu a la Figura 5.

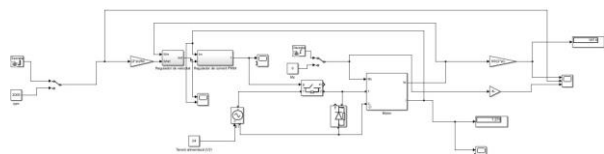


Fig. 5. Esquema del control de velocitat

El regulador de velocitat PI compara la velocitat del motor amb la velocitat de la referència. Això crea un error de velocitat que mitjançant una constant proporcional i una integral dona una corrent de referència que serveix com a consigna del regulador de corrent PWM. Aquesta corrent es limita per evitar pics de corrent.

El regulador de corrent PWM compara la corrent de referència que ve de la sortida del regulador de velocitat, a través d'un controlador PI, amb la corrent induïda al motor. Això proporciona una senyal de referència que fa variar el temps de connexió i desconnexió simultàniament. Això s'aconsegueix comparant una senyal triangular amb la senyal de referència. Quan la senyal de referència és més gran que la triangular es connecta l'interruptor.

S'ha utilitzat un convertidor CC/CC com a trossejador. Aquest tipus de convertidor permet controlar el motor a través de l'alimentació a partir de la senyal que genera el controlador PWM. Aquesta senyal activa o desactiva un interruptor estàtic del convertidor.

La primera simulació que es fa consisteix en aplicar diferents consignes de velocitat amb el motor sense carrega. Tal i com es pot veure a la Figura 6.

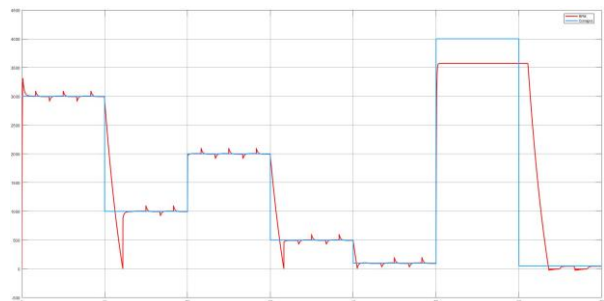


Fig. 6. Simulació del control de velocitat

Es pot observar com el motor segueix la consigna, així que es pot determinar que el control funciona. En el cas d'accelerar, el control es molt ràpid, pot passar d'una velocitat a un altre de més gran en poc temps. En el cas de

desaccelerar el control es més lent, ja que tarda un parell de segons en adaptar-se a la nova velocitat de consigna.

A la segona simulació s'hi afegeixen diferents carregues a les velocitats assajades anteriorment. Es dimensionen també les constants del controlador PI.

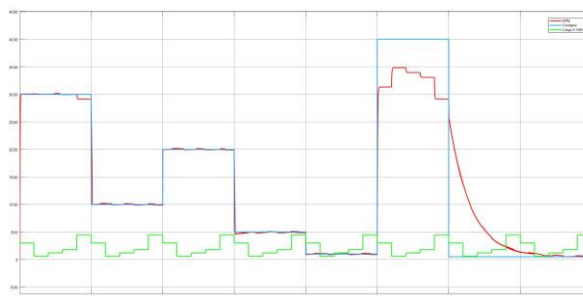


Fig. 7. Simulació de la velocitat amb carrega i PI ajustat

Es pot observar com el control funciona per a les diferents carregues tenint en compte dues coses. En el cas de la carrega a 0.45 N·m, per una consigna de 3000 rpm, la velocitat es veu limitada i no arriba a complir amb la consigna. Es pot veure com la carrega limita la velocitat màxima a la que el motor pot arribar quan la consigna es de 4000 rpm, sent la velocitat màxima inversament proporcional a la carrega que s'aplica al motor.

L'ajust de les constants del PI ha millorat el comportament del control fent-lo més ràpid i eliminant els pics de velocitat.

#### 5. Disseny i implementació del control de parell com a carrega variable

El principi del control de parell es basa en la tècnica de fre dinàmic. Aquesta consisteix a frenar el motor mitjançant la dissipació de la corrent induïda a través d'una resistència. Per aconseguir que el generador es comporti com a una Font de carrega variable es trosseja la corrent que circula per la resistència de fre, deixant passar corrent quan es necessari.

Es disposen de dos llaços de control, un per la regulació del parell, que consisteix en un PI que dona com a resultat una corrent de referència, i un altre de corrent, que compara la corrent induïda amb aquesta corrent de referència i aplica un control per histèresi de manera que si la corrent induïda es major a la de referència l'interruptor s'obre, i si es menor es tanca.

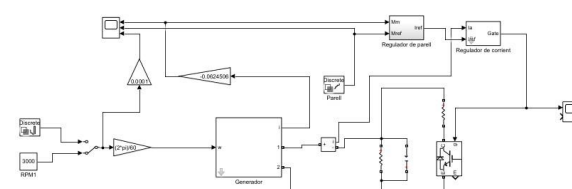


Fig. 8. Esquema del control de parell

A la Figura 8 es pot observar el trossejador de corrent, que consta d'una resistència de fre de 3.3 Ω on es dissipa la corrent induïda. Quan l'interruptor està obert es deriva la corrent a un circuit amb una resistència molt més gran que la de fre amb un condensador. Aquest segon circuit es necessari ja que la variació elevada de flux pot malmetre el circuit elèctric del motor.

La simulació que se li fa al model consisteix a introduir diferents consignes de parell al motor a diferents velocitats amb l'objectiu de comprovar que el control està funcionant correctament i trobar els límits del control dissenyat.



Fig. 9. Simulació del control de parell a 3000 rpm

A la Figura 9 es pot observar el funcionament de parell per a les diferents consignes. Es pot determinar que el control està funcionant correctament. Es destacable que quan es supera el límit de parell que pot donar el generador, el control manté el parell al valor màxim que la velocitat del motor el permet. Després d'una situació en la que el control es troba limitat per la velocitat, encara que la consigna baixi a un parell dins dels límits controlables, aquesta tarda un temps més llarg en recuperar el control.

A la Figura 10 es pot observar la relació entre el parell màxim que es capaç d'aportar el control i la velocitat a la que gira.

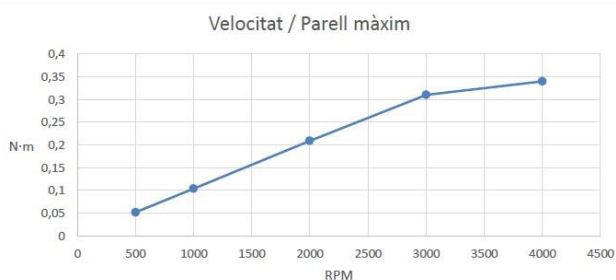


Fig. 10. Relació Velocitat / Parell màxim

## 6. Simulació del sistema complet i assajos a la bancada

A l'hora de simular el sistema s'ha de tenir en compte les entrades y les sortides que tenen el motor i el generador i com afecten a l'altre. El motor, es el que està rebent l'alimentació, i com a conseqüència gira a una velocitat determinada pel control. Aquesta velocitat serà una entrada per al generador, que a partir d'aquesta generarà una corrent i a través de la dissipació de la resistència generarà un parell determinat pel control que pel motor serà una entrada en forma de carrega. Tenint en compte aquestes dues connexions entre el motor i el generador el sistema queda representat com es veu a la Figura 11.

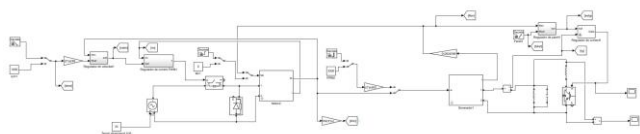


Fig. 11. Esquema del sistema complet

El sistema es simula amb l'objectiu de comprovar que els dos controls funcionen de la forma esperada.

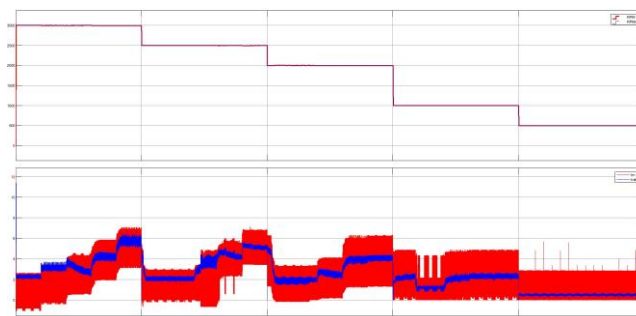


Fig. 12. Simulació del control de velocitat i corrent del sistema complet

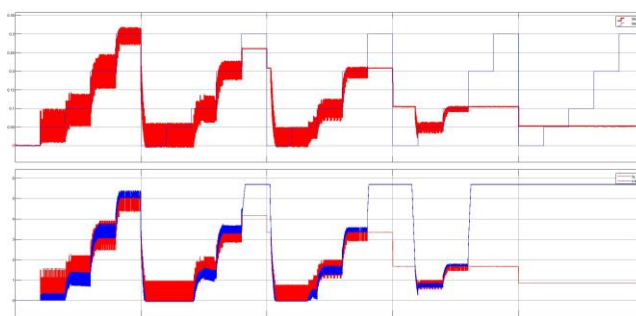


Fig. 13. Simulació del control de parell i corrent del sistema complet

A les Figures 12 i 13 es pot observar com els controls de velocitat i de parell continuen funcionant dins dels seus límits al model complet de la bancada. El control de parell ve molt més limitat que el control de velocitat. Es pot veure com per a velocitats grans, al control li és més difícil mantindre una consigna precisa, per lo que el rang en el que fluctua el parell és més ampli que per a velocitats més petites. Es pot observar també com per a velocitats molt petites, el control de parell no arriba a poder controlar ja que no es capaç d'aconseguir una corrent suficientment gran com per arribar a la consigna que se li demana. Podem veure també que en cap dels controls els pics de corrent superen els 7 Ampers, pel que no hi ha perill de malmetre el motor.

La implementació dels controls a la bancada a través del microcontrolador Arduino es basa en la lectura de la velocitat a través del encoder i de la corrent a través dels pins del convertidor. Aquesta lectura es fa en temps real i tot seguit el microcontrolador aplica el codi per obtenir a les sortides la senyal que controlarà el IGBT dels convertidors i així realitzar el control.

Amb la lectura de la velocitat i de la corrent s'assagen els controls que han sigut implementats als seus codis corresponents.

S'assagen diferents velocitats i diferents parells sent els resultats més significatius els que marquen els límits permesos pel motor tal i com s'ha vist a les simulacions.

Quan el motor es troba dins dels límits establerts per les característiques del motor els controls es comporten de la forma esperada. A les Figures 14 i 15 es pot observar com el motor manté una consigna de 3000 rpm a 0,1 N·m fixos a través dels controls.

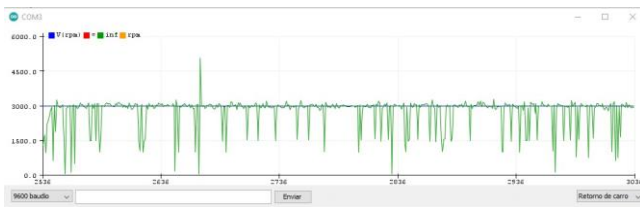


Fig. 14. Velocitat. Assaig a 3000 rpm i 0.1 N-m

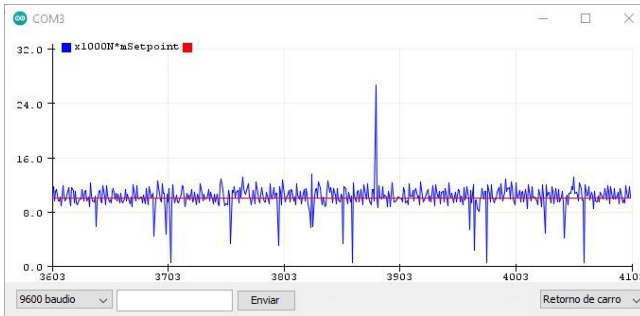


Fig. 15. Parell. Assaig a 3000 rpm i 0.1 N-m

Es pot observar com el control de parell no es tan exacte com el control de velocitat. Això té a veure amb el fet que la resistència amb la que es du a terme el control només té dos valors que amb els que el control pot regular la corrent, tal i com es pot comprovar també a la simulació.

En el cas en el que algun dels dos controls excedeix el límit que el motor permet per les seves característiques el control es queda limitat al màxim al que pot proporcionar, tal i com es pot veure a les Figures 16 i 17.

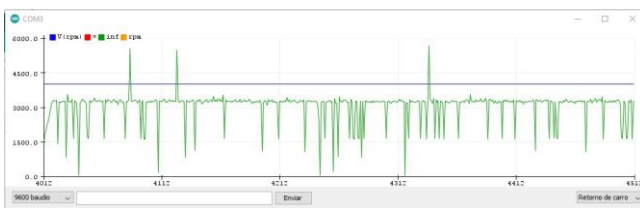


Fig. 16. Velocitat. Assaig a 4000 rpm i 0.1 N-m

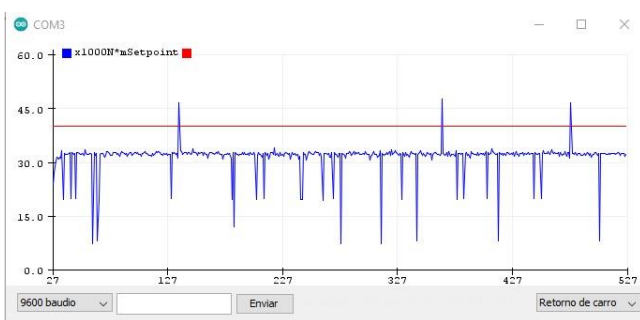


Fig. 17. Parell. Assaig a 3000 rpm i 0.4 N-m

Així com la velocitat ve limitada exclusivament per les característiques del motor i la corrent màxima a la que s'ha limitat la sortida del regulador de velocitat, el control de parell ve limitat també per la velocitat a la que està girant el motor. D'aquesta manera, com menor es la velocitat a la que el motor gira, menor es el parell màxim que el generador es capaç de proporcionar.

Límits inferiors es refereix a la velocitat i el parell mínims als quals es pot controlar la bancada.

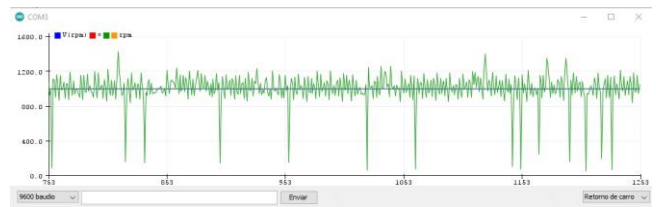


Fig. 18. Velocitat. Assaig a 1000 rpm i 0.05 N-m

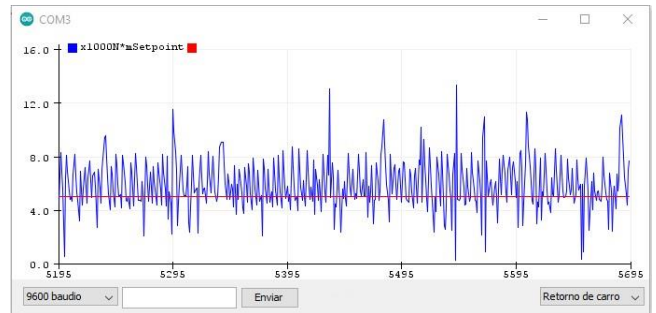


Fig. 19. Parell. Assaig a 1000 rpm i 0.05 N-m

Aquest es l'assaig que més diferència té amb la simulació. Això es degut a que hi ha altres factors a part de les limitacions del motor i l'ajust dels PI, que són les úniques que es tenen en compte a la simulació. També s'hi troba el factor del dispositiu que emet les senyals de control del IGBT, es a dir l'Arduino, que té unes freqüències de mostra, de compilació i de emissió determinats que afecten al comportament del sistema.

Tal i com es pot veure a les Figures 18 i 19, tot i que el sistema s'està controlant, el control es molt bast, tenint desviacions de velocitat de fins a 200 rpm i desviacions de parell de 0.03 N-m, si ho comparem amb les gràfiques de les Figures 14 i 15, on el les consignes es troben dins a valors no límit. El rissat de les senyals es molt significatiu respecte de la consigna que se li demana al sistema de control.

## 7. Pressupost

En aquest apartat es descriuen els costos de desenvolupament que fan referència als recursos utilitzats i al temps de dedicació a la investigació, desenvolupament de la documentació i disseny dels models necessaris per dur a terme el treball.

Descripció	Hores Invertides	Cost
Estudi teòric	50	625€
Investigació	100	1250€
Construcció del Model	40	500€
Simulacions	50	1600€
Documentació	150	625€
Serveis tècnics	100	1250€
Software	2	163€
Dispositius i Materials	8	3000€
TOTAL	500	9613€

Taula 2. Cost del desenvolupament

## 8. Conclusions

Una vegada finalitzat el treball proposat es fa una recapitulació dels objectius del treball conclouent fins a quin grau ha estat el compliment de les metes.

El principal objectiu d'aquest treball des del seu origen era la construcció d'una bancada d'assajos funcional que permetés posar en pràctica els coneixements impartits a les assignatures de *Sistemes Encastats i de Temps Real* i de *Modelització i Control de Màquines Elèctriques*. Aquest objectiu ha estat complert obtenint com a resultat una bancada d'assajos on s'hi poden fer assajos del motor i assajos del sistema encastat que conforma el sistema de control de la bancada.

Tot i que compleix l'objectiu proposat a l'inici del projecte de tenir un ús pràctic per a la docència, una vegada finalitzat es pot concloure que la plataforma utilitzada, el microcontrolador Arduino, no és la tecnologia més adequada per dur a terme aquesta mena d'aplicacions. Aquesta plataforma té moltes limitacions tant a nivell de lectura i emissió de senyals, com a la hora de monitoritzar les dades, cosa que fa que aquesta solució no sigui viable per a un entorn industrial o qualsevol altre fora de l'àmbit docent. Com a proposta per a futures línies de treball, caldria remarcar la possible utilització d'altres tecnologies que permetin una precisió més alta i una millor visualització de les dades en temps real.

Per últim es proposa també una investigació sobre sistemes de control més complexos. En aquest treball s'han utilitzat sistemes de control senzills basats principalment en un control PI. Sent ja funcionals aquests controls, s'obre una línia de treball al voltant de la investigació de diferents tipus de control més complexos com el predictiu i el comportament del motor davant seu.

## Referències

- [1] El-Samahy, "Speed control of DC motor using adaptive variable structure control," in Proc. 2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conf., vol. 3, 18-23 June 2000, pp.1118-1123.
- [2] Andrada Gascón, P. [et al.]. In-wheel axial-flux SRM drive for light electric vehicles. A: Workshop on SRM drives an alternative for E-traction. "Workshop SRM Drives an Alternative for E-Traction: Proceedings : February 2, 2018, EPSEVG-UPC Vilanova i la Geltrú (Barcelona) Spain". Vilanova i la Geltrú: Universitat Politècnica de Catalunya. GAECE - Grup d'Accionaments Elèctrics amb Commutació Electrònica, 2018, p. 39-46.
- [3] Blanqué Molina, B. "Simulación interactiva de motores de reluctancia autoconmutados". Tesi doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2007. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/93624>
- [4] ELECTROTECNIA. PABLO ALCALDE SAN MIGUEL. Publicado por Paraninfo (2004)
- [5] Gomila González, M. "Aportaciones al control de la máquina de reluctancia híbrida HRM como motor y generador". Tesi doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2016.
- [6] Mohan, Ned. Electric drives: an integrative approach. Minneapolis: MNPERE, 2003. ISBN 0966353010.
- [7] Perat Benavides, J. I. "Contribucion al control de motores de reluctancia autoconmutados". Tesi doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2006. Available at: <http://hdl.handle.net/2117/93619>
- [8] Zuo L., Fang L., Muhammad H.: Speed Nonlinear Control of DC Motor Drive with Field Weakening.
- [9] [http://www.wiete.com.au/journals/WTE&TE/Pages/Vol.12,%20No.1%20\(2014\)/02-Chen-G.pdf](http://www.wiete.com.au/journals/WTE&TE/Pages/Vol.12,%20No.1%20(2014)/02-Chen-G.pdf)
- [10] <https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/starting-a-dc-motor.html>
- [11] <http://apps.geindustrial.com/publibrary/checkout/DET-700?TNR=Installation%20and%20Instruction%7CDET-700%7Cgeneric>
- [12] <http://www.faz.unt.edu.ar/images/stories/pdfs/pva/0938.pdf>
- [13] [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/77544/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/77544/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)