Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

TÍTULO: **Automatización de un banco de ensayo para motores eléctricos de media potencia.**

AUTOR: Fortuny Pons, Eduard

FECHA DE PRESENTACIÓN: Julio de 2020

En este trabajo de final de máster de realiza una aportación sobre la automatización de un banco de ensayos para motores eléctricos de media potencia. En primer lugar se presentan los antecedentes de la línea de trabajo, los objetivos marcados, la metodología de trabajo y la estructura que sigue el documento. En segundo lugar luego se realiza una recopilación de información teórica sobre los bancos de ensayo mediante un estado del arte, se presentan las diferentes configuraciones de bancos existentes y se debate que tipo se adapta a las necesidades del proyecto.

En tercer lugar se realiza un modelado de las diferentes propuestas de automatización obtenidas a partir de la información del estado del arte describiendo las características de cada modelo. En cuarto lugar se llevan a cabo diferentes simulaciones para estudiar el comportamiento de los modelos y posteriormente discutir los resultados obtenidos unos respecto de los otros para acabar con una sola propuesta final que sirva de solución para ser implementada.

En quinto lugar se describe los procedimientos para implementar la propuesta final, se describe el equipamiento necesario y se establece un protocolo para la configuración de la automatización.

En sexto lugar se hace una recopilación de los costes de desenvolupamiento del proyecto. Finalmente se exponen las conclusiones del proyecto y las futuras líneas de trabajo.

Paraules clau (màxim 10):

Excitación	GAECE	Banco de ensayos	Inducido
Corriente	Resistencia	Freno	Generador
Motor	Carga		

ABSTRACT

This master's final project makes a contribution to an automatization of a medium power electric motor test bench. In first place the background of the Project is presented, the goals set, the working methodology and the structure that follows thsi document. In second place a compilation of test benches technical information is carried out, with the state of the art. The diferent existing types of test bench configurations are presented and which one is the most suitable for En segundo lugar luego se realiza una recopilación de información teórica sobre los bancos de ensayo mediante un estado del arte, se presentan las diferentes configuraciones the project needs. In third place the models of the different automatization options are built and described as from the state of the art technical information.

In fourth place different simulations of the models are carried out to study and analize their behaviour and to debate later on the results of the two models, one in relation to the other so a final unique solution is obtained to later on be implemented in the test bench.

In fifth place the procedures to implement the automatization are described, the required components are listed and a protocol is established as a guidelines for the set up of the automatization.

In sixth place a list of the project developement costs is presented. Finally the conclusions future lines of investigation are presented.

Keywords (10 maximum):

Field	Armature	Motor	Generator
Test Bench	Resistor	Current	Brake
GAECE	Load		

SUMARIO

Índice

1. INTRODUCCIÓN 8
1.1. Antecedentes 8
1.2. Justificación y objetivos del proyecto 10
1.3. Recursos 11
1.4. Motivación 12
1.5. Metodología de trabajo y organización 12
1.6. Estructura 13

2. ESTADO DEL ARTE 16
2.1. Introducción 16
2.2. Definición 16
2.3. Configuración de un banco de ensayo 17
2.3.1. Sistema motor 17
2.3.2. Sistema de frenado o carga 18
2.3.3. Tipos de frenos o cargas empleadas 18
2.3.4. Sistema de medición 23
2.3.5. Referencias de bacnos de otras universidades ..... **¡Error! Marcador no definido.**
2.4. Banco de ensayo del GAECE 24
2.4.1. Conjunto motor 25
2.4.2. Sensor de par 28
2.4.3. Unidad de freno 29
2.5. Funcionamiento del banco de ensayos del GAECE 32
2.6. Selección del sistema de frenado 33
2.7. Motor CC de excitación independiente 36
2.8. Técnica de frenado 37
2.8.1. Plugging o frenado por inversión de corriente 37
2.8.2. Freno dinámico o reostático 37

3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 38
3.1. Entorno de simulación Simulink 39
3.2. Troceado de la corriente de inducido 39
3.3. Troceado de la corriente de inducido y de excitación 42

4. SIMULACIONES Y RESULTADOS 44
4.1. Simulaciones Modelo 1. Troceado de la corriente de inducido 44
4.2. Modelo 2. Troceado de la corriente de inducido e excitación 47
4.3. Resultados 49

5. MANUAL DE IMPLEMENTACIÓN 49

6. COSTES DE PROYECTO 52

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO 53

8. SOSTENIBILIDAD Y RESPONSABILIDAD AMBIENTAL 54

9. BIBLIOGRAFIA 56

SUMARIO DE FIGURAS

Esquema 1 Esquema general de un banco de ensayo

Ilustración 1 Dinamómetro de corrientes parásitas

Ilustración 2 Freno de partículas magnéticas

Ilustración 3 Dinamómetro hidráulico

Ilustración 4 Freno de fricción Prony

Esquema 2 Configuración banco de ensayo GAECE

Ilustración 5 Motor conectado al banco de ensayo del GAECE

Ilustración 6 Motor HRM Instalado en el banco de ensayo

Ilustración 7 Convertidor motor HRM

Ilustración 8 Placa dSPACE

Ilustración 9 Captadores de corriente, medición corrientes de fase

Ilustración 10 Encoder incremental motor

Ilustración 11 Equipo de medición y registro HBM

Ilustración 12 Sensor de par acoplado

Ilustración 13 Brida sensor de par

Ilustración 14 Nuevos acoplamientos para el sensor de par

Ilustración 15 Motor-Gnerador DC de excitación independiente

Ilustración 16 Placa característica motor DC

Ilustración 17 Caja de resistencias conectadas al inducido

Ilustración 18 Caja de resistencias conectadas al inducido

Ilustración 19 Caja de resistencias conectadas al inducido

Ilustración 20 Fuente de alimentación variable

Esquema 3 Circuito eléctrico motor CC excitación independiente

Ilustración 21 Sistema de frenado con troceado en inducido y excitación

Ilustración 22 Detalle diagrama de sistema de frenado

1. INTRODUCCIÓN

El documento de memoria del proyecto tiene que ser un reflejo del trabajo y el tiempo implicado, a la vez debe tener una estructura clara y fácil de seguir, que sirva de hilo conductor a través de las diferentes etapas del proyecto. Para esto se estructura el documento de manera que se sigue un flujo secuencial dónde cada punto es la consecución del anterior y en cada capítulo se justifica el porqué del siguiente paso o decisión tomada.

Primeramente se exponen los antecedentes que sitúan en contexto del trabajo y brindan una idea clara de la temática del proyecto para conocer las aportaciones existentes hasta la fecha y servir de cimientos para construir este trabajo. Seguidamente se justifica la razón del proyecto explicando la problemática que genera una necesidad y los objetivos que se pretenden alcanzar una vez finalizado. En el siguiente punto se conocen los recursos de los que se dispone para trabajar, instalaciones del laboratorio, artículos, tesis, trabajos relacionados, tambien las aportaciones del profesorado y directrizes del tutor. Luego en el siguiente punto se presenta la metodología de trabajo que se sigue a lo largo del proyecto para cumplir los objetivos marcados y finalmente la motivación personal que conduce a realizar este trabajo.

1.1. Antecedentes

Desde siempre las industrias han impulsado el avance tecnológico con la motivación de encontrar nuevas soluciones que ayuden a ofrecer un mejor producto, obtener mayor rendimiento económico o cubrir nuevos mercados que se abren. Para ello deben afrontar nuevos retos que se presentan con el mismo progreso tecnológico. Un claro ejemplo es el efecto que está teniendo el cambio climático sobre la orientación de diferentes sectores industriales como puede ser el de la movilidad, concretamente el de la automoción por ser este un ejemplo global y tener un gran impacto en las vidas de las personas a diferentes niveles.

Con el ejemplo del calentamiento global se origina una necesidad de reducir la contaminación producida por la sociedad y supone tener que buscar nuevas tecnologías que permitan mejorar el impacto medioambiental que tienen las actuales además de seguir generando economía y mercado. En este espacio toma relevancia todo el tejido de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías formado por empresas o los centros de investigación como las universidades.

El progreso tecnológico en el campo de la electrónica de potencia, telecomunicación y softwares de simulación y control ha propiciado que se disponga de accionamientos eléctricos, convertidores, sensores y programas más sofisticados y eficientes capaces de trabajar con controles más complejos y exigentes que permiten obtener mayores rendimientos o investigar en nuevas líneas de trabajo limitadas hasta ahora por las tecnologías disponibles.

En la Escuela Politécnica Superior de Ingeniera de Vilanova y la Geltrú (EPSEVG) sede que forma parte de la Universidad Politécnica de Cataluña se encuentra el Grupo de Accionamientos Eléctricos con Conmutación Electrónica (GAECE), grupo multidisciplinario formado por investigadores del departamento de ingeniería eléctrica e ingeniería mecánica con los objetivos principales siendo la investigación, divulgación tecnológica y docencia en los campos de los accionamientos y generadores eléctricos con conmutación electrónica, nuevas morfologías de máquinas eléctricas de reluctancia e imanes permanentes, tecnologías de ahorro energético en motores eléctricos y generadores, aplicación de la electrónica de potencia en el control y maniobra de accionamientos eléctricos, eco diseño y análisis del ciclo de vida de los motores y accionamientos eléctricos y la fabricación asistida con pulsos de corriente y por vibraciones mecánicas. Los campos de estudio nombrados involucran al GAECE en estudios e investigaciones para empresas de diferentes ámbitos como lo son la automoción, la robótica, el sector ferroviario, naval, aeronáutico y aeroespacial entre otros. Además es un organismo muy importante en la docencia del máster universitario en ingeniería de sistemas automáticos y electrónica industrial (MUESAEI), máster el cual este proyecto pretende culminar, y de diferentes grados, masters y tesis doctorales en la EPSEVG.

Las instalaciones del GAECE suponen un espacio de investigación para desarrollar los proyectos y estudios, pero además suponen un activo de alto valor docente para los estudiantes donde pueden ejercer prácticas y adquirir conocimientos de manera interactiva.

En los bancos de ensayo del laboratorio encontramos la herramienta principal para el desarrollo de los diferentes proyectos del departamento, en ellos se ponen en práctica las teorías y simulaciones desarrolladas y se someten a estudio los accionamientos eléctricos y elementos de electrónica de potencia. Es entonces en este espacio donde toma forma este proyecto.

Actualmente en el laboratorio se tiene sujeto a estudio un motor de reluctancia auto-conmutada del cual se pretende obtener todos los parámetros necesarios, velocidad, par motor, corrientes y tensión, ángulos de disparo óptimos, para caracterizar el motor y testear diferentes tipos de control, como el de histéresis, pulse width modulation (PWM) u otros más complejos y de este modo valorar el rendimiento ofrecido y últimamente sacar conclusiones como la aplicación final que puede desempeñar dicho motor o proponer mejoras en su diseño y construcción. Para realizar estas tareas el freno o carga del banco de ensayos juega un papel fundamental ya que es el encargado de proporcionar las diferentes condiciones de trabajo al motor en estudio, regulando la carga aplicada como ejemplo podemos emular las condiciones de un motor de un vehículo eléctrico en una pendiente o la carga máxima que este puede transportar

Esta función de freno o carga del banco de ensayo se desempeña mediante un motor/generador eléctrico conectado al eje del motor en estudio a modo de carga variable. La capacidad y precisión que tenga este motor/generador y su sistema (electrónica de potencia, sensores, etc.) determinará el rango de pruebas a las que se pueda someter el motor estudiado. Así también dependiendo de la configuración o arquitectura del freno en el banco de ensayos dotará o no de mayor funcionalidad a la instalación.

1.2. Justificación y objetivos del proyecto

El campo de la electrónica ha experimentado un gran crecimiento en los últimos años y de hecho sigue avanzando a un ritmo acelerado, la aparición de nuevas técnicas y tecnologías ha favorecido y potenciado en gran medida el ya extenso y amplio uso de motores eléctricos a nivel industrial en todo el mundo. La aparición de nuevos materiales y nuevas arquitecturas en la fabricación de motores eléctricos, sistemas de electrónica de potencia más avanzados y algoritmos de control más refinados han propiciado que se alcancen mayores niveles de eficiencia, motores con mayor densidad de potencia, nuevas aplicaciones y/o usos en que anteriormente no eran viables por tamaño o rendimiento, en resumen el rango de aplicación es más extenso si cabe. Por lo tanto es evidente que se requieren de instalaciones donde poder implementar, probar y estudiar dichos avances. De ahí nace la necesidad de modernizar estas instalaciones dotando de mejores equipos de estudio más precisos y rápidos y con más versatilidad para abarcar todo tipo de ensayos. En el laboratorio del GAECE se precisa disponer de unos bancos de ensayo eficientes y fáciles al uso es aquí donde se justifica el propósito de este proyecto

El objetivo de este proyecto es el de automatizar un banco de ensayos para motores eléctricos de baja-media potencia del GAECE, del departamento de ingeniería eléctrica. Actualmente se dispone de un banco de ensayo con la unidad de control y electrónica de potencia del motor en estudio así como de su sistema de adquisición i visualización de datos, junto a estese dispone de un motor de corriente continua separadamente excitado como fuente de carga funcionando cómo generador. El control de la carga se hace mediante una fuente de alimentación variable manualmente lo que hace necesario dos integrantes para realizar un ensayo, uno para gestionar el control del motor en ensayo y otro regulando la fuente de carga manualmente. El hecho de depender de otra persona conlleva que un ensayo sea más tedioso y menos preciso por lo tanto el trabajo se centra en automatizar la fuente de carga variable del banco de ensayo mediante un control del motor de corriente continua. Mediante el uso de Matlab-Simulink para realizar simulaciones y dSpace para la fase de implementación del control. La finalidad es que un integrante pueda preestablecer el control deseado y las condiciones a las que se quiere someter el motor en estudio gracias al control implementado en el motor-freno para centrarse en el comportamiento del motor estudiado, resultando en un banco de ensayo más eficiente y ergonómico.

1.3. Recursos

Los principales recursos de los que se disponen y se emplean en este proyecto son los siguientes:

- El laboratorio de máquinas eléctricas de la EPSEVG, concretamente los bancos de ensayo dedicados al grupo de investigación GAECE.

- Artículos científicos , proyectos, tesis vinculadas con el campo de bancos de ensayo, control de máquinas eléctricas, técnicas de frenado y electrónica de potencia en portales de divulgación científica como “ieee”, “Researchgate”, la base de datos disponible de la Universidad Politécnica de Cataluña o cualquier fuente de información en internet contrastada y de reputación.

- El software Matlab, concretamente su espacio de simulación Simulink y sus diferentes librerías de electrónica de potencia, máquinas eléctricas y control.

- Los conocimientos y consejos del departamento de ingeniería eléctrica, concretamente del tutor de este proyecto, Dr.Balduí Blanqué Molina.

1.4. Motivación

El propósito de este proyecto es el diseño y validación de un sistema de frenado que aplique las condiciones de ensayo deseadas de manera automática a los motores en estudio. Este objetivo supone indagar en el campo de los motores eléctricos y de la electrónica de potencia así como prácticas en software in the loop (SIL) y diseño mecánico. La principal motivación es el interés propio por el campo del control de motores eléctricos así como el trabajo con softwares como Matlab, pero también la posibilidad de aprender y experimentar en un entorno real como son los bancos de ensayo del GAECE. En este entorno es posible realizar prácticas altamente traducibles en entornos profesionales de I+D como podría ser en el ámbito de la movilidad eléctrica en la automoción o sectores dedicados a la sostenibilidad en la movilidad, campos de especial interés personal. Además hacer un proyecto de estas características supone dejar algo tangible a la EPSEVG y abre una línea de trabajo para futuros proyectos de final de estudios.

1.5. Metodología de trabajo y organización

Para organizar el trabajo se desglosa el proyecto en diferentes etapas, la primera consiste en la familiarización del entorno de trabajo y las actividades que se realizan en los bancos de ensayo por parte del GAECE, ver de primera mano que tipos de ensayo se llevan a cabo y entender la necesidad la segunda se trabaja en paralelo a la primera y se trata de recopilar, adquirir y filtrar información de calidad para fundamentar el trabajo y las ideas que se presentan. La tercera siguiendo la temática de la segunda etapa consiste en realizar el estado del arte y obtener la propuesta de automatización. Finalmente se tiene la etapa de modelización y simulación de la propuesta de automatización. Simultáneamente se lleva a cabo la redacción de la memoria para hacer el proceso más fácil y estructurado.

La metodología de trabajo y el seguimiento del proyecto se realizan mediante metodologías ágiles. La plataforma digital Trello sirve de portal para organizar las tareas a realizar en las diferentes etapas del proyecto, organizar las diferentes reuniones de seguimiento para revisar el estado del proyecto y servir en general de enlace con el tutor para resolver dudas y discutir cualquier apartado del proyecto.

El portal se constituye principalmente de tres columnas troncales: To Do, Doing, Done, donde se añaden etiquetas relacionadas con cada apartado. La columna “To Do” sirve para organizar y planificar las tareas a realizar y funciona como plan de trabajo del proyecto que va evolucionando a medida que se queman etapas.

La columna “Doing” sirve de seguimiento de las tareas que se están trabajando en el

momento y finalmente la columna “Done” funciona como recopilador del trabajo realizado hasta la fecha. Por otra parte se fijan un seguido de reuniones denominadas “Demo” en las que se presenta el trabajo realizado hasta la fecha de la reunión y se discuten los problemas que han surgido y cuál es el plan de trabajo a seguir. Además de las columnas mencionadas se crean otras de cualquier índole que sea necesaria, por ejemplo para cada reunión con el tutor realizada se crea una columna con la fecha de la sesión y una etiqueta con la información tratada en ella.

1.6. Estructura

El documento de memoria del proyecto tiene que ser un reflejo del trabajo y el tiempo implicado, a la vez tiene que tener un documento fácil de seguir y que sirva de elemento esclarecedor. Para esto se estructura el documento de manera que existe un flujo secuencial dónde cada punto es la consecución del anterior, de este modo se sigue un hilo conductor en que se justifica en cada apartado el porqué de cada decisión.

Capítulo 1. Introducción.

En este capítulo se presenta el contexto del proyecto, el espacio de trabajo en el que se origina y los antecedentes del grupo de investigación (GAECE), a quién va dirigido el proyecto. Se describe la problemática o necesidad que existe para justificar el motivo por el cual se emprende este proyecto. Seguidamente se delimitan los límites del marco de trabajo se presentando los objetivos marcados para realizar el proyecto satisfactoriamente, de este modo junto con los antecedentes se clarifica dónde empieza y dónde acaba e proyecto y por extensión donde se puede seguir desarrollando el trabajo. Por último se presentan los recursos disponibles para la realización del trabajo, las motivaciones para emprender dicho proyecto, explicando los conocimientos académicos que se pretenden adquirir y la oportunidad de aplicar habilidades aprendidas a lo largo del master así como el crecimiento a nivel personal. Finalmente se describe la metodología y organización que se ha seguido a lo largo del trabajo.

Capítulo 2. Estado del arte.

Se presenta la configuración del banco de ensayo que se dispone en el laboratorio de la EPSEVG, los elementos que componen el sistema de frenado, de qué forma se conecta al motor a testear y que tipos de pruebas se realizan en él, qué se requiere del sistema de frenado en una prueba genérica a un motor realizada por el GAECE. Se expone cuáles son las tecnologías más usadas en bancos de ensayo de similares características y aplicación. De este modo se crea una idea de las posibles direcciones a tomar aunque únicamente se pretende contextualizar que hipotéticas vías de trabajo

se pueden emprender para alcanzar los objetivos de este proyecto. De esta manera se presentan diferentes caminos que se pueden tomar como referencia y servirse para de manera organizada abordar los objetivos marcados. También se realizará un resumen de las diferentes tecnologías estudiadas, mostrando sus ventajas e inconvenientes en diferentes aspectos, con el objetivo de ayudar a seleccionar los mejores sistemas de forma justificada.

Finalmente, se realizará una propuesta de sistema de frenado que se adecuará al entorno de trabajo, materiales, presupuesto, uso y usuarios.

Capítulo 3. Modelado

En este capítulo primero se justifica el porqué de la propuesta seleccionada de la tabla del capítulo 2, estado del arte, que se quiere modelar y simular. Luego se presenta la herramienta de software que se utiliza para construir el modelo, el espacio de simulación de Matlab, Simulink. Gracias a este este software se crea un modelo del banco de ensayo en el entorno digital del programa mediante el cual podemos recrear el comportamiento que tiene el sistema de frenado cuando se le aplican diferentes configuraciones de control del motor. De este modo se puede valorar si el resultado de estas simulaciones es el que se esperaba inicialmente y si cumple los requisitos necesarios para ser implementado.

El objetivo final pues de este capítulo es el de trasladar la idea de automatización que se tiene de el banco de ensayo en un entorno digital para posteriormente realizar las simulaciones necesarias que validen el modelo.

Capítulo 4. Simulación y Resultados.

En este capítulo se discute los resultados obtenidos una vez implementado el control. Se analizan las gráficas en que se muestran las señales de par, corrientes de inducido e excitación y el comportamiento del freno en general con las pruebas realizadas a diferentes condiciones de velocidad y par. También se discuten las ventajas o desventajas de trocear la corriente del inducido e excitación respecto a la configuración estándar (inducido solo). Finalmente se decide en base a la comparación de los resultados cuál es la solución más adecuada y que se va a implementar en el banco de ensayo. En definitiva confirmar la viabilidad de la propuesta seleccionada en la comparativa final del estado del arte y dar validez para llevar la propuesta de control del sistema de frenado al siguiente nivel, la implementación.

Capítulo 5. Implementación.

En este capítulo se lleva a cabo la implementación. Para ello se describe el material y

elementos necesarios que requiere el control del freno, electrónica de potencia, conexionado, unidad de control, sensores, etc. Además se elabora un protocolo en que se desglosa paso a paso el procedimiento que se debe seguir para la correcta configuración y puesta en marcha del sistema y una vez instalado se describen las pruebas pertinentes de validación.

Capítulo 6. Presupuesto y coste.

En este capítulo se exponen los recursos económicos de los que se disponen para realizar la automatización del proyecto y se realiza a modo de presupuesto una recopilación de los costes de desarrollo del proyecto teniendo en cuenta el tiempo invertido en el diseño, el material necesario en cuánto a componentes mecánicos, electrónica de potencia y sensores, etc. y el coste de implementación.

Capítulo 7. Conclusiones y futuras líneas de trabajo.

En este capítulo se hace una recapitulación general del global del proyecto y se exponen los resultados explicados en el capítulo 4 para realizar una valoración sobre en qué medida se han alcanzado los objetivos marcados al inicio del proyecto, que se hubiera hecho diferente de empezar el proyecto con los conocimientos adquiridos durante el proceso. Finalmente se presentarán las futuras líneas de trabajo dónde este proyecto puede seguir creciendo y mejorando en un futuro y servir de antecedente para futuras contribuciones.

Capítulo 8. Responsabilidad medioambiental y sostenibilidad.

Se describe que aportación o impacto en cuanto a sostenibilidad y medio ambiente tiene el proyecto ya sea de manera directa per se, por ejemplo que mejora energética supone la automatización del sistema de frenado respecto a la configuración inicial, o indirecta como puede ser la aportación de este trabajo a proyectos de investigación en el ahorro energético en actuadores eléctricos. Principalmente se centra la temática en la eficiencia energética y también en la prioridad de reutilizar el máximo de componentes y producir el mínimo deshecho para la creación del sistema de frenado automático.

Capítulo 9. Bibliografía y anexos.

Se recopilan todas las fuentes de información como artículos, investigaciones, tesis, proyectos, fabricantes y de más utilizadas para llevar a cabo este trabajo y que han servido como base de fundamentación, lugar de consulta y/o de mapa de ruta para realizar este proyecto. Finalmente se encuentran los anexos que complementan la información del trabajo realizado.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

En este capítulo se pretende describir los diferentes componentes que configuran un banco de ensayo como los acoplamientos mecánicos, tipos de sensores empleados, unidades de control y electrónica de potencia, etc. Para una vez construida la idea general entrar en detalle de los tipos de configuraciones de bancos de ensayo que existen y a que tipos de ensayo son más adecuados.

Se presenta el banco de ensayo del laboratorio del GAECE detallando sus componentes para las ver las limitaciones que motivan este trabajo. Se describen les inconvenientes que supone la actual configuración del banco de ensayos en los tests que se realizan por parte del GAECE y que motivan la automatización del sistema de frenado del banco.

Finalmente el objetivo del estado del arte es informar de que elementos constituyen un banco de ensayo, que tipo de variantes existen y a que se destinan. Exponer los tipos de ensayos que realiza el grupo de investigación GAECE, dar a conocer que bancos usan instituciones o grupos similares y al final crear una tabla comparativa con los pros y contras de las configuraciones explicadas que sirva de sustento para elegir de manera justificada el tipo de sistema de frenado más adiente para realizar la automatización.

2.2. Definición

En general un banco de ensayos se describe como un espacio de trabajo que se utiliza para verificar y constatar la correcta funcionalidad y robustez de un objeto particular. En el contexto de este proyecto pues representa una instalación donde se realizan diferentes comprobaciones y pruebas a los diferentes accionamientos eléctricos y que tiene los siguientes propósitos:

- Dotar de un espacio de investigación para desarrollar, simular y analizar actuadores eléctricos y sus sistemas.

- Establecer procedimientos de evaluación y verificación de diferentes modelos de actuadores eléctricos.

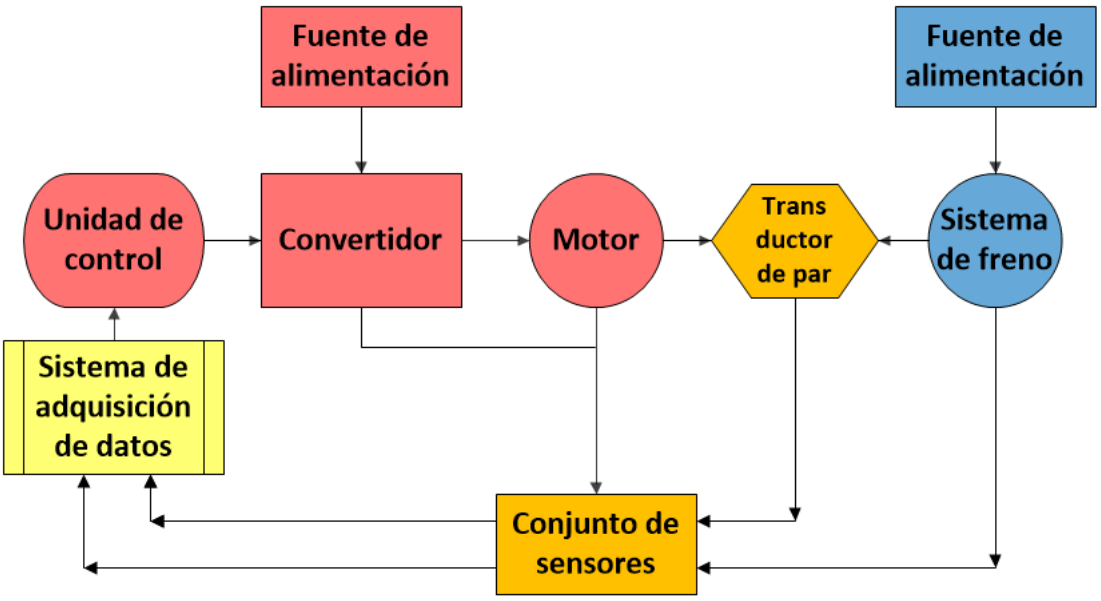
- Facilitar la toma de decisiones en las investigaciones emprendidas, suponiendo reducciones de costes de proyecto y agilizar el trabajo de documentación.

- Servir de fuente de consulta, investigación, prototipaje y test a empresas e grupos de investigación.

- Promover el aprendizaje práctico de los estudiantes en temas de investigación relacionados con el diseño de actuadores eléctricos, electrónica de potencia y control.

2.3. Configuración de un banco de ensayo

Por lo general la estructura de un banco de ensayo se puede dividir en tres partes:



Esquema 4 Esquema general de un banco de ensayo

2.3.1. Sistema motor

Dónde se engloban todos los elementos que desempeñan alguna acción directa en el accionamiento del motor que se ensaya en el banco. Estos elementos son la unidad de control, la fuente de alimentación, el convertidor de potencia, y el accionamiento como tal. En general la potencia del motor condicionará el resto del banco de ensayos.

2.3.2. Sistema de frenado o carga

Se engloban todos los elementos que desempeñan alguna acción en la generación de carga del banco de ensayo, gracias al sistema de frenado la instalación es capaz de someter el motor en estudio a las diferentes condiciones de trabajo deseadas, como variar la carga de par motor, velocidad, generar condiciones de régimen permanente o ensayos con régimen dinámico.

Los elementos periféricos al freno dependerán en gran medida de la tipología de este, que pueden ser frenos basados en pérdida de energía por fricción como los frenos mecánicos (i.e. Prony) o los frenos hidráulicos (i.e. Froude) o por frenos basados en resistència electromagnética como los frenos de corrientes parásitas Eddy o un motor de inducción trabajando en modo generador, entre otros. La elección del tipo de freno empleado depende de las características de los motores que se estudien en el banco, de los tipos de ensayos que se realicen, del espacio de la instalación y de los recursos económicos para la constitución del banco.

2.3.3. Tipos de frenos o cargas empleadas

Dinamómetro de corrientes parásitas o de Eddy

Un dinamómetro de corrientes de parásitas o de Eddy es una de las opciones más comunes para desempeñar la función de carga variable en bancos de ensayo para todo tipo de motores como eléctricos, de combustión, o cualquier elemento a ser estudiado el cual transmita la potencia a un eje.

Las corrientes de Focault o corrientes parásitas son el fenómeno físico en el cual se basa el funcionamiento de este dispositivo, estas son corrientes que se generan o inducen en masas metálicas que se encuentran sujetas al efecto de un campo magnético. Estas corrientes son opuestas a la variación de flujo que las origina. En el caso del dinamómetro son la fuente de frenado y se transforman en calor a través del cuerpo metálico por el efecto Joule.

La composición del dinamómetro consiste en uno o varios discos de aluminio que giran en el interior del campo magnético generado por la corriente que pasa por unas bobinas de excitación fijadas en la carcasa (estator), al girar el eje acoplado al rotor del dinamómetro y en consecuencia los discos, bajo la influencia del campo magnético creado por el estator se inducen las corrientes parásitas que se oponen al movimiento provocado una carga sobre el motor conectado al dinamómetro. La cantidad de par de frenada que genera el dinamómetro es proporcional a la cantidad de corriente que pasa

por las bobinas del estator, entonces controlando la corriente podemos también controlar el par de frenada aplicado al motor sujeto a ensayo así obteniendo una fuente de carga variable. La medición del par motor se puede realizar mediante un transductor de par acoplado al eje o por basculación del dinamómetro.

Estos tipos de freno, los dinamómetros de corrientes parásitas, son elementos que necesitan de refrigeración en la carcasa o estator ya que como se ha mencionado por el efecto Joulse se eleva la temperatura de la carcasa haciendo que el rendimiento del dinamómetro se vea afectado. Generalmente están dotados de sistemas de refrigeración por agua mediante un circuito instalado en las camisas de la carcasa para controlar la temperatura. Los refrigerados por aire tienen la desventaja que al tener menos poder de refrigeración no pueden trabajar a máxima potencia por mucho tiempo ya que se sobrecalientan y pierden capacidad de frenado de manera considerable, por lo contrario los que tienen refrigeración por agua controlan mejor la temperatura pero requieren de una estación de refrigeración con bombas, depósitos de agua, intercambiadores de calor, etc.

Las principales ventajas de los dinamómetros de corrientes parásitas son el elevado par de frenado aún trabajando a bajas revoluciones, ya que el par de frenada es proporcional a la corriente que pasa por las bobinas de excitación es una fuente de carga variable precisa, son dispositivos robustos y con una gran durabilidad con un mantenimiento sencillo y no muy frecuente. Por el contrario su coste es más elevado que el de frenos mecánicos o hidráulicos.

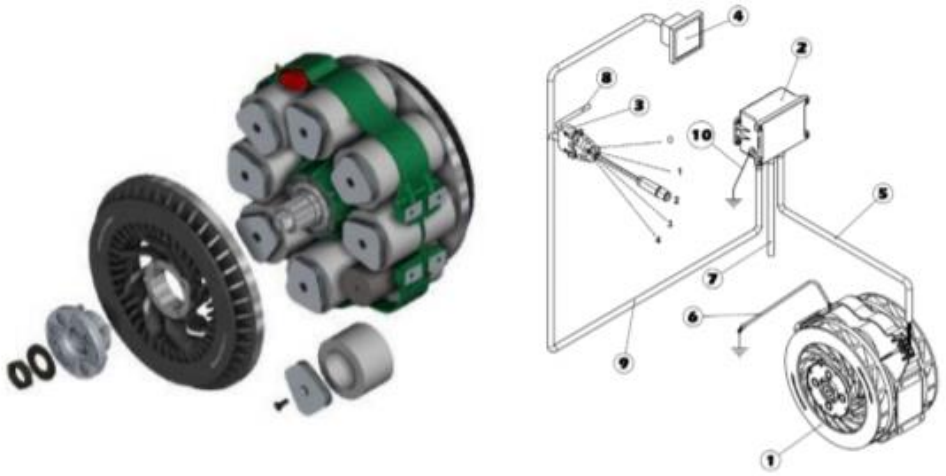


Ilustración 23 Dinamómetro de corrientes parásitas

Dinamómetro de corriente continua o Motor-Generador de corriente continua

Una máquina eléctrica de corriente continua es una método preciso para aplicar condiciones variables de par en un banco de ensayos, estas máquinas que se catalogan como dinamómetros eléctricos de corriente continua o generadores dinamométricos no son otra cosa que motores de corriente continua trabajando en modo generador para aplicar una carga al motor primario al que está conectado el eje del rotor.

El torque generado por un generador de corriente continua es dependiente de la corriente del inducido y de la de excitación, y en consecuencia la corriente del inducido es dependiente de la velocidad y de la corriente de excitación, por lo tanto es posible controlando únicamente la corriente de inducido obtener las características de torque en función de la velocidad deseadas a aplicar al motor primario conectado a estudio en el banco de ensayo.

Generalmente los motores usados para este propósito son motores de corriente continua separadamente excitados y presentan tres diferentes modos de generar un par de frenado los cuales son el método plugging, dynamic braking o freno rheostatico y el frenado regenerativo.

El par de frenado producido por el dinamómetro eléctrico puede ser medido por el mismo método que el dinamómetro de corrientes parásitas, con la carcasa del estator basculante con un brazo unido el cual apoya sobre un dinamómetro o una báscula, en este caso se multiplica la fuerza medida por la longitud del brazo para obtener el par de frenado. Si no es el caso de que se tiene una carcasa de estas características se puede medir el par mediante un transductor de par que va dispuesto entre el acople del eje del motor primario con el del dinamómetro eléctrico.

Dinamómetro de corriente alterna

Un dinamómetro de corriente alterna es una opción muy similar a la del dinamómetro de corriente continua, del mismo modo se basa en la fuerza del campo electromagnético para generar la fuerza resistente al eje del motor en ensayo. Debido a su construcción los dinamómetros de corriente alterna si los comparamos con los de corriente continua presentan mayor rango de velocidades y menor inercia en el rotor, permitiendo aceleraciones más rápidas por lo que tiene grandes cualidades para ensayos dinámicos, además de ser altamente controlable.

Dinamómetro de partículas magnéticas

Este tipo de dinamómetro consiste en un estator con una bobina de excitación y un disco unido al eje rotor, en el espacio entre rotor y estator se encuentra un polvo de

propiedades magnéticas, el cual no opone resistencia cuándo la bobina de excitación del estator no está alimentada, pero que cuando este polvo se encuentra bajo el efecto del campo magnético de la bobina del estator en estado de excitación se originan cadenas de partículas magnéticas que conectan el estator al rotor produciendo así fricción que se traduce en un par de frenado al eje del rotor. El par de frenado de este tipo de dinamómetro es proporcional a la corriente que fluye en el estator por lo tanto el par se controla por la corriente de excitación.

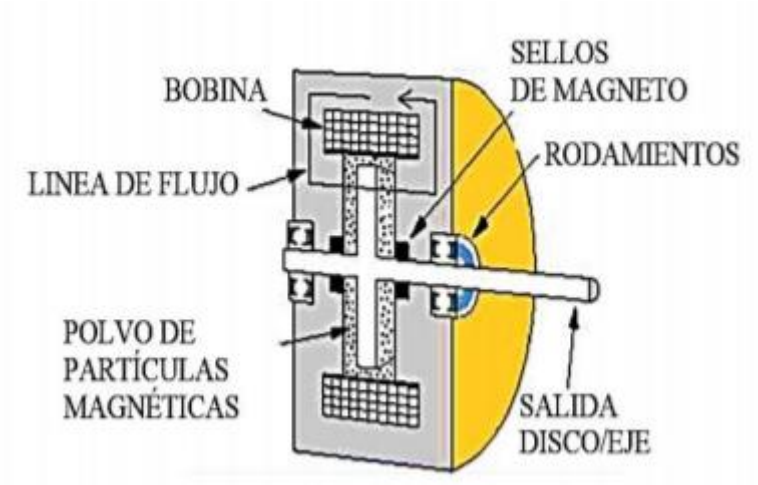


Ilustración 24 Freno de partículas magnéticas

Dinamómetro Hidráulico

Los dinamómetros hidráulicos conocidos como freno de Froude (William Froude 1810-1879) están compuestos por un rotor y un estator con agua en el interior que absorbe energía produciendo el deseado frenado. Como se muestra en las figuras el estator está constituido por unos canales o alvéolos que junto con los del rotor forman un toroide por donde circula el agua, el funcionamiento de estos dinamómetros pues se basa en la turbulencia que se origina al mover el rotor cuando el motor en ensayo lo acciona, debido a la fuerza centrífuga el flujo de agua que se genera es un vórtice helicoidal que desplaza las partículas de agua desde las cavidades del rotor hacia las paredes de las cavidades del estator, provocando que las partículas de agua vuelvan a la cavidad del rotor con una velocidad inferior de la que salieron habiendo perdido por fricción energía cinética y en consecuencia generando un par de frenado en este proceso. El par resistente generado se regula mediante la corriente de agua que circula en el estator, por lo tanto el par depende directamente de la presión del agua. Usando válvulas para estrangular la circulación de agua se consigue la regulación del par.

La fuerza del par generado por la siguiente expresión:

$$Torque = K \cdot n^2 \cdot D^5$$

Donde *K* es una constante dependiente de la geometría de la cavidad entre rotor y estator, *n* es igual a las revoluciones por minuto del rotor y *D* es igual al diámetro del rotor.

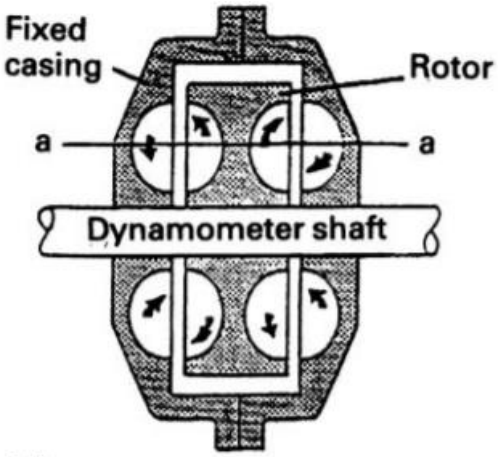


Ilustración 25 Dinamómetro hidráulico

Este tipo de frenos permite realizar ensayos de larga duración con una carga constante con la única limitación siendo la capacidad del sistema de refrigeración del fluido (torre de refrigeración).

Freno de Prony

El freno de Prony lleva el nombre de su inventor Gaspard Clair Francois Marie Riche de Prony. El freno está formado por un brazo sobre el cual van montados un dinamómetro y una rueda, esta lleva acoplada una mordaza de alto rozamiento. El motor sometido a estudio es unido por su eje a la rueda del freno Prony para experimentar diferentes niveles de carga. La cantidad de par a la que se somete el motor estudiado puede ser modificado mediante la fuerza que se aplica a la rueda del freno. Por el ajuste de la mordaza de alta fricción con la que la rueda está en contacto se genera más o menos fricción, la potencia disipada se convierte en calor a través del material del freno. Este tipo de freno mecánico es un sistema sencillo para aplicar cargas al eje del motor sin embargo tiene sus limitaciones debido a su principio de funcionamiento y características de su arquitectura, generalmente se usa para realizar mediciones de par de arranque de motores eléctricos y/o aplicación de cargas a velocidades relativamente bajas.

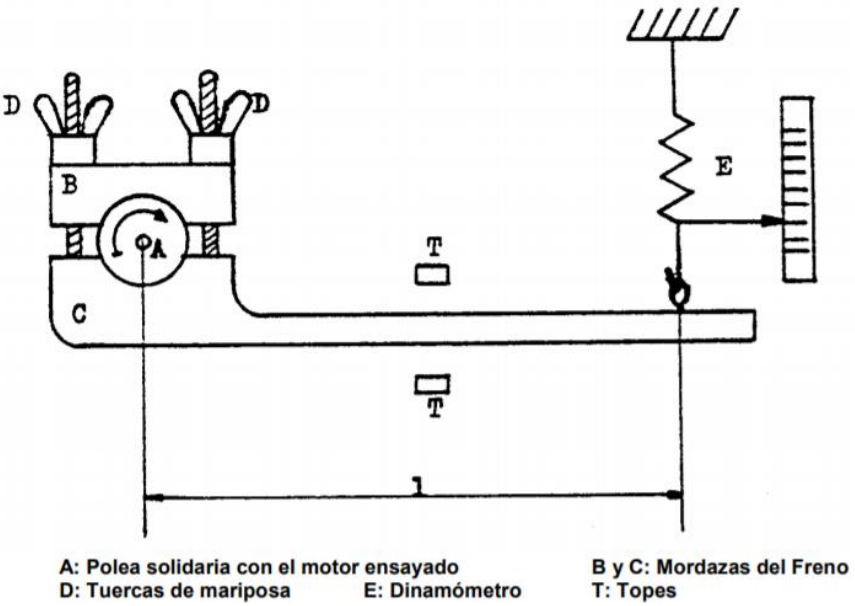


Ilustración 26 Freno de fricción Prony

2.3.4. Sistema de medición

El sistema de medición està constituido por el conjunto de sensores que realizan las mediciones de los parámetros del banco de ensayo, el acondicionamiento de señal y el sistema de visualización de datos.

Los sensores son los elementos responsables de medir las magnitudes físicas del banco de ensayo y convertirlas en señales eléctricas. Los parámetros que se miden són la velocidad, el par motor o carga, las corrientes y tensión del convertidor, las corrientes y tensiones de las fases del motor, corrientes y tensiones del sistema de freno en el caso que sea de tipo eléctrico o magnético y la temperatura en los devanados y electrónica de potencia. Gracias a la información transmitida por el conjunto de sensores la unidad de control mediante el grupo de acondicionamiento de señal y el convertidor analógico-digital es capaz de aplicar el control deseado en el motor testeado adaptándose a las entradas de consigna deseadas.

Dependiendo de la capacidad de mostreo que presenten los sensores se obtendrá un control del banco de ensayo más o menos preciso.

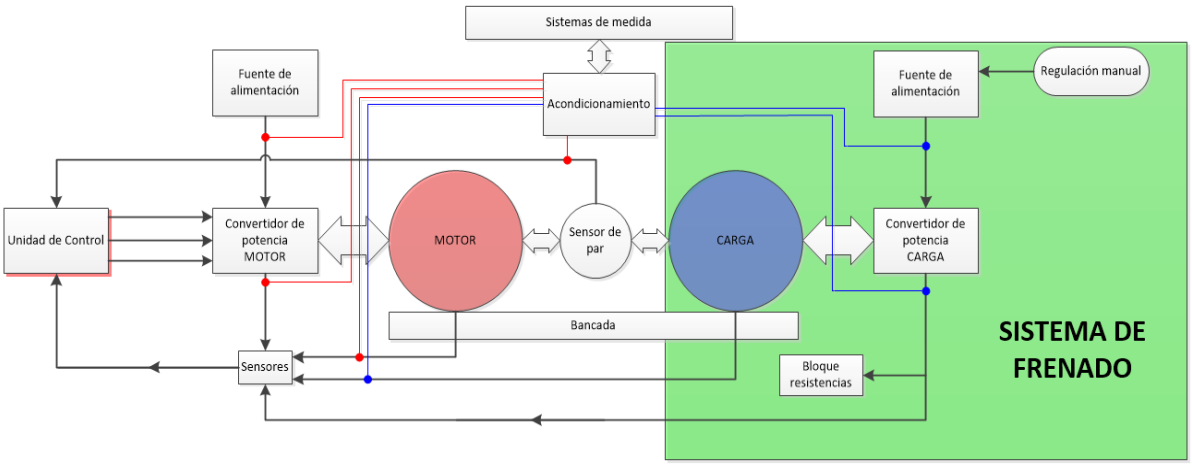
Conectado al sistema de sensores se encuentra el sistema de acondicionamiento de señal el cual mediante filtros y amplificadores se encarga de procesar las señales eléctricas de los sensores para evitar ruidos no deseados que se pueden originar en el banco de ensayos a causa del motor o de la conmutación de la electrónica. El objetivo es enviar a la unidad de control y al sistema de visualización una señal de calidad que no introduzca perturbaciones no deseadas en el sistema.

Finalmente al final del grupo de medición se encuentra el sistema de visualización de datos que a diferencia de la unidad de control este elemento no realiza ninguna variación en el comportamiento del motor pero sirve de interfaz para visualizar la información del banco de ensayo y realizar el análisis y documentación de los ensayos.

El equipo de medicion consta por lo general de un sensor de par, un encoder, un conjunto de transductores de corriente, amperímetros y voltímetros y sensores de temperatura. Filtros y amplificadores específicos para las magnitudes medidas y un monitor con software de visualización de información como por ejemplo LabView.

2.4. Banco de ensayo del GAECE

El banco de ensayo del laboratorio del GAECE se representa mediante el esquema siguiente (Fig.N) el cual se divide en dos partes, la unidad motor sometida a ensayo y la unidad de freno responsable de proporcionar la carga solicitada para el ensayo.



Esquema 5 Configuración banco de ensayo GAECE

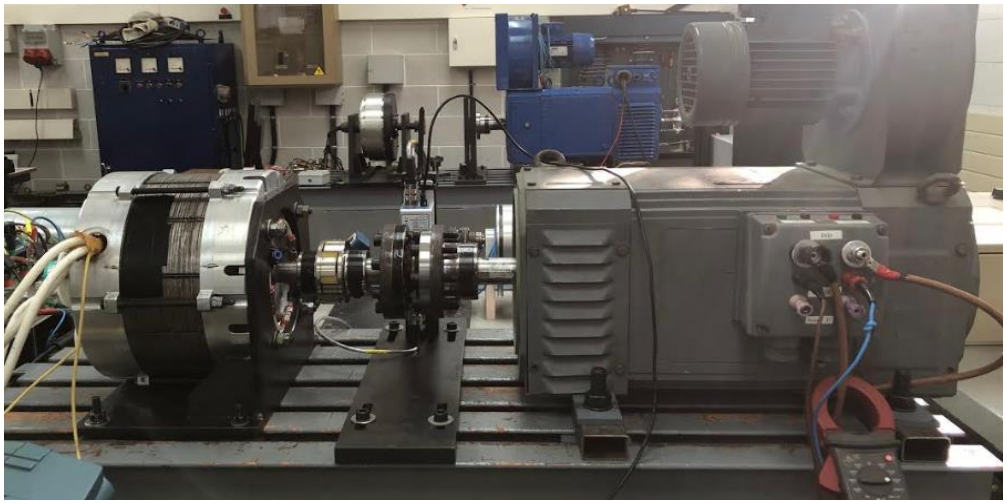


Ilustración 27 Motor conectado al banco de ensayo del GAECE

2.4.1. Conjunto motor

El conjunto motor como se ha mencionado consta de la unidad de control, el convertidor de potencia, el motor eléctrico y el sistema de medición. En la actualidad en el banco de ensayo del GAECE se tiene instalado un motor de reluctancia autoconmutada (SRM), en concreto un motor de reluctancia hibrido (HRM) el cuál es un tipo de motor SRM.

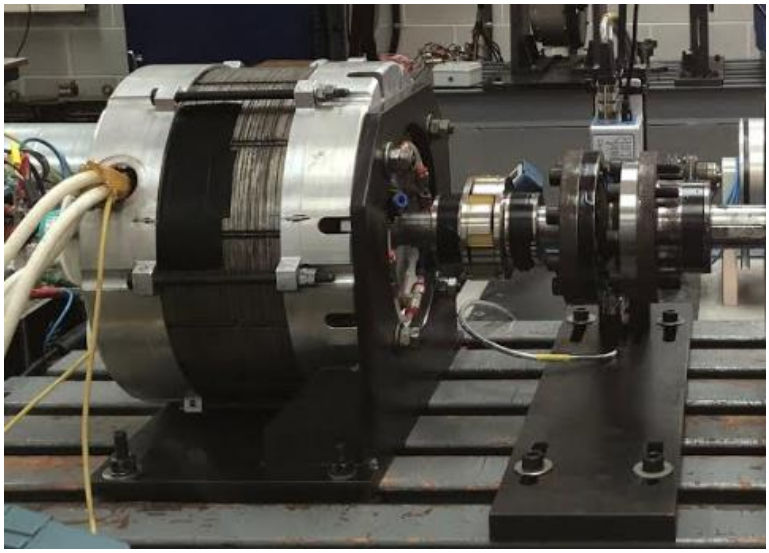


Ilustración 28 Motor HRM Instalado en el banco de ensayo

El motor viene conectado a un convertidor de potencia el cual es el encargado de alimentar las fases según las señales del control, activando y desactivando los interruptores de estado solido, generando la conmutación con la secuencia necesaria para producir la repelencia magnética de los polos. Este convertidor para evitar desperfectos en sus componentes no puede exceder voltajes de superiores a 600V y corrientes de pico de 100A (85A de referencia),

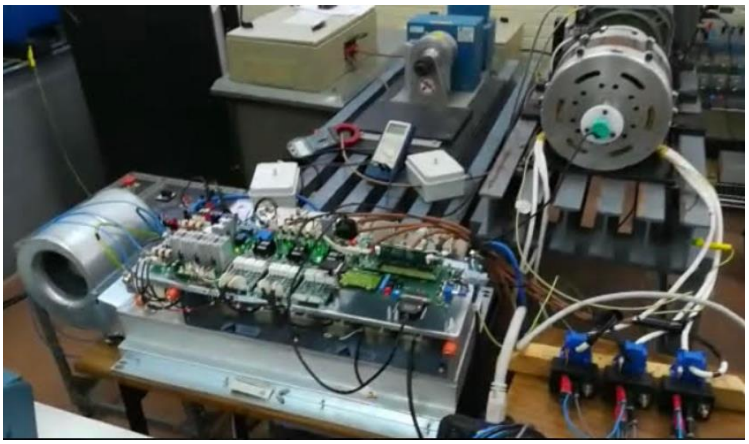


Ilustración 29 Convertidor motor HRM

El convertidor es gobernado por una unidad de control constituida por una placa de prototipado Placa de Prototipado rápido (DSPACE ACE 1006 2.8 GHz, DS 1006 Processor Board con procesador AMD OpteronTM , Real-Time Interface DS1006 GNU compiler , ControlDesk Next generation, Standard Platfom Module MLIB/MTRACE) que se encarga de computar las mediciones recibidas de los sensores dentro del algoritmo de control además de gestionar diferentes alarmas como excesos de temperatura o de corriente.

Ilustración 30 Placa dSPACE

Los principales sensores que se emplean en las mediciones del motor són los captadores de corriente y el encoder:

El captador de corriente consiste en dos partes separadas y aisladas una de las cuales está conectada al circuito del convertidor de potencia y la otra al de la unidad de control. Este captador presenta una relación de proporcionalidad entre las corrientes que circulan por las dos partes. Esta característica permite transmitir la corriente del circuito de potencia con un valor escalado al circuito de la unidad de control, de otro modo debido a que el circuito de potencia trabaja con corrientes considerables se quemaría la unidad de control. Además de proporcionar un aislamento de seguridad entre las dos partes los captadores de corriente son ampliamente usados en estas aplicaciones por su sencillez de implementación y la robustez frente a perturbaciones.

Ilustración 31 Captadores de corriente, medición corrientes de fase

El encoder empleado en el motor es del tipo óptico incremental (TI40N Pepper+Fuchs) de 40mm de diámetro exterior i 5 V DC para una señal digital RS-422, el cual se encarga de proporcionar la posición relativa del eje respecto al tiempo. Este encoder tiene una resolución de 1024 pulsos por revolución además tiene la cualidad de no ser sensible a temperaturas.

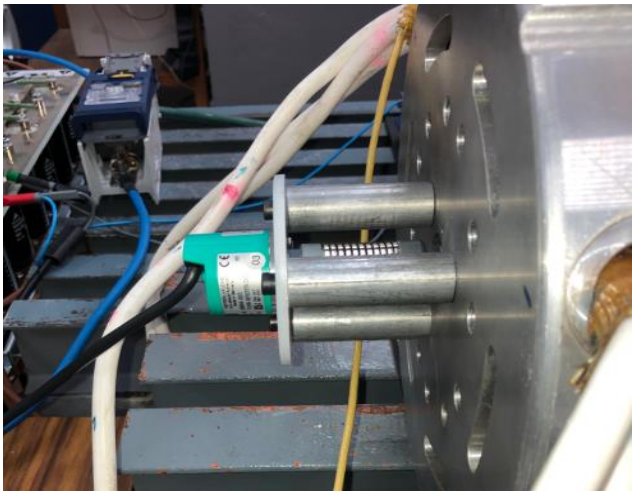


Ilustración 32 Encoder incremental motor

Para adquirir y registrar todas las señales de los sensores existentes en el banco se dispone de un equipo de la marca HBM, que es un sofisticado sistema de medida y análisis multicanal con una altíssima frecuencia de mostreo y que permite adquirir simultáneamente señales eléctricas (corriente, tensión) y mecánicas (par), valores promedio y potencias, todo esto con un software interno dedicado a ensayos de motores eléctricos (Perceptron) lo cuál agiliza y permite una mejor comprensión del comportamiento del motor eléctrico en estudio.

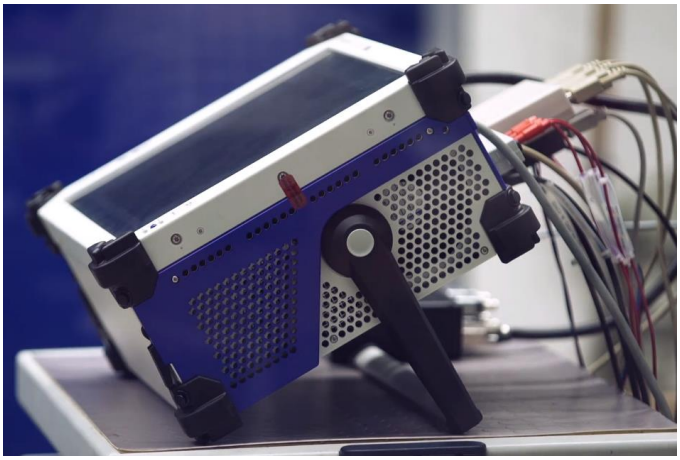


Ilustración 33 Equipo de medición y registro HBM

2.4.2. Sensor de par

Para realizar la medida del par motor al que está sometiendo el accionamiento en estudio se dispone un sensor Kistler tipo brida compuesto por la parte rotor (modelo 4550A) la cual se acopla al extremo del eje de la carga y del motor uniéndolos entre sí, en el interior del rotor hay un seguido de galgas extensiométricas que capturan el par motor aplicado, luego la señal de estas galgas es amplificada y procesada a una alta frecuencia de mostreo permitiendo la medición de un par motor altamente dinámico. El estator (modelo 4541A) alimenta al rotor, recibe y procesa la información, enviando como salidas señales de voltaje y frecuencia. Este sensor es capaz de medir un par motor de hasta 500N·m y se puede configurar para convertir la velocidad de giro del eje en una señal de voltaje. Además presenta diferentes configuraciones de escalado de señal y se puede realizar un tarado de manera digital o analógicamente mediante un botón en el estator.

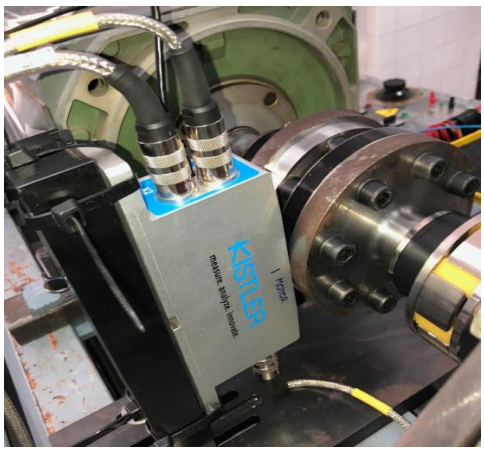


Ilustración 34 Sensor de par acoplado

Ilustración 35 Brida sensor de par

Para la correcta instalación de este sensor se han diseñado unos acoplamientos nuevos específicos para el eje del motor y el eje de la carga con una tolerancia dimensional muy ajustada para tener un acoplamiento perfecto y de esta manera evitar posibles vibraciones durante los ensayos que pueden introducir ruido no deseado en las lecturas de los sensores y en el control de el motor, además de evitar en el peor de los casos daños en el rotor del sensor.

Las piezas de acero se han diseñado mediante el software AutoCAD a partir de los planos dimensionales incluidos en el manual del proveedor Kistler. Acorde con los valores de par que es capaz de medir el sensor, a propósito se han sobredimensionado los nuevos acoplamientos con un coeficiente de seguridad para que aguanten holgadamente las tensiones que se generan en los ensayos, además se les ha aplicado un pavonado para mejorar la resistencia a la corrosión. Cabe decir que este proveedor

ofrece bridas a medida para sus diferentes productos pero con un coste elevado de modo que el diseño propio supone un ahorro para el departamento.

Ilustración 36 Nuevos acoplamientos para el sensor de par

2.4.3. Unidad de freno

La unidad de freno encargada de generar la carga del banco de ensayo está constituida por un motor de corriente continuo separadamente excitado de 20kW, un grupo de multímetros, una fuente de alimentación regulable y una caja de resitencias combinables.

La carga es generada por un motor de corriente continuo separadamente excitado trabajando como generador. A diferencia por ejemplo de un motor de corriente continuo shunt en el cual el bobinado inductor está conectado en paralelo con el inducido, el motor separadamente excitado como dice su nombre tiene el bobinado de la excitación (estator) separado del bobinado del inducido o armadura (rotor) teniendo dos fases independientes la una de la otra. Esta característica proporciona al motor una gran capacidad de par motor constante i una gran capacidad de regulación de la velocidad. En el caso de un banco de ensayo como se ha mencionado se desea que este motor aplique una carga al motor que se está testeando, es por eso que el motor està trabajando en modo generador, esta función se consigue desconectando el inducido de la fuente de alimentación como seria el funcionamiento normal en modo motor i en su lugar conectar una resistencia entre sus bornes, de este modo la corriente del inducido es disipada en forma de calor por la resistencia produciendo el efecto de frenado y que se traduce en una carga para el motor en estudio.

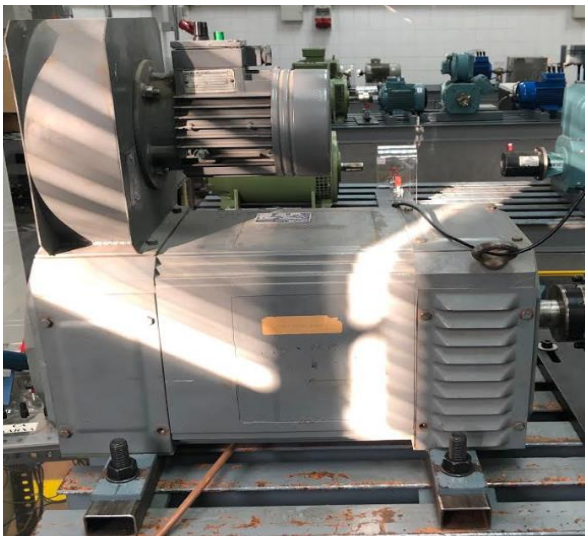


Ilustración 37 Motor-Gnerador DC de excitación independiente

En la tabla 1 se presentan los parámetros característicos del motor empleado como carga del GAECE, como se ha mencionado es un motor con una potencia de 20 kW pero que en ocasiones puntuales puede ser sobre excitado llegando a 27kW en algunos ensayos.

Fabricante	NOVAT
Potencia	20kW (sobre excitado 27kW)
Velocidad	3350 rpm
Tensión de Excitación	195V
Corriente de Excitación	3,85A
Tensión de Inducido	440V
Corriente de Inducido	52A

Tabla 1 Parámetros motor DC

Ilustración 38 Placa característica motor DC

Como se ha mencionado la conexión de una resistencia en el circuito del inducido genera que se disipe la corriente y por lo tanto que se produzca el efecto de frenado que origina la carga. Para ello en el laboratorio del GAECE se dispone de una caja de resistencias las cuales mediante unos interruptores pueden conectarse entre si con

diferentes combinaciones para obtener diferentes valores Ohmicos de modo que se pueda regular la cantidad de carga que se aplica en los ensayos.

Ilustración 39 Caja de resistencias conectadas al inducido

Además para aumentar la maniobrabilidad del freno y tener un rango más amplio de regulación de carga se dispone de una fuente de alimentación variable conectada a la excitación, de este modo para cada valor de resistencia configurado se dispone de una amplia ventana de par de frenado según la fuerza del campo magnético de la excitación.

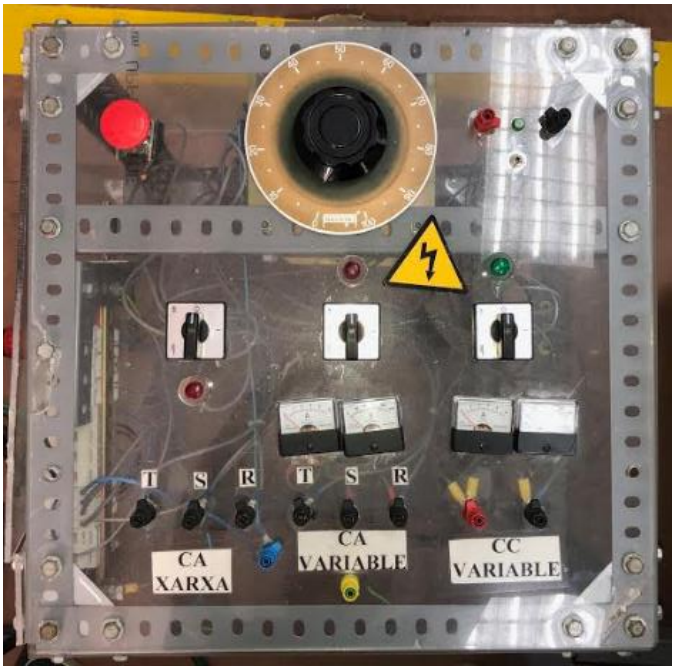


Ilustración 40 Fuente de alimentación variable

2.5. Funcionamiento del banco de ensayos del GAECE

Una vez descrito el equipamiento que configura el banco de ensayo del laboratorio del GAECE, se explica el modo de operación que se utiliza para realizar un ensayo ordinário en el banco, de este modo se resalta de manera práctica la problemática que motiva el querer automatizar el sistema de frenado de esta instalación.

Para realizar la rutina de una prueba se supone un ensayo en el que se quiere analizar el comportamiento de diferentes angulos de disparo en las fases del motor HRM trabajando a una velocidad de 3000rpm y a una carga de 20N·m. Una vez se tiene la arquitectura electrónica alimentada, convertidor, sistema de medición, unidad de control, sensor de par y el sistema de frenado conectado, mediante la unidad de control se aplica el algoritmo de control que se tenga configurado en el software al motor en estudio.
Para evitar picos de corriente o sobrecargas en el sistema o que se activen alarmas de protección la potencia del motor se debe cargar gradualmente, generalmente el algoritmo de control presenta un control secundario que se encarga de arrancar el motor suavemente. Una vez se llega a la velocidad deseada se empieza a cargar el motor en estudio mediante el motor de corriente continuo funcionando como generador, la configuración del sistema de frenado obliga a que se tenga que regular manualmente la excitación del generador mediante la fuente de alimentación para regular el par de frenado que se aplica. Además el hecho de tener una caja de resisténcia análogica que hace la función de rehostato para disipar la corriente en el inducido y generar la carga supone que se tenga que configurar manualmente el valor de resistencia total para adecuarse a los parámetros de cada ensayo.

Los inconvenientes de trabajar en esta configuración de banco de ensayo són los siguientes:

- La regulación manual del voltaje de la excitación
- La configuración manual de las resistencias de frenado conectadas en el inducido
- La configuración requiere de dos personas, una que manipule la unidad motor en estudio y otra que regule la carga aplicada mediante la fuente de alimentación variable.
- La seguridad de la instalación

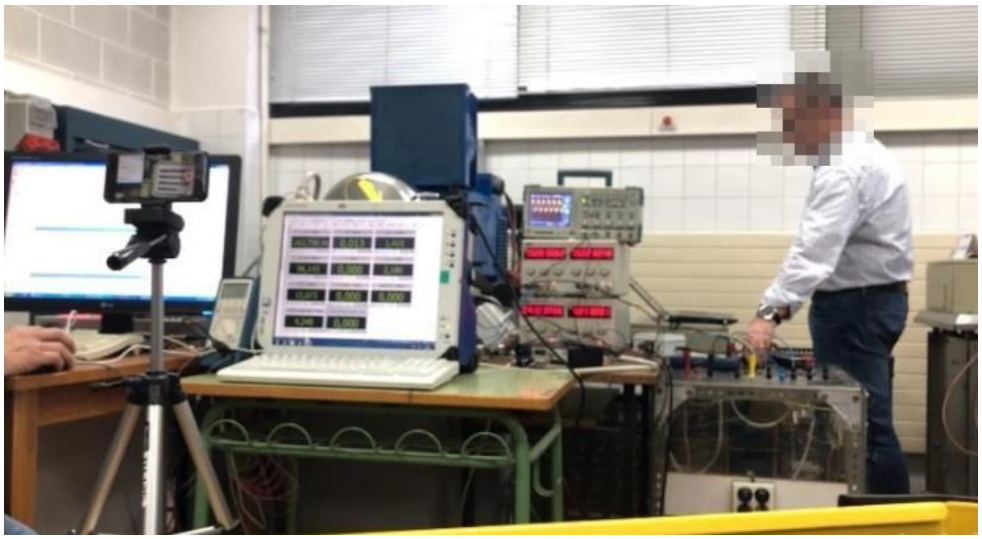


Ilustración 41 Ensayo con regulación manual de la carga

2.6. Selección del sistema de frenado

Como se ha presentado previamente en la introducción del trabajo, el objetivo principal que se quiere alcanzar en este proyecto es el de automatizar el sistema de frenado del banco de ensayo para proporcionar una mejor gestión de la carga, una mejor precisión de los ensayos y centralizar la gestión del banco en un solo punto.

Para valorar qué tipo de sistema de frenado es el más adecuado para que le sea implementada la automatización se deben seguir unos criterios que vienen fijados por las necesidades de los ensayos que se realizan en el GAECE, las instalaciones y recursos que se disponen, la simplicidad de la implementación y el componente económico.

A nivel técnico los atributos que se valoran en la elección del tipo de banco de ensayo són los siguientes:

- Facilidad de regulación
- Precisión de la medición
- Robustez y establidad de funcionamiento
- Capacidad de disipar la potencia del motor
- Soportar las velocidades de rotación
- Tener un rango de potencia acorde al tamaño del motor
-

Para proporcionar una propuesta justificada se ha creado una tabla de contenido donde se han recopilado los diferentes tipos de sistemas de frenado o carga para bancos de ensayo, los cuales están detallados previamente en el apartado 2.3.3 *Tipos de frenos o cargas empleadas.*

DINAMÓMETRO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
CORRIENTES PARÁSITAS O EDDY	• Excelente precisión • Excelente rango de velocidades • Fácil regulación de la carga • Bajo mantenimiento	• Requieren de sistema de refrigeración de agua para potencias elevadas • Decaida del rendimiento por temperatura
ELÉCTRICO CC	• Alta precisión • Puede funcionar cómo motor de arrastre • Excelente precisión • Alta controlabilidad	• Inercia media. • Coste elevado • Potencias limitadas a bajas y medias
ELÉCTRICO AC	• Excelente precisión • Inercia pequeña • Puede funcionar cómo motor de arrastre • Alta controlabilidad	• Coste elevado • Potencias limitadas a bajas y medias
DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	• Excelente precisión • Fácil regulación de la carga • Bajo mantenimiento	• Requieren de sistema de refrigeración de agua para potencias elevadas • Decaida del rendimiento por temperatura
HIDRÁULICO	• Robustez • Inercia muy baja • Capacidad de realizar ensayos estables de larga duración • Bajo coste	• Infraestructura de refrigeración compleja • Poca versatilidad • Difícil de automatizar • Desgaste por cavitación y turbulencias
PRONY	• Adecuados para ensayos estáticos • Ensayo a bajas revoluciones	• Tiene un rango de velocidades limitado • Difícil de automatizar • Mantenimiento frecuente

Ilustración 42 Comparativa sistemas de frenado

Teniendo en cuenta que:

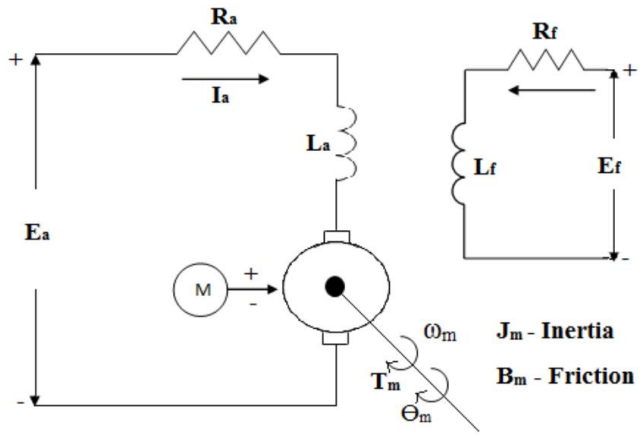
- El sistema de frenado tiene que poder ser automatizado
- Los motores testeados en el banco de ensayo del laboratorio del GAECE generalmente no superan los 25kW de potencia.
- Se realizan diferentes tipologías de ensayos (estáticos, dinámicos, a régimen permanente, ensayos de arrastre) por lo que se requiere un alto nivel de versatilidad del freno.
- Se puede decir que los ensayos son de corta duración, y de poca continuidad.
- En ocasiones puede ser necesario que la carga ejerza de arrastre delaccionamiento en estudio

Los dinámometros alimentados por corriente eléctrica tienen una clara ventaja respecto a los frenos de fricción o hidráulicos por su alta capacidad de regulación de la carga, dentro de los dinamómetros de esta condición los dinamómetros de corrientes parásitas y de partículas magnéticas aún presentando un amplio rango de potencias y fácil automatización no cumplen con el requisito de poder realizar tareas de arrastre en ocasiones puntuales, es decir trabajar como motor. Es por eso que el sistema de frenado más adecuado por las necesidades existentes de los usuarios del banco de ensayo son los dinamómetros de corriente continua CC o los de corriente alterno CA ya que cumplen con todos los criterios para la elección.

Finalmente entre los dos tipos de dinamómetros eléctricos los de corriente alterno presentan unas mejores condiciones para ensayos dinámicos debido a que estos tienen una inercia inferior a la de los de corriente continuo. Sin embargo debido a los recursos del laboratorio del GAECE que dispone de un motor de corriente continua de excitación independiente con potencia suficiente para desempeñar la función, la ventaja dinámica que presenta un dinamómetro de CA no es un factor que pueda compensar los costes que conllevaría seleccionar esta opción. Por lo tanto la propuesta de automatización se va a realizar en base al motor de corriente continuo de excitación independiente que se dispone en el laboratorio.

2.7. Motor CC de excitación independiente

Un motor de corriente contínua es una máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica de rotación y ofrecen un alto nivel de control de velocidad y par. El motor de corriente continua con excitación independiente es una tipología de motor de continua en que la alimentación del inducido o armadura y de la excitación se realiza por separado teniendo dos fases independientes, es decir están eléctricamente separados. Gracias a que el circuito eléctrico de la excitación esta separado del inducido entonces el campo magnético no depende de la carga, proporcionando un par prácticamente constante.



Esquema 6 Circuito eléctrico motor CC excitación independiente

Las expresiones básicas a tener en cuenta para el control del motor se describen a continuación:

$$\omega = \frac{E}{k\phi} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$E = V_i - R_i I_i \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$M_i = k\phi I_i \quad \text{Ecuación (3)}$$

ω = Velocitat (rad/s).
E = f.e.m. inducida.
k = constante constructiva.
ϕ = flujo màximo por polo.
Vi = Tensión del inducido.
Ri = Resistencia del inducido
Ii = Corriente del inducido
Mi = Par interno

De las ecuaciones podemos observar dos hechos muy importantes para el entendimiento del motor de corriente continua con excitación independiente, la velocidad depende de la fuerza electromotriz i el par depende directamente de la corriente del inducido.

2.8. Técnica de frenado

Para la aplicación de sistema de frenado que se tiene que desempeñar el motor deberá trabajar en modo generador, a continuación se presentan dos técnicas para generar la carga deseada:

- Plugging
- Freno dinámico o reostático

2.8.1. Plugging o frenado por inversión de corriente

Este método consiste en invertir la polaridad de los bornes del inducido, como consecuencia la fuerza contraelectromotriz inducida dejará de oponerse a la fuente de voltaje y actuarán en la misma dirección oponiéndose a la rotación y provocando un frenado instantáneo. En esta técnica la suma de la fuente de tensión con la fuerza contraelectromotriz genera una elevada tensión lo que obliga tener que colocar una resistencia para limitar la corriente.

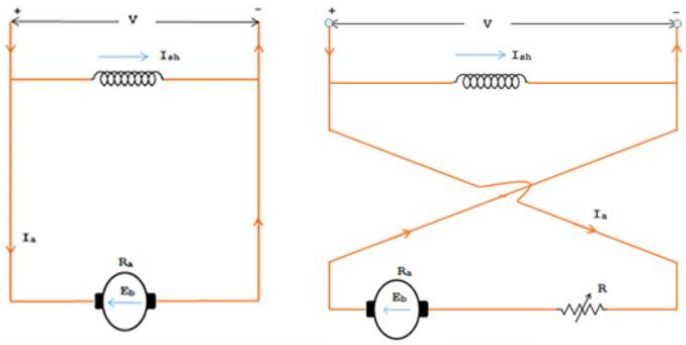


Ilustración 43 Plugging

Esta técnica se usa en aplicaciones en las que se desea una parada instantánea o lo más rápida posible como en frenos de emergencia de ascensores, prensas, gruas, etc.

2.8.2. Freno dinámico o reostático

Otra técnica de frenado para el motor de excitación independiente es el frenado dinámico o reostático. Esta técnica consiste en conectar el motor en modo generador para transformar la energía mecánica en energía eléctrica, luego está electricidad se conduce a través de una resisténcia para ser disipada en forma de calor por el efecto Joule. Los terminales del circuito del inducido son conectados a una resitencia la cual actua a modo de carga, dependiendo del valor de esta resistencia la carga generada

será mayor o menor, como más pequeño sea el valor de dicha resistencia más grande será la potencia disipada en forma de calor y más rápido será el efecto de frenado.

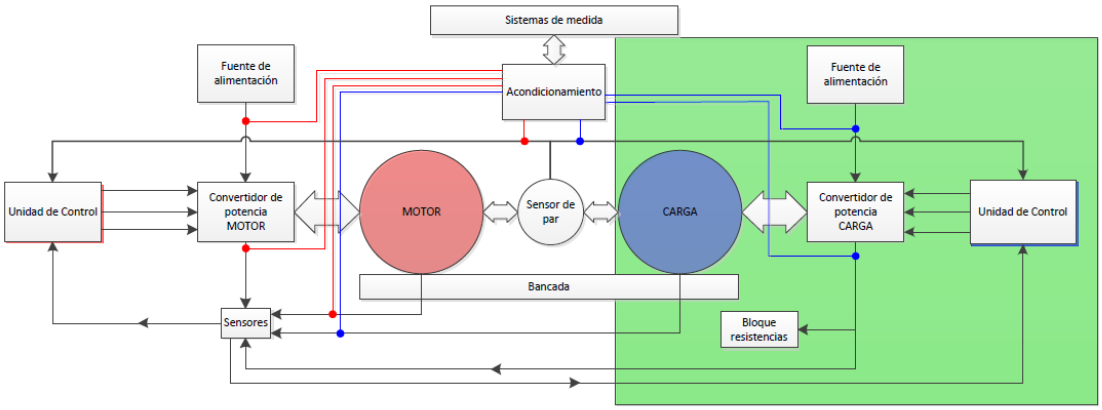
Cuando el inducido gira dentro del campo magnético generado por la excitación este produce una fuerza contraelectromotriz la cual genera la corriente que circula a través de la resistencia , al disiparse en forma de calor el circuito del inducido pierde energía provocando el efecto de frenado deseado.

La fuerzacontraelectromotriz como se describe en la ecuación (1) depende de la velocidad de rotación del inducido por lo que a medida que se va disminuyendo la velocidad va disminuyendo también la capacidad de frenado por lo que con este método no se puede aplicar un par de frenado estático al no haber más corriente que la resistencia pueda disipar.

Para la aplicación que se pretende realizar en el banco de ensayo la base técnica del frenado se basará en el frenado dinámico del motor. Para ello la propuesta es la de, mediante un controlador y una etapa de potencia, realizar un troceado de la corriente que se genera en el circuito del inducido, de este modo el control implementado cerrarà el circuito dejando pasar corriente a través de la resistencia de frenado y en consecuencia generando una carga, o abrirá el circuito impidiendo que se disipe corriente y evitando el efecto de frenado, de este modo se tendrá un control el cual permite obtener el valor de carga deseada y mantenerlo constante independientemente de las condiciones de velocidad.

3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Mediante el modelado del banco de ensayo se pretende implementar el control del sistema de frenado y justificar su funcionamiento por medio de simulaciones. Empleado el procedimiento SiL (Software in the loop) se recrea y simula el banco de ensayo para estudiar el comportamiento del controlador, de esta manera se evita consumir recursos innecesareos en cuanto a hardware y se optimiza el tiempo ya que sólo se didca tiempo de set-up una vez se tiene el modelo validado y se procede a el test de hardware.
En el esquema se muestra la arquitectura del banco de ensayo, sombreado en verde el sistema de carga ahora presenta una unidad de control que al igual que la del motor implementa un algoritmo para automatizar la aplicación de carga en los ensayos.

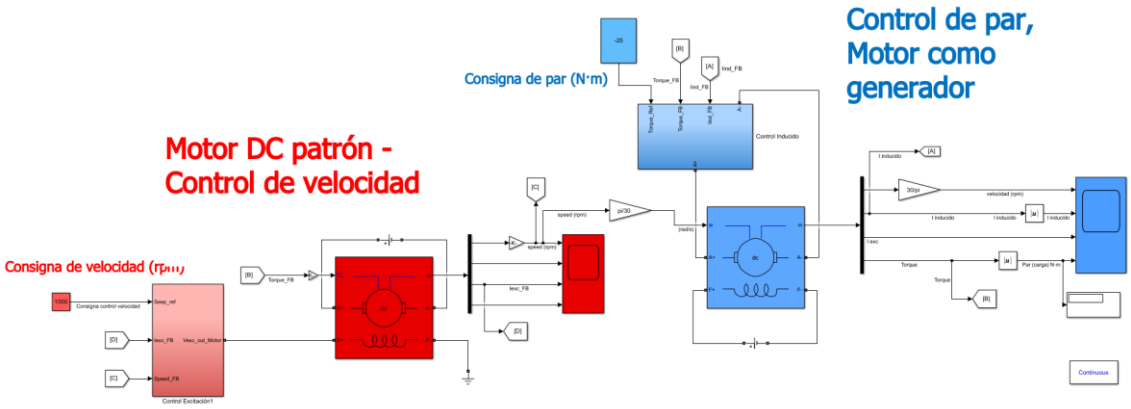


Esquema 7 Banco de ensayo con automatización

3.1. Entorno de simulación Simulink

El entorno Simulink es un toolkit del software Matlab el cual permite la construcción de modelos de todo tipo mediante diagramas de bloque y análisis mediante simulaciones. Al ser un entorno con lenguaje de alto nivel permite trabajar de forma muy gráfica ya que los bloques incluyen funciones, algoritmos y operaciones matemáticas por defecto. Además permite una fácil visualización de los resultados y unas extensas librerías de ayuda. Actualmente es un software ampliamente adoptado por todo tipo de sectores como el aerospacial, visión artificial, automoción, salud, etc.

3.2. Troceado de la corriente de inducido



Modelo 1 Esquema Simulink con troceado de corriente de inducido

Como previamente se ha mencionado el principio del control de la carga se basa en la técnica de frenado dinámico. Está técnica frena el motor a medida que se va disipando la corriente de inducido a través de una resistencia y eventualmente lleva el motor al paro completo.

Para la función de fuente de carga variable en el banco de ensayos interesa poder

controlar el valor de par que se aplica y mantenerlo constante, para ello se construye un modelo el cual se encarga de trocear la corriente que circula por la resistencia de frenado dejando pasar únicamente corriente cuando es necesario.

A continuación se describen los diferentes bloques que conforman este modelo y las funciones que desempeñan.

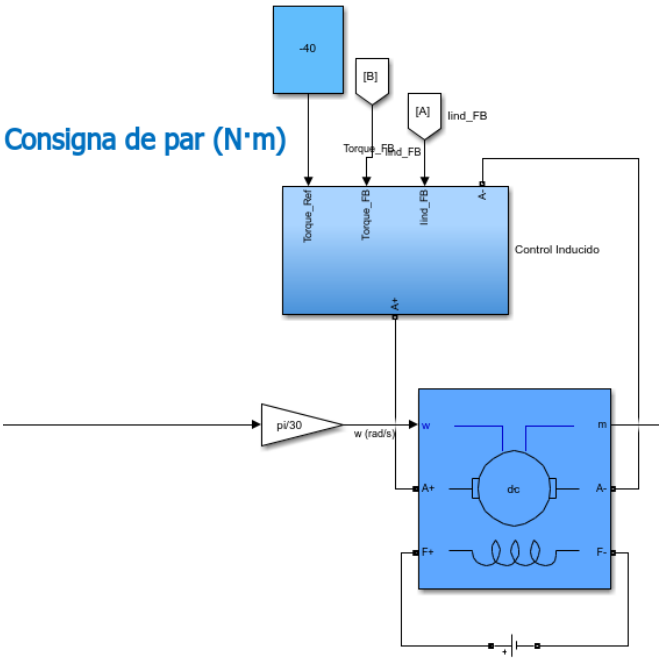


Ilustración 44 Detalle diagrama de sistema de frenado

En la ilustración 20 se observa el bloque del motor generador, con la excitación conectada a una alimentación fija y los terminales del inducido conectados al bloque que contiene el control. En este bloque se introduce la consigna de par que se desea aplicar.

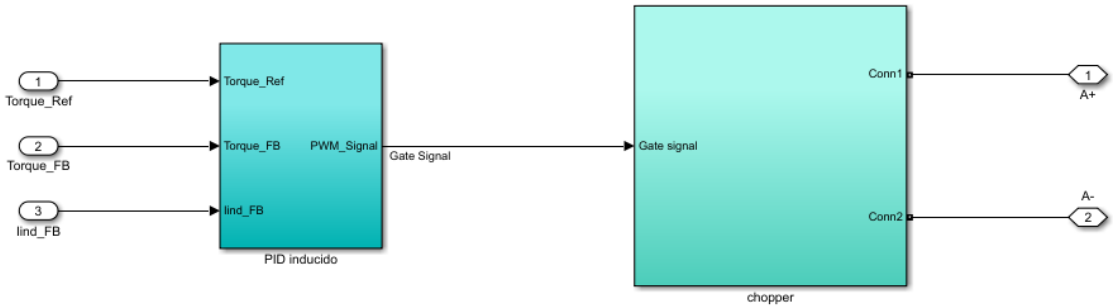


Ilustración 45 Control inducido

El bloque de control de inducido esta compuesto por dos sub-bloques, el control PID inducido i el “chopper” término técnico para referirse al troceador de corriente.

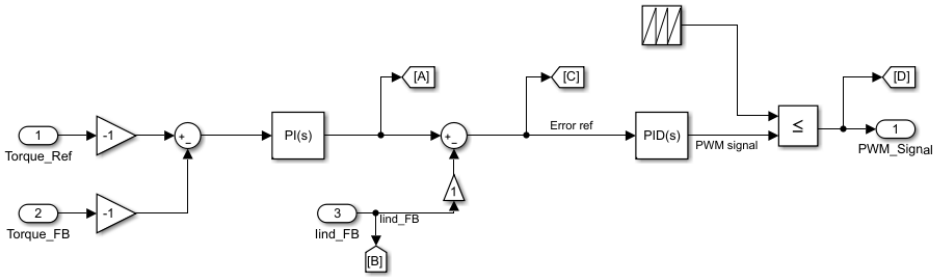


Ilustración 46 Lazos de control de corriente y par

Mostrado en la ilustración 22 se disponen dos lazos de control, un lazo para la corriente con un PID y un segundo lazo para el par con un PI, los cuales se han ajustado mediante prueba-error de las constantes proporcional, integral y derivativa. Mediante la comparación de la salida de los lazos de control y de una señal triangular se obtiene la señal de PWM (Pulse modular width) con la que se activa o desactiva el interruptor de estado sólido del bloque del troceador.

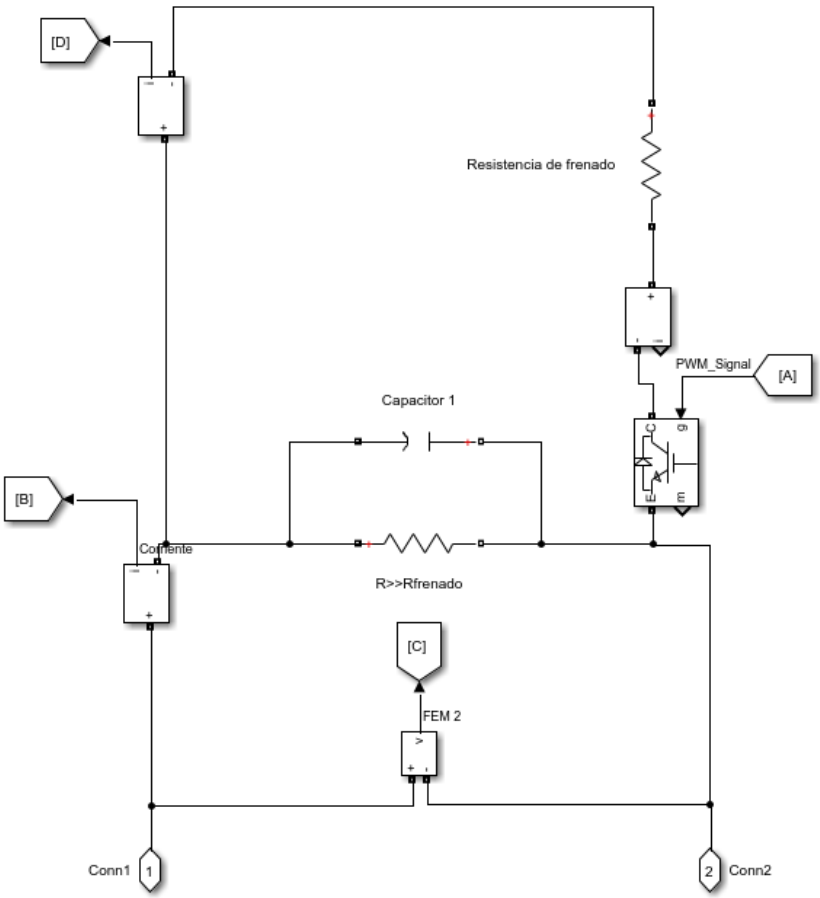


Ilustración 47 Troceador de corriente y resistencia de frenado

En la ilustración 20 se muestra el esquema eléctrico del troceador de corriente el cual consta de una resistencia de frenado de un valor de 10 Ohmios donde se disipa la corriente del inducido. Mediante el IGBT que se ha dispuesto se deriva la corriente a un

circuito eléctrico con una resistencia de valor mucho mayor que la de frenado junto a un condensador. Debido a las características de un motor CC de excitación independiente cuando el interruptor IGBT abre el circuito se produce una variación de flujo muy elevada y que puede dañar el circuito eléctrico del motor, por esta razón se dispone el condensador en paralelo al circuito para realizar una función de batería que impida que se descargue el circuito instantáneamente y que se generen elevadíssimos valores de FEM.

3.3. Troceado de la corriente de inducido y de excitación

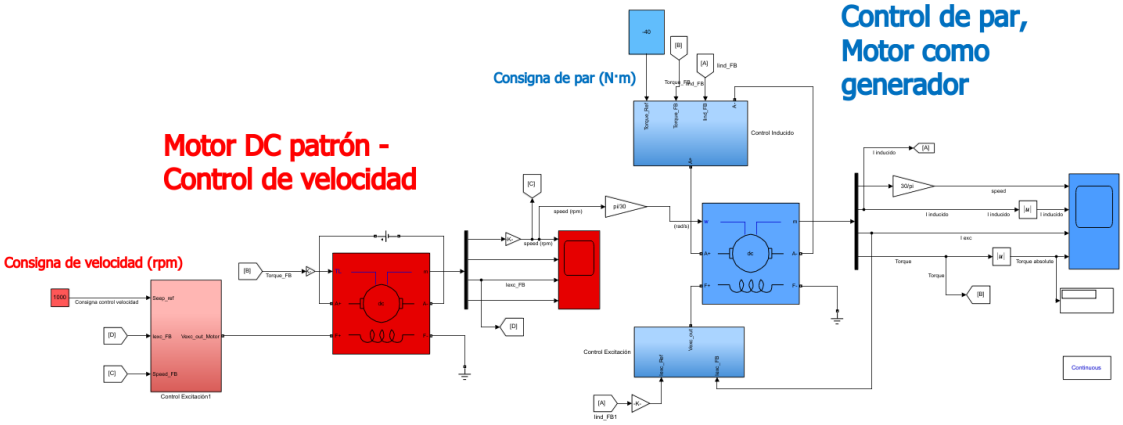


Ilustración 48

Dadas las facilidades de contruir modelos en la plataforma Simulink se ha realizado una versión del primer modelo con un troceador de corriente añadido a la excitación. Con esta confugración se pretende analizar si permite una controlabilidad aún más amplia que en el modelo inicial.

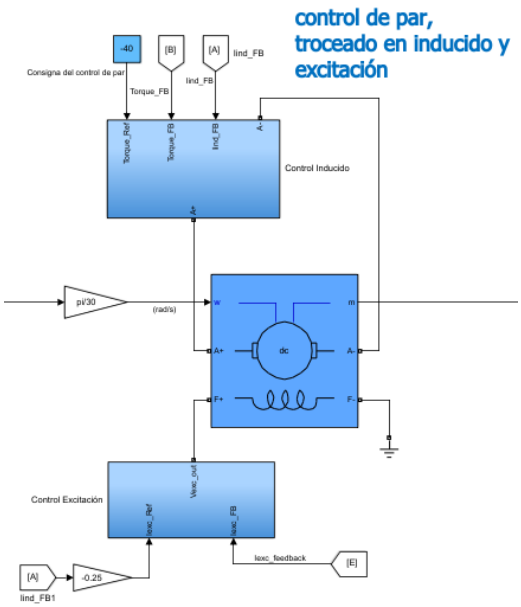


Ilustración 49 Sistema de frenado con troceado en inducido y excitación

Como se observa en la ilustración 21 se ha añadido un bloque de control al terminal de la excitación, a diferencia del bloque de control del inducido este sólo actua sobre la corriente de excitación ya que la entrada de consigna se realiza mediante el control de inducido, razón por la que presenta dos lazos de control (corriente y par).

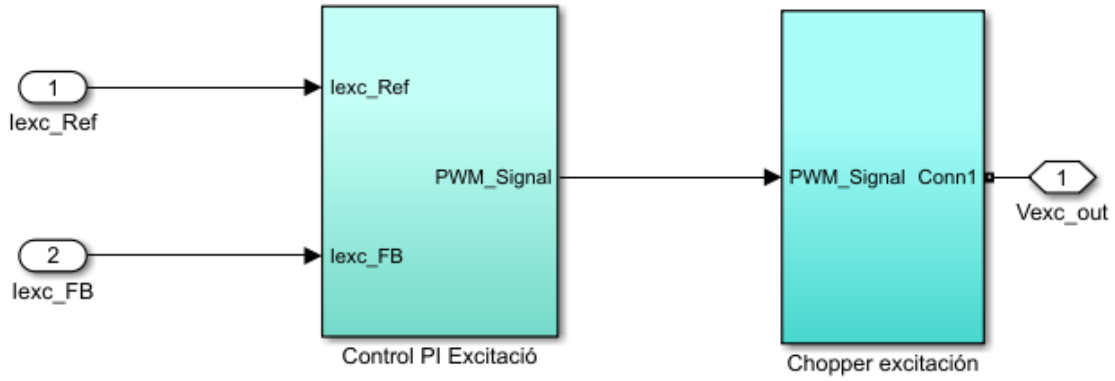


Ilustración 50 Sub bloques control excitación

Del mismo modo que en el bloque del inducido hay dos sub-bloques, uno para generar la señal PWM y el troceador que actua sobre la corriente de excitación.

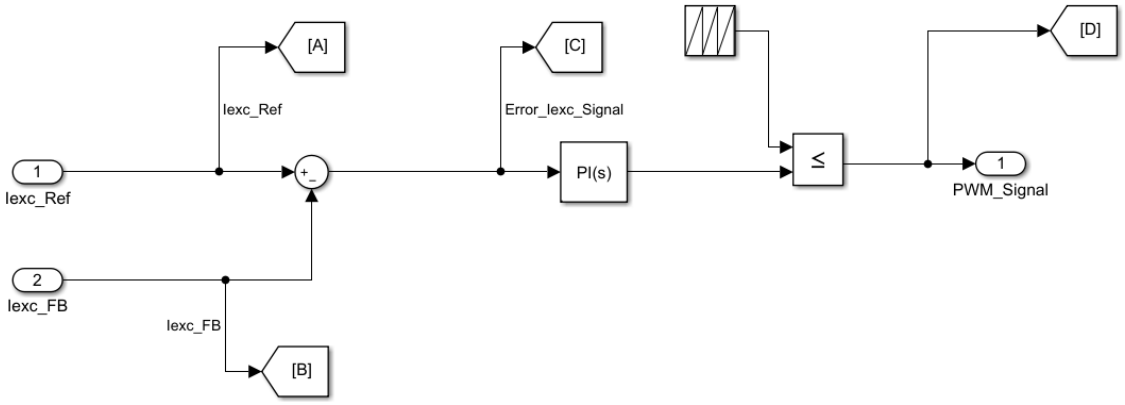


Ilustración 51 Lazo de control excitación, generación PWM

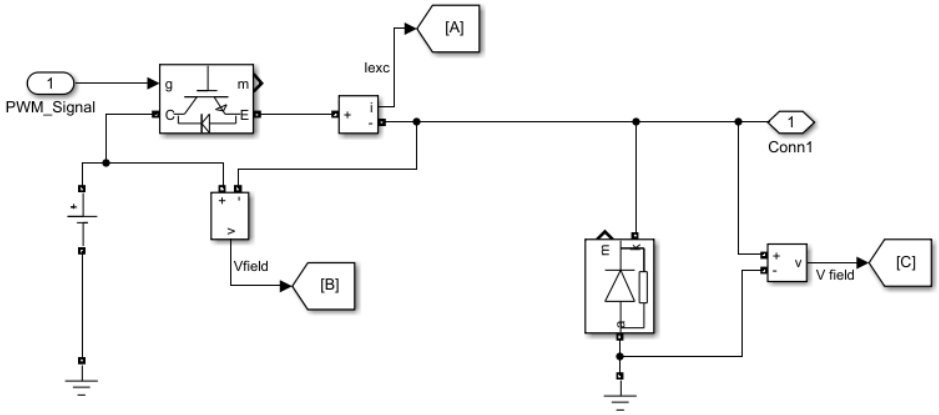


Ilustración 52 Esquema electrónica de potencia excitación

4. SIMULACIONES Y RESULTADOS

En la tabla 2 que se muestra debajo hay recopilados diferentes ensayos realizados con el motor HRM en el banco de ensayos descrito en el apartado 2.4 Banco de ensayo del GAECE. Para analizar el comportamiento de los modelos construidos en Simulink se realizaran un seguido de ensayos con un motor CC con control de velocidad al cual se le aplicarán distintas consignas de par.

Ref de medida	Velocidad rpm	Par Nm	Potencia Útil W	VBus V	Iref A	Ief fase A	Ángulo On (º)	Ángulo Off (º)	PphTot kW	Rend %	Data
1	3100	67,12	21980	562	85	53	-7	12	31,15	70,54	20/12/18
2	3110	61,8	20129	566	85	49	-6	12	29,4	68,5	22/03/19
3	3127	61,1	20012	566	85	47,75	-7	11	28,8	69,3	22/03/19
4	3595	63,5	23908	572	85	59	-9	12	34,92	68,46	22/03/19
5	2059	43,41	9361	574	50	31,13	-2	14	14,56	64,3	01/04/19
6	2000	59,19	12396	565	85	41,54	0	14	18,91	65,55	11/04/19
7	1078	26,4	2979	581	30	20,37	0	14	5,068	58,84	01/04/19
8	1236	60,24	7802	573	70	40,18	0	12,5	11,28	69	11/04/19
9	1323	64,24	8901	572	70	43,12	-1,5	13	12,469	71,40	11/04/19

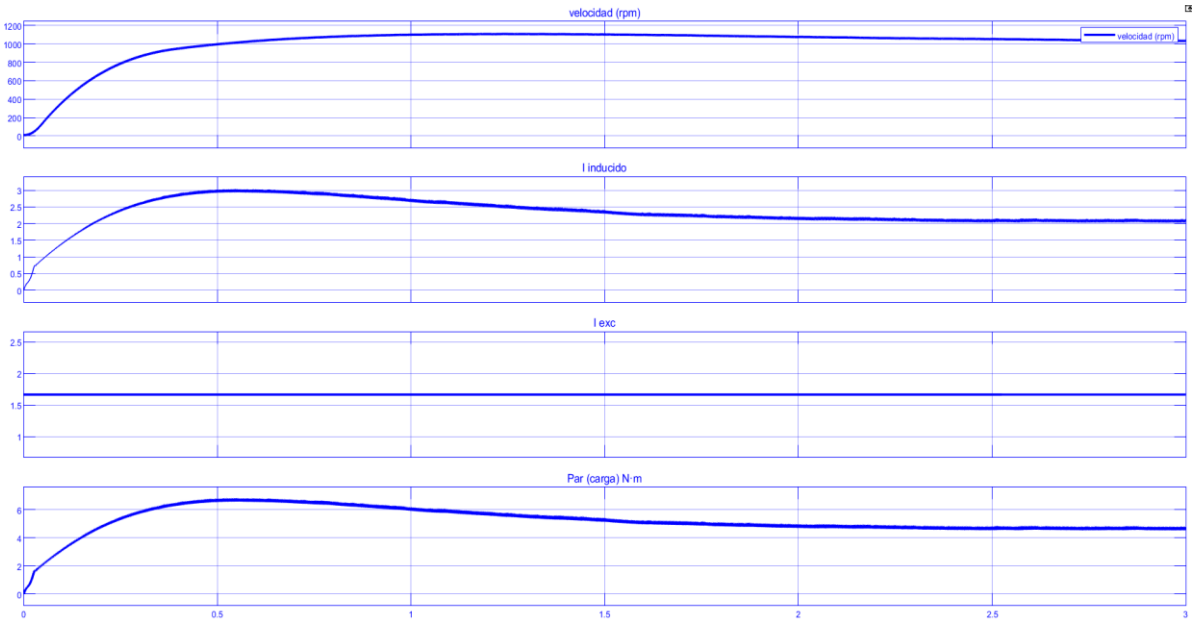
Tabla 2 Tabla de ensayos motor HRM Dr.Balduí Blanqué

4.1. Simulaciones Modelo 1. Troceado de la corriente de inducido

Condiciones de ensayo nº 1:

- Consigna de velocidad = 1000 rpm
- Consigna de par (carga) = 5N·m

Este ensayo se realiza con un índice de carga bajo para ver que el control responde con demandas poco exigentes.



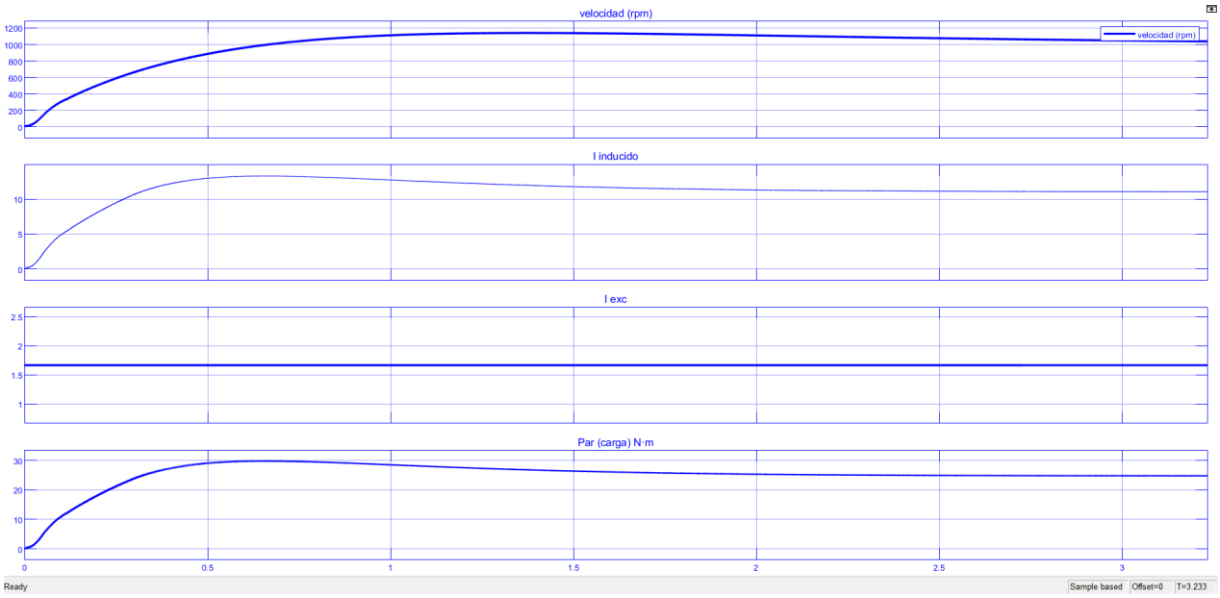
Scope 1 Modelo 1 a 1000 rpm y 5 N·m

El scope es un bloque que crea una ventana de visualización de señales en Simulink, mediante este podemos analizar el comportamiento del motor bajo el efecto del control programado. En el primer gràfico se observa la señal de velocidad del eje del banco de ensayo el cual se estabiliza a las 1000 rpm de consigna, luego podemos observar las corrientes de la fase de inducido y de la excitación donde claramente se aprecia que la corriente de inducido está sometida a un control de troceado mientras que la corriente de excitación es constante ya que los terminales están conectados directamente a la fuente de alimentación.

En la gráfica se observa la forma de la señal del par motor o carga que comparada a la forma de señal de la corriente de inducido y la del par se observa que estas tienen la misma forma ya que como se menciona en el punto 2.7, ecuación (3), el par motor es proporcional al corriente de inducido.

Condiciones de ensayo nº 2:

- Consigna de velocidad = 1000 rpm
- Consigna de par (carga) = 25N·m

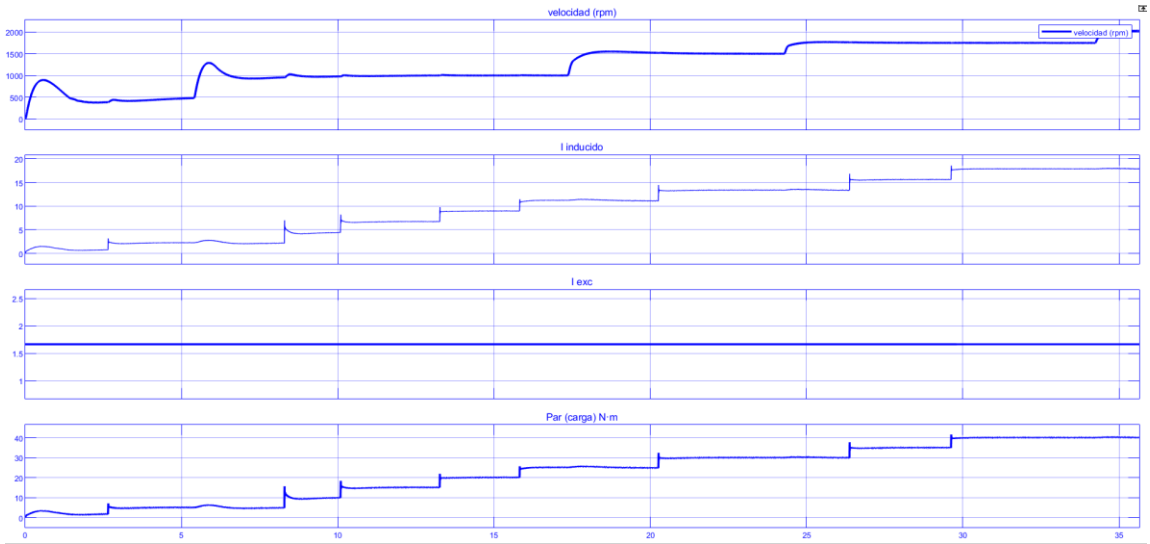


Scope 2 Modelo 1 a 1000 rpm y 5 N·m

Se observa que la corriente de inducido aumenta, por lo que se disipa más energía y se cumple la consigna de 25N·m

Condiciones de ensayo nº 3:

- Consigna de velocidad = 500 rpm,1000 rpm,1750 rpm, 2000 rpm
- Consigna de par (carga) de manera escalonada = 2N·m, 5N·m, 10N·m, 15N·m, 20N·m, 25N·m, 30N·m, 35N·m i 40N·m.



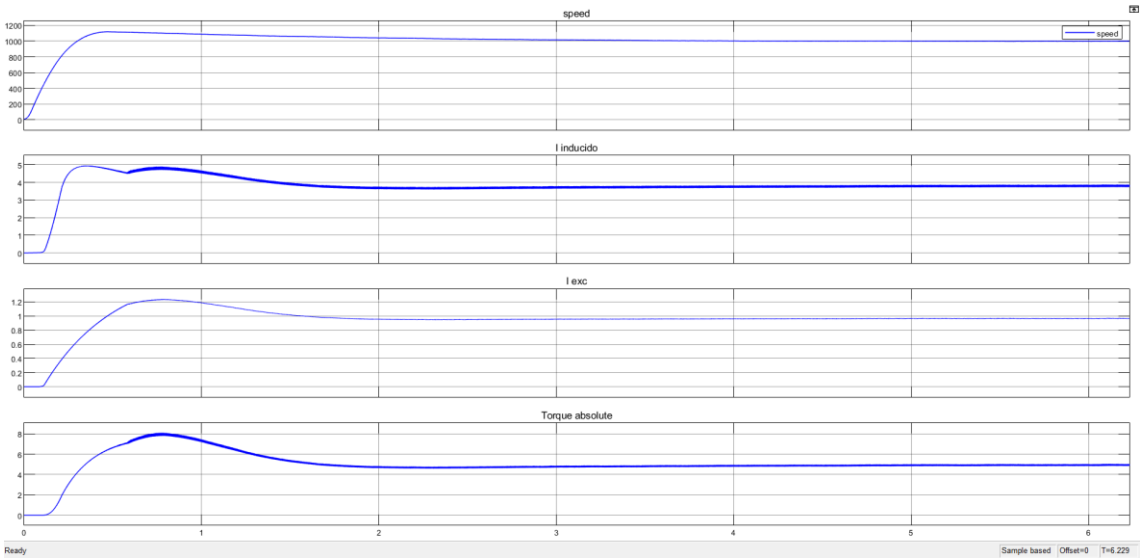
Scope 3 Modelo 1 de 500 rpm a 2000 rpm y 5 N·m a 40N·m

En este ensayo se puede comprobar el comportamiento dinámico del sistema de frenado, se empieza con un arranque suave a 500 rpm y 2N·m en el cual apenas se disipa corriente en la resistencia, se va subiendo la carga gradualmente a medida que se incrementa la consigna de velocidad hasta 40N·m y 2000 rpm respectivamente.

4.2. Modelo 2. Troceado de la corriente de inducido e excitación

Condiciones de ensayo nº 1:

- Consigna de velocidad = 1000 rpm
- Consigna de par (carga) = 5N·m

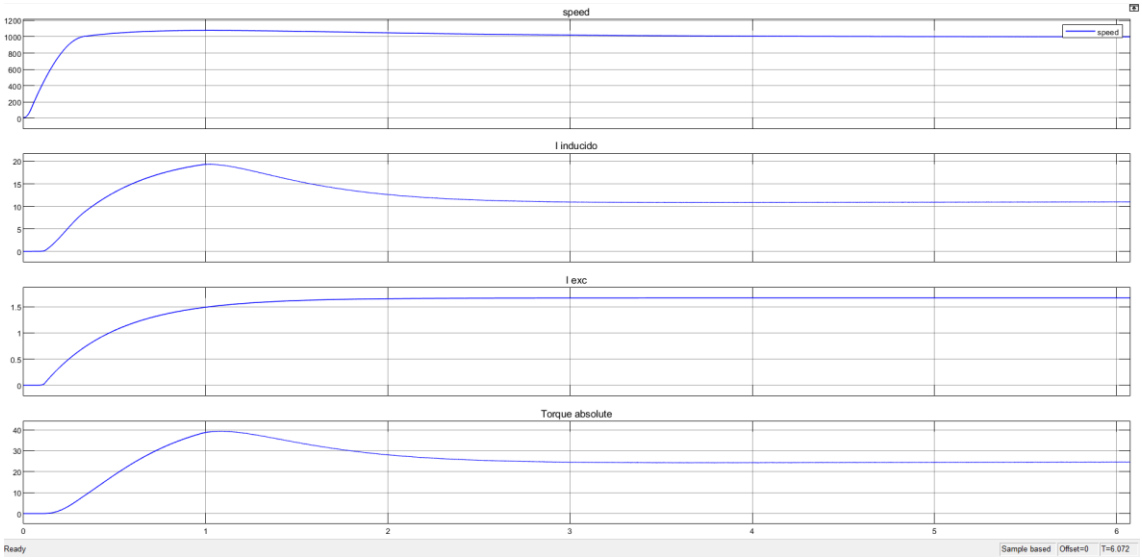


Scope 4 Modelo 2 a 1000 rpm y 5 N·m

En este ensayo a bajas rpm se observa que la implementación del troceado de corriente de la excitación introduce comportamientos no deseados, con un incremento del rizado de la señal de corriente del inducido y de par, esto es debido a que durante el régimen transitório de la corriente de excitación aparece un ligero sobrepico que obliga al control de inducido a compensar la corriente. Además al añadir otro troceador se tiene otro interruptor de estado sólido conmutando el circuito eléctrico a la orden de la señal de PWM del control de excitación.

Condiciones de ensayo nº 2:

- Consigna de velocidad = 1000 rpm
- Consigna de par (carga) = 25N·m

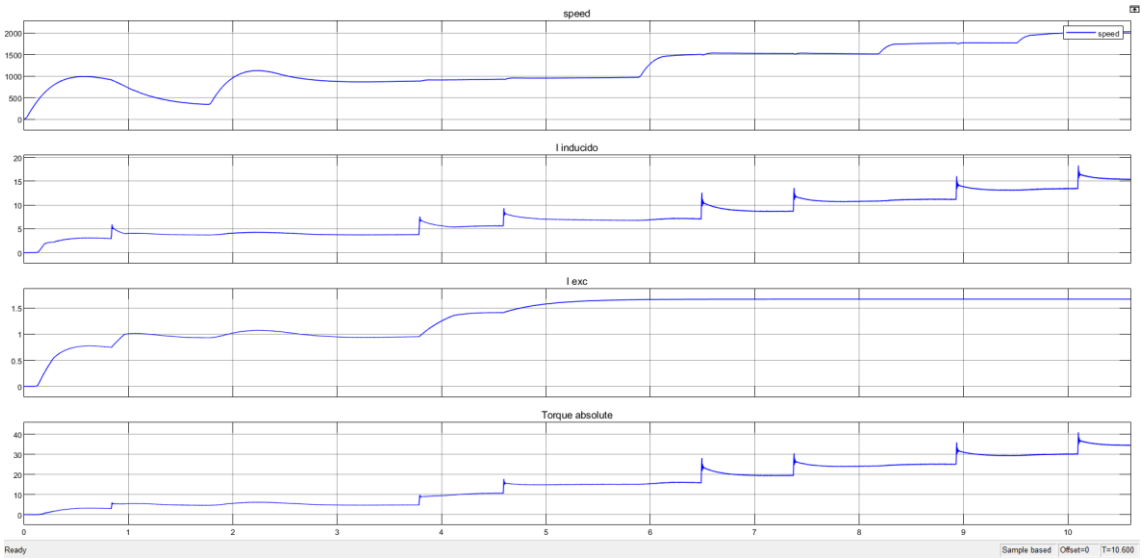


Scope 5 Modelo 2 a 1000 rpm y 25 N·m

Para velocidades iguales o superiores a 1000 rpm se observa un mejor comportamiento que en el ensayo nº1, como se ha comentado en el scope 4 ahora aparece un transitório de corriente en la excitación provocando que el control general sea ligeramente más lento.

Condiciones de ensayo nº 3:

- Consigna de velocidad = 1000 rpm
- Consigna de par (carga) = 25N·m



Scope 6 Modelo 2 de 500 rpm a 2000 rpm y 5 N·m a 40N·m

En el ensayo nº3 del modelo 2 se observa que al tener el corriente de excitación con variabilidad se generan unos picos de corriente en los cambios de carga lijeramente superiores a los del modelo 1.

4.3. Resultados

En las simulaciones se ha analizado los dos modelos construidos en el entorno Simulink, modelo 1 con troceado de corriente en el circuito del inducido y modelo 2 con troceado de corriente en el circuito del inducido e excitación. El modelo 1 representa la arquitectura clásica del frenado dinámico de un motor por lo que se tenia previamente la certeza de que el método es válido para desempeñar el control del sistema de frenado, el motivo de proponer el modelo 2 es el de proporcionar un mayor rango de controlabilidad, ofreciendo un valor de corriente de excitación para cada valor de corriente de inducido. De los ensayos se concluye que al introducir otro lazo de control esta vez en el circuito de la excitación se incrementa el tiempo de estabilización en el valor de la consigna de par, además la incorporación de un IGBT extra al sistema aumenta ligeramente el rizado de la corriente de inducido y en consecuencia la señal de par. Por estos motivos se justifica que el modelo a ser implementado es el modelo nº1 por su arquitectura más simple en la que menos variables influyen en el control y por tener un menor coste de implementación.

5. MANUAL DE IMPLEMENTACIÓN

En este apartado se pretende describer a modo de instrucción la futura implementación de la automatización del sistema de freno en las instalaciones de GAECE.

Para la implementación de la propuesta de automatización se requieren los siguientes

componentes:

- Placa dSPACE la cual se deberá instalar en un ordenador disponible del laboratorio, proviene de software donde se compila el modelo validado de Simulink.

Ilustración 53 Placa dSPACE

- Conexionado de señales dSPACE, en esta mesa se comunican las entradas y salidas del sistema de frenado, lecturas de par, velocidad, corrientes y señales de disparo.

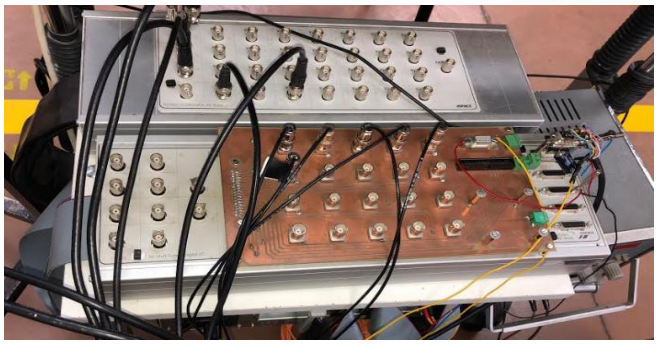


Ilustración 54 Mesa de conexionado de señales dSPACE

- Placa de control del IGBT, en esta placa se conectan las señales de disparo de la tarjeta dSPACE y se comunica con el IGBT.

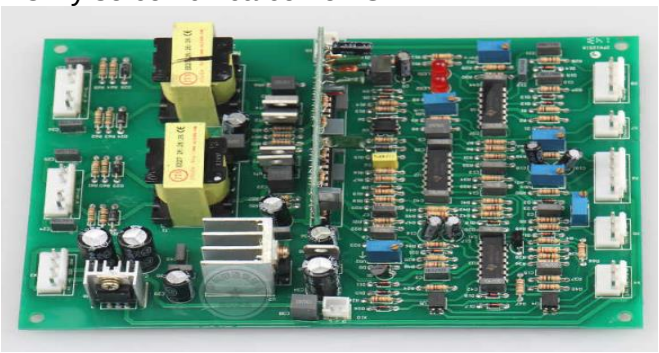


Ilustración 55 Placa control IGBT

- El transistor bipolar de puerta aislada, conocido por las siglas de IGBT. Activado por el control se encarga de realizer el troceado de la corriente del inducido abriendo o cerrando su circuito dejando paso a la corriente para que fluya por la resistencia de frenado.

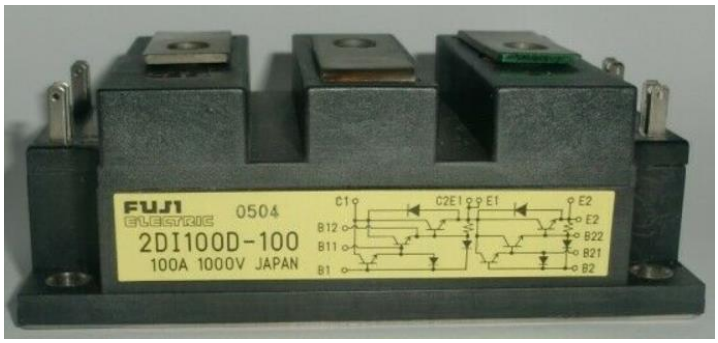


Ilustración 56 IGBT 1000V 100A

- La caja de resistencias se debe configurar para obtener el valor más pequeño de resistencia, de este modo el control es capaz de aplicar la carga con menor esfuerzo ya que con una resistencia de valor inferior se disipa más corriente del inducido.

Ilustración 57 Caja de resistencias laboratorio GAECE

- Se disponen un captador de corriente para medir de modo aislado la corriente que circula en la fase del inducido y enviar la lectura a la tarjeta dSPACE.

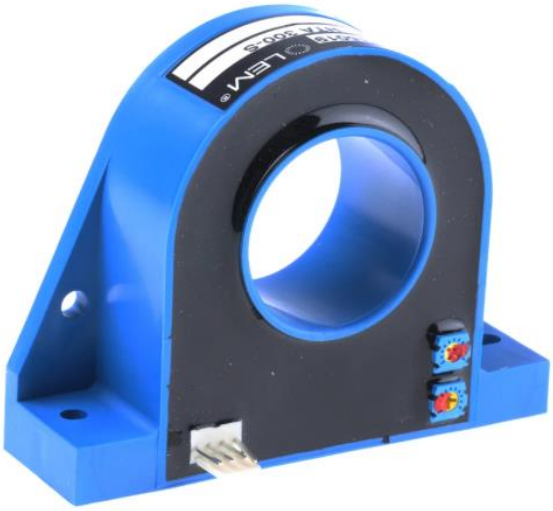


Ilustración 58 Sensor LEM

- Se dispone de un amperímetro de pinza para leer la corriente de la excitación a modo informativo ya que esta no aplica a la lógica de control. Además también

se disponen dos multímetros para visualizar la tensión de las fases.

Ilustración 59 Amperímetro de pinza

Ilustración 60 Multímetro

Una vez descritos los componentes necesários para implementar la automatización se debe seguir unos pasos para arrancar el control.

- Compilar el programa de Simulink al entorno dSPACE
- Comprobar mediante una prueba patrón (crear una senzilla señal de pulso) que el led de la señal de disparo se activa correctamente.
- Comprobar que todos los sensores, amperímetros y multímetros están activos y midiendo.
- Proceder a hacer un reset del sensor de par Kistler mediante el botón analógico en su estator. Esto evita offsets en la lectura de par.
- Configurar la caja de resitencias con el valor Ohmico mínimo que se tiene descrito en el modelo.

Una vez realizado este procedimiento se realiza una prueba con un índice de carga muy bajo para comprobar que el control está trabajando acorde a las especificaciones.

- Realizar prueba con motor a 1000 rpm y sistema de frenado con consigna de 5N·m.
- Comprobar la señal de corriente de inducido y la señal de par.

Una vez cumplidos todos estos puntos se procede a realizar los ensayos deseados.

6. COSTES DE PROYECTO

En este apartado se describen los costs de desenvolupamiento que hacen referéncia al coste de investigación de la matéria, desarrollo de los diferentes modelos, análisis de simulaciones, redacción de la documentación necesária y el diseño de piezas para el bacno de ensayo.

Desripción	Horas invertidas	Coste
Estudio teórico	100	2000€
Investigación	80	1600€
Construcción Modelo	70	1400€
Simulaciones	80	1600€
Documentación (memória)	215	4300€
Diseño de piezas	25	500€
TOTAL	570	11400€

Tabla 3 Detalle costes de desenvolupamiento

En esta tabla se recopilan los materiales que se requieren comprar para la implementación de la automatización del sistema de frenado, cabe resaltar que debido a los recursos que proviene el laboratorio del GAECE esta lista tabla contiene un reducido número de elementos de nueva compra o fabricación.

Descripción	Cantidad	Coste
IGBT (2DI100D-100 MODULE IGBT 100A 1000V NEW FUJI)	1	60€
Placa control IGBT (MIG NBC 250.270 300)	1	59,17€
Bridas acople motores	4	500€
TOTAL		619,17€

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Una vez culminado el trabajo propuesto de automatizar el sistema de frenado del banco de ensayos del GAECE se puede concluir que una mejora de la instalación de estas características es altamente necesária para profesionalizar un espacio de trabajo donde se realizan importantes investigaciones. Las tareas de tests y ensayos de acionamientos eléctricos representan una importante inversion de horas, donde el objetivo principal de un ensayo es poder obtener información con la máxima calidad possible para luego analizarla y obtener respuestas. De este modo la implementación de un control para el motor de corriente continua que trabaja como freno en el banco elimina funciones innecesarias que no aportan ningún valor a los tests, además se centraliza el commando de la instalación des de el ordenador eliminando así la necesidad de tenr que disponer otro integrante dedicado a la regulación de la tension de la fase de excitación del freno.

En cuanto a la solución obtenida después de realizar tareas investigación teórica, modelización y simulación se concluye que la opción con un control aplicado a la corriente del inducido mediante un troceador que regula la cantidad de energía que se disipa en la resistencia de frenado es la más adecuada para implementarse en el banco en detrimiento de la opción con doble control en la fase de inducido y de excitación, demostrando que la mejor solución siempre es la que tiene la arquitectura más simple e involucra los componentes mínimos.

Finalmente se originan unas futras líneas de trabajo las cuales pasan por implementar un sistema de refrigeración para la caja de resisténcias y de este modo mejorar la capacidad de realizar una mayor cantidad de ensayos en menos tiempo sin padecer pérdidas de rendimiento en la instalación debido a temperatura. Por otro lado aún teniendo un control implementado y haber centralizado la gestión de el banco de ensayo se abre una línea de trabajo para implementar una programación de ensayos preconfigurados de modo que automáticamente se ajusten los parámetros de carga según un determinado patrón de velocidades del motor en estudio
Por último se abre una línea de trabajo para la gestión de la energía empleada en los ensayos con la posibilidad de modelar el sistema de frenado mediante la técnica de freno regenerativo el cual recupera la electricidad que genera el generador cuando aplica la carga al motor. De este modo se recuperaría la electricidad, que se devolvería a la red o se almacenaría en baterías

8. SOSTENIBILIDAD Y RESPONSABILIDAD AMBIENTAL

Este proyecto presenta un impacto indirecto en la mejora de la gestión energética debido a que es una instalación clave para el desarrollo de nuevas tecnologías que optimizen diferentes tipos de accionamientos eléctricos, es por eso que la mejora en eficiencia de la instalación indirectamente influye en la mejora de la gestión energética en los acionamientos eléctricos que se investigan en el grupo GAECE.

Por otro lado en la configuración de la propuesta de automatización se ha tenido como prioridad generar cero residuos aprovechando todo el material posible como sensores, fuentes de alimentación, accionadores, etc. Únicamente se ha fabricado o comprado las piezas estrictamente necesarias para llevar a cabo la automatización de la propuesta, como se puede observar en el punto 6 Costes de proyecto la cantidad de elementos es

mínima.

9. BIBLIOGRAFIA

- ELECTROTECNIA. PABLO ALCALDE SAN MIGUEL. Publicado por Paraninfo (2004)

- 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.

- 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

- 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.

- 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

- A. 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.

- Zuo L., Fang L., Muhammad H.: Speed Nonlinear Control of DC Motor Drive with Field Weakening.

General:

- http://www.wiete.com.au/journals/WTE&TE/Pages/Vol.12,%20No.1%20(2014)/02-Chen-G.pdf

- https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/starting-a-dc-motor.html

- http://apps.geindustrial.com/publibrary/checkout/DET-700?TNR=Installation%20and%20Instruction%7CDET-700%7Cgeneric

- http://www.faz.unt.edu.ar/images/stories/pdfs/pva/0938.pdf

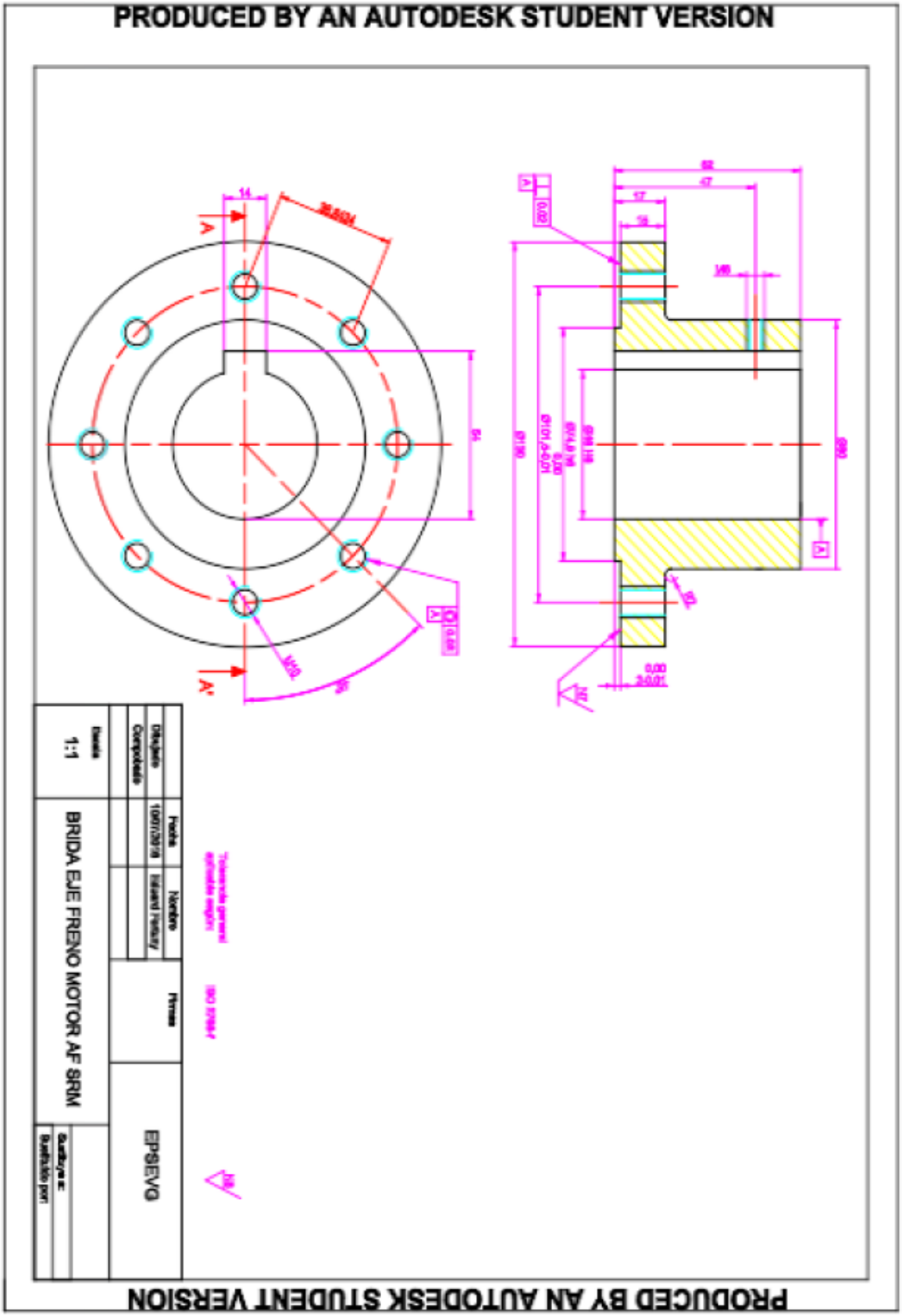
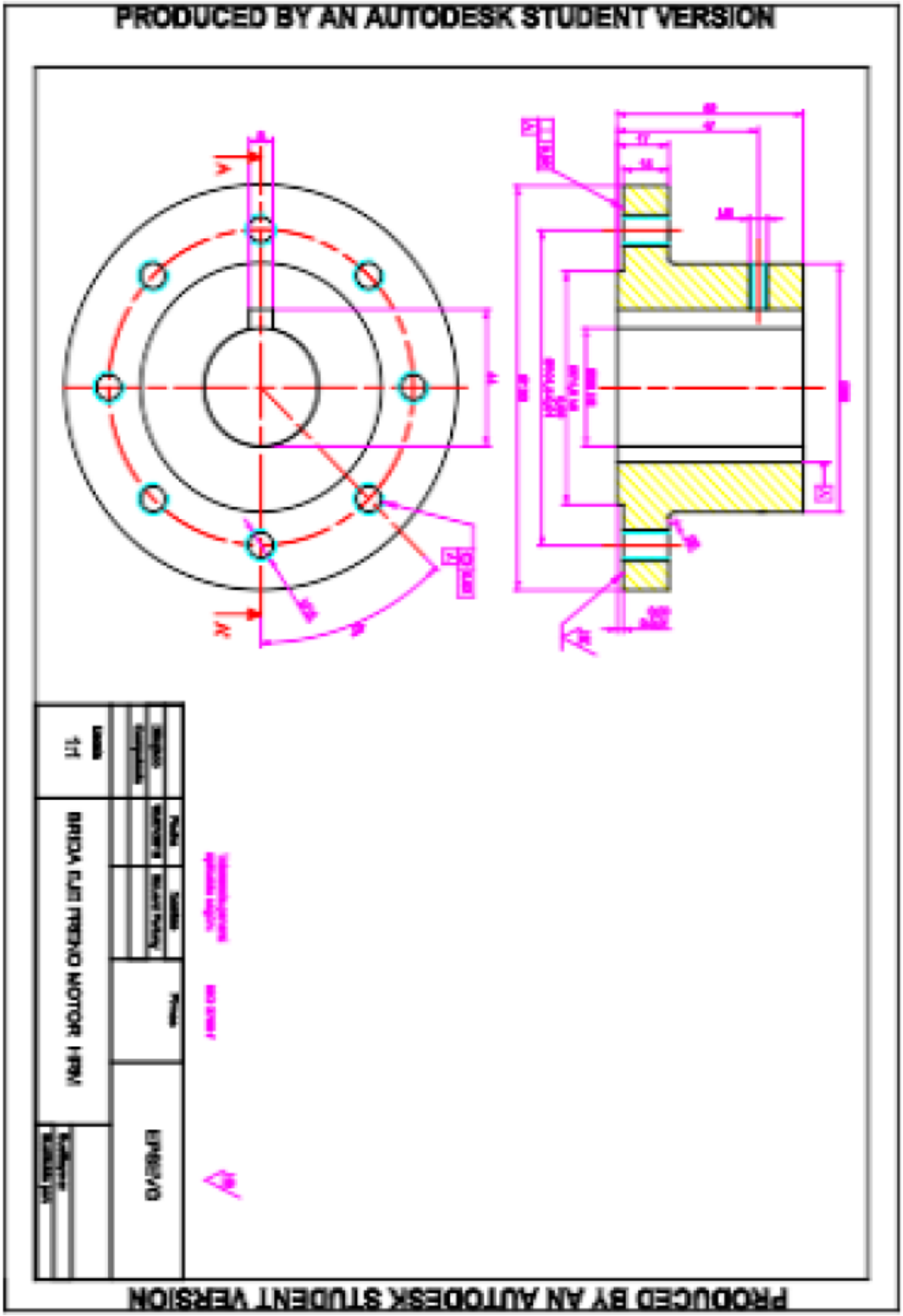
- http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/77544/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

AGRAÏMENTS

Al Dr.Balduí Blanqué Molina, per la seva paciència inesgotable, per la empatía que m'ha demostrat al llarg dels anys, per no tenir mai un no per resposta a una consulta en hores intempestives i per transmetrem amb il·lusió l'interés per als accionaments eléctrics.

ANNEX

- Anexo 1. Plano brida acoplamiento 1



- Anexo 1. Plano brida acoplamiento 2