



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica

Desarrollo de un sistema de caracterización de motores de corriente directa.

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

Presenta

LUIS ENRIQUE CALVILLO ZAMOREZ

Director de Tesis

M.I. HUMBERTO MANCILLA ALONSO

México, Ciudad Universitaria Septiembre 2011.





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

A DIOS, POR MOSTRARME EL CAMINO Y DARME LA FUERZA NECESARIA PARA NO DESFALLECERME NI PERDERME, INCLUSO EN LA NOCHE MAS OSCURA.

A MIS PADRES, QUE SIEMPRE HA ESTADO CONMIGO Y NUNCA HAN DEJADO DE CREER EN MI; A MIS HERMANOS, QUE HAN TENIDO QUE SOPORTAR MIS LOCURAS E INCLUSO HAN SIDO MIS COMPLICES; A MI PERRO BUCK, EL CUAL ME ACOMPAÑO EN MIS NOCHES DE VELA PREPARANDO EXAMENES O PROYECTOS.

A MIS MAESTROS, DE LOS CUALES ME LLEVO MÁS QUE SÓLO EL CONOCIMIENTO TÉCNICO, ME LLEVO LECCIONES DE VIDA, ME LLEVO COLEGAS Y ME LLEVO AMIGOS DE SUS CLASES.

FINALMENTE A MIS AMIGOS, CON LOS CUALES HE FORMADO EL MÁS BRILLANTE GRUPO DE INGENIEROS QUE JAMÁS CONOCERÉ.

ÍNDICE

RESUMEN	i
I. INTRODUCCIÓN	ii
II. ESTADO DEL ARTE	iii
III. CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	vi
III.I MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE	vi
III.II MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA CON EXCITACIÓN EN DERIVACIÓN	vii
III.III MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA CON EXCITACIÓN EN SERIE	vii
III.IV MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA CON EXCITACIÓN COMPUESTA	viii
IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	ix
V. OBJETIVO	ix
VI. HIPÓTESIS	ix
CAPÍTULO 1. EL PRIMER PASO, EL DISEÑO DE LA SOLUCIÓN	1
1.1 MODELO MATEMÁTICO	2
1.2 KA: PRUEBA A VELOCIDAD ANULAR CONSTANTE	6
1.3 Kb , R: PRUEBA A ROTOR LIBRE	7
1.4 J: LA PRUEBA ESCALÓN	9
CAPÍTULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL	11
2.1 DESCOMPOSICIÓN EN FUNCIONES	12
2.2 ANÁLISIS DE FUNCIONES	13
2.3 CONFIGURACIÓN	15
2.4 COMPOSICIÓN	20
2.5 EL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA	28
CAPÍTULO 3. DISEÑO A DETALLE	30
3.1 DISEÑO MECÁNICO	31
3.2 DISEÑO ELECTRÓNICO	33
3.3 PROGRAMACIÓN EN LABVIEW	38
CAPÍTULO 4. PRUEBAS.- CONDICIONES, RESULTADOS Y VALIDACIÓN	52
4.1 CONDICIONES DE LAS PRUEBAS	53
4.2 VARIANTES DE LAS PRUEBAS	54
4.3 PROGRESO DE LAS PRUEBAS	54
4.4 REPORTE DE LAS PRUEBAS EN EXCEL	56
4.5 GRÁFICAS Y VALORES OBTENIDOS	57
4.6 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS	62
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	64
5.1 LA HIPÓTESIS	65
5.2 EL DISEÑO, MANUFACTURA Y DESARROLLO	65
5.3 LOS RESULTADOS	65
5.4 EL FUTURO DEL SISTEMA	66
APÉNDICE A. PLANOS MECÁNICOS	68
APÉNDICE B. PLANOS ELECTRÓNICOS	77
APÉNDICE C. PROGRAMACIÓN	82
APÉNDICE D. ARCHIVO DE EXCEL	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

Resumen

El presente documento reporta los resultados de un proyecto dirigido a los alumnos, docentes e investigadores de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., cuyos proyectos les exige conocer el comportamiento de los motores eléctricos de corriente directa que en ellos intervienen. Resolver esta necesidad implica el desarrollo de un sistema capaz de brindarles esta información a los usuarios. En este proyecto se abarcaron tres áreas para la implementación del sistema a desarrollar:

- Diseño Mecánico
- Diseño Electrónico
- Adquisición de Datos e Interfaz humano-máquina

Cada uno de estos puntos es abordado con detalle en los capítulos que forman este trabajo. El diseño completo del sistema es una solución conjunta de cada una de las áreas involucradas, aunque se puede ver la solución de cada sección por separado, es importante que el lector tenga presente que es imposible una solución conjunta si se hacen las cosas por separado.

En este punto cabe señalar que no sólo se han diseñado los elementos del sistema, se han manufacturado y validado, de modo que en las conclusiones de este trabajo se podrá observar la funcionalidad de este proyecto, así como las ventajas que ofrece el uso de esta herramienta.

I. Introducción

El hombre por naturaleza siempre ha buscado la seguridad como parte fundamental de su bienestar. A lo largo de la historia las diversas culturas han procurado su seguridad alimenticia, económica, la seguridad en su salud y en sus bienes. El momento histórico en que vivimos no es diferente a los anteriores en este rubro. Hoy en día seguimos buscando la seguridad para sentirnos bien.

Sin embargo, el modo cómo buscamos hoy en día esa seguridad es lo que diferencia este momento en la historia del resto. Hoy en día confiamos en la tecnología y damos por sentado que el desarrollo tecnológico nos brindará las herramientas necesarias para procurar nuestro bienestar.

Esta seguridad en la tecnología nos ha orillado a mejorar nuestros conocimientos y habilidades en las herramientas que ya conocíamos y también nos ha inspirado a desarrollar nuevos caminos para satisfacer nuestras necesidades. El mundo de hoy está marcado por una tendencia de transferir nuestras responsabilidades a las máquinas, convirtiéndonos muchas veces en simples operarios o supervisores.

Esta tendencia nos ha llevado a mejorar la eficiencia y eficacia de nuestras máquinas actuales. En estos dispositivos es común observar movimiento de piezas mecánicas, ya sean elementos grandes como los techos retractiles de los estadios deportivos o elementos de dimensiones realmente pequeñas como los motores de los cabezales de los discos duros. Estos elementos se mueven gracias a la intervención de motores.

Existe una gran variedad de motores y diversas clasificaciones de ellos, sin embargo los motores que comienzan a dominar el panorama mundial son los eléctricos. Las ventajas de estos motores incluyen controles eficientes de velocidad, posibilidad de manipular grandes cargas, controles muy precisos de posición e incluso la posibilidad de actuar como generadores de energía en algún momento y no sólo como una carga en el circuito.

En nuestra búsqueda de seguir desarrollando tecnología que nos brinde más seguridad para el futuro, nos hemos dado cuenta que es necesario conocer más a fondo el comportamiento de los motores eléctricos. Esta necesidad ha definido en los últimos años un esfuerzo de la industria y las universidades por brindarle a los investigadores e ingenieros, métodos y herramientas adecuadas para comprender detalladamente el comportamiento de los motores eléctricos que intervendrán en sus proyectos.

Esta necesidad es la que nos ha motivado a brindar a nuestra Facultad un procedimiento y una herramienta que ayude a desarrollar mejores proyectos y prototipos en un futuro bastante cercano.

II. El estado del arte

Actualmente se cuentan con diversos dispositivos que buscan obtener los parámetros de los motores eléctricos. Cabe señalar que los dispositivos actuales no ofrecen las mismas constantes de caracterización, pues cada uno de ellos ha sido desarrollado para satisfacer necesidades específicas de su fabricante. Algunos de los sistemas existentes para obtener parámetros de motores eléctricos son:

- **Banco de Pruebas para la Caracterización de Motores Limpiaparabrisas aplicado en la Industria Automotriz**

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla con el apoyo de National Instruments, ha desarrollado un banco de pruebas para motores de CD aplicado en limpiaparabrisas de automóviles. Este banco de pruebas ha sido diseñado para obtener las curvas par torsional contra corriente (T vs. I) y par torsional contra revoluciones por minuto (T vs. w). Las curvas antes mencionadas se obtienen en un tiempo aproximado de 15 segundos. (Juárez)

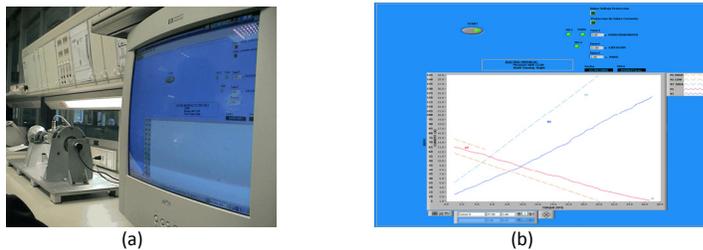


Figura I. Vista general del sistema de pruebas (a), panel frontal del sistema de pruebas (b) desarrollado en la BUAP

- **Valeo Sistemas Eléctricos**

Valeo sistema electrónicos, con apoyo de los programas del CONACYT, en 2002 se diseño y fabrico un banco de caracterización para motores eléctricos que sirven de limpia parabrisas traseros para automóviles. Este banco realiza pruebas de laboratorio a las curvas de torque de los diversos motores usados en elevadores automotrices, el tiempo de prueba oscila entre 2 horas y 8 días dependiendo de la prueba y la exactitud deseada. (Arribas, 2003)

- **Alecop**

Forma parte de Corporativo Mondragón, especializándose en el desarrollo de herramientas educativas.

La principal característica de estos productos es su diseño modular, mismo que les permite operar de forma independiente pero da la oportunidad de tener un mejor aprovechamiento de la herramienta al juntar todos los módulos.

Para los motores eléctricos se han desarrollado diversos módulos, uno de ellos el banco de ensayos modular BEM 199. Posee diversos módulos y también su propio programa para computadora. En la figura II se muestra en forma general este banco, este banco esta diseñado para enseñar el funcionamiento de motores síncronos, asíncronos, de escobillas etc motores comunes en laboratorios de maquinas eléctricas.

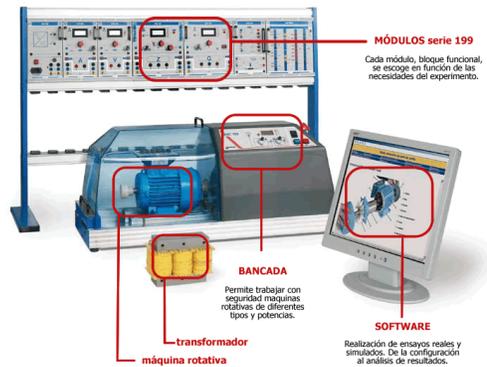


Figura II. BEM 199 de Alecop, su construcción modular permite obtener diversos resultados con una sola herramienta

La serie 540, correspondiente a los bancos para estudio de procesos de control de velocidad y posición, mantienen la construcción modular que ofrecen los bancos de Alecop. Los bancos correspondientes a esta serie permiten el control de velocidad y posición del rotor del motor, se pueden aplicar diversos tipos de señales de entrada al motor, como voltaje constante o entradas escalón y también acopla un encoder para la lectura de las RPM. La figura III muestra esta serie de bancos. (Alecop)

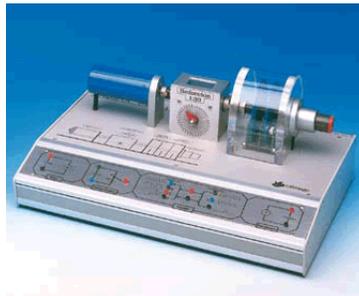


Figura III. Estudio de procesos de control de velocidad y posición SE540 de Alecop.

- **National Instruments**

Empresa dedicada al desarrollo de nuevas tecnologías para la instrumentación y control en la ingeniería, esta empresa desarrollo el software LabVIEW, el cual es un poderoso compilador gráfico ideal para soluciones que requieren poco tiempo de implementación y de fácil mantenimiento.

Esta empresa ha desarrollado un producto llamado QNET - 010: DC Motor Control, su objetivo es mostrar las principales cualidades de control en un motor de corriente directa, ofrece la ventaja de configurar rápidamente la velocidad y posición del motor.

Este banco cuenta con su fuente de voltaje integrada, un encoder de alta resolución y una carga de inercia variable. Cuenta con la tecnología Plug and Play, así como dimensiones que facilitan su almacenamiento. En la figura IV se aprecia el banco y su panel frontal. (Instruments)

Algunas pruebas que se pueden realizar en este banco son.

- Control de posición y velocidad
- Diseño del controlador PID
- Modelado y simulación del sistema
- Estabilidad de Nyquist
- Análisis de frecuencia.



Figura IV. QNET – 010 de National Instruments, esta herramienta es un modulo multifuncional para estudiar los motores de DC

III. Clasificación de los motores eléctricos

Existen diversos tipos de motores eléctricos, cada uno de ellos tiene sus características propias y aunque pudiera creerse que por ser todos eléctricos, tienen los mismos parámetros; la realidad es que cada familia de motores eléctricos tiene sus propias características.

Estas diversas características involucran velocidad de giro del rotor, fases de operación del motor, tipo de estator, aplicaciones especiales como motores a paso y por alimentación del motor.

Al ser un proyecto pensado en las necesidades de la comunidad educativa de la Facultad de Ingeniería, se centrará el problema en motores eléctricos alimentados por corriente directa (CD), ya que estos motores son los más empleados para la resolución de los proyectos en la Facultad.

Los motores eléctricos pueden dividirse en tres ramas por su alimentación:

- De corriente continua (CC), también llamados de corriente directa (CD)
- De corriente alterna (CA)
- Universales, funcionando con CA o CD

Los motores de CD pueden ser divididos por la forma como se excita su inducido, (Chapman, 2000), esta clasificación es la siguiente:

- Excitación independiente
- Excitación en derivación (Shunt)
- Excitación en serie
- Excitación compuesta

III.I Motores de corriente directa con excitación independiente

Son aquellos que obtienen la alimentación del rotor y del estator de dos fuentes de tensión independientes, la figura V muestra la representación esquemática del circuito equivalente. Con ello, el campo del estator es constante al no depender de la carga del motor y el par de fuerza es entonces prácticamente constante. Las variaciones de velocidad al aumentar la carga se deberán sólo a la disminución de la fuerza electromotriz por aumentar la caída de tensión en el rotor. Este sistema de excitación no se suele utilizar debido al inconveniente que presenta el tener que utilizar una fuente exterior de corriente. (Chapman, 2000).

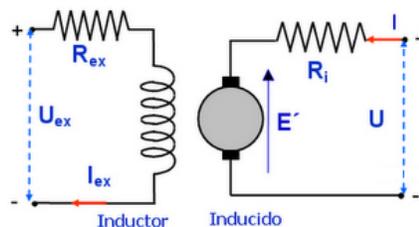


Figura V. Circuito eléctrico de un motor de corriente directa con excitación independiente. Cortesía (Gómez, 2010)

III.II Motores de corriente directa con excitación en derivación o tipo Shunt

Los motores con excitación en derivación, figura VI, constituyen el tipo más común de motor eléctrico de corriente directa que se puede encontrar en el mercado. Una de sus ventajas es el no tener la necesidad de requerir una fuente auxiliar para energizar el inducido, pues con una sola fuente se excita al inductor e inducido; también ofrecen torques de salida grandes y varias opciones para el control de velocidad de su rotor.

Los fabricantes nos ofrecen una variedad de motores, mismos que cambian según su construcción, sin embargo la gran mayoría de ellos son del tipo de excitación en derivación, este es el grupo de motores en el que se centrará el desarrollo del dispositivo de caracterización. (Chapman, 2000).

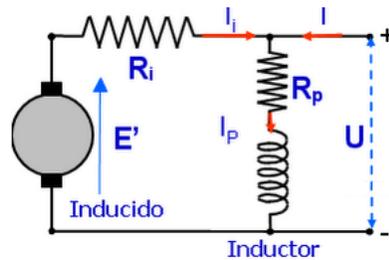


Figura VI. Circuito eléctrico equivalente de un motor eléctrico de corriente directa con excitación en derivación. Cortesía (Gómez, 2010).

III.III Motores de corriente directa con excitación en serie

Los devanados de inducido y el inductor están colocados en serie y alimentados por una misma fuente de tensión. En este tipo de motores existe dependencia entre el par y la velocidad; son motores en los que, al aumentar la corriente de excitación, se hace disminuir la velocidad, con un aumento del par. Este tipo de motores produce más par por amperio que cualquier otro motor de CD, estos motores se utilizan en aplicaciones que requieren pares muy altos como el arranque de vehículos automotores, motores de elevadores y motores de tracción de locomotoras. (Chapman, 2000)

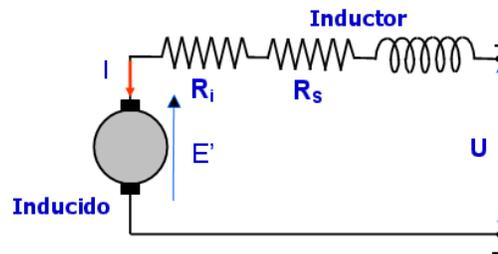


Figura VII. Circuito eléctrico de un motor de corriente directa con excitación en serie. Cortesía (Gómez, 2010).

III. IV Motores eléctricos con excitación compuesta

También llamados compound, en este caso el devanado de excitación tiene una parte de él en serie con el inducido y otra parte en paralelo. El arrollamiento en serie con el inducido está constituido por pocas espiras de gran sección, mientras que el otro está formado por un gran número de espiras de pequeña sección. Permite obtener por tanto un motor con las ventajas del motor serie, pero sin sus inconvenientes.

Existen dos tipos de excitación compuesta. En la llamada compuesta larga el sentido de la corriente que recorre los arrollamientos serie y paralelo es el mismo, por lo que sus efectos se suman, a diferencia de la compuesta corta, donde el sentido de la corriente que recorre los arrollamientos tiene sentido contrario y por lo tanto los efectos de ambos devanados se restan.

El motor compuesto corto presenta demasiadas inestabilidades producto de que las fuerzas magnetomotrices del campo en derivación y serie se restan. Esto sumado a que es un motor difícil de arrancar, hay que colocar en corto circuito la excitación serie, vuelven a este motor una opción casi nunca empleada. Mientras que el motor compuesto largo ofrece las ventajas de un motor excitado en serie y también tiene las ventajas de un motor en excitación tipo Shunt; en estos motores con cargas pequeñas se presenta un comportamiento de motor en derivación, mientras que al aumentar la carga se comporta mas como un motor en serie, lo que los vuelve una opción adecuada si en la aplicación buscada se requiere el comportamiento de ambos motores como levantar grandes pesos. (Chapman, 2000).

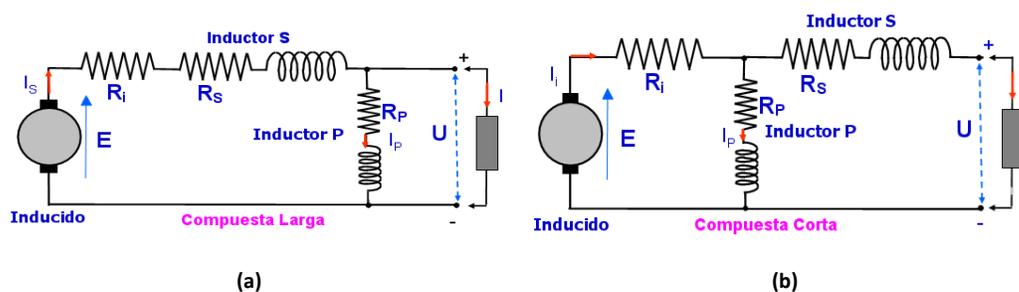


Figura VIII. Circuito eléctrico de un motor de corriente directa con excitación compuesta, compuesta larga (a), compuesta corta (b). Cortesía (Gómez, 2010).

IV. Planteamiento del problema

Se requiere diseñar, manufacturar y validar un sistema de pruebas a fin de caracterizar motores de corriente directa del tipo Shunt, dicho sistema debe poder desplegar los parámetros necesarios para calcular la función de transferencia de dichos motores.

Actualmente estos parámetros se pueden obtener con pruebas manuales, donde por medio de una fuente y un osciloscopio se pueden obtener las gráficas de caracterización de los motores. Estas pruebas pueden ser erróneas, pues el usuario puede cometer algún error al proporcionar la alimentación al motor o al leer el osciloscopio.

Se requiere que el sistema de pruebas a desarrollar reduzca lo más que se pueda la interacción del usuario con los motores, de este modo se tiene más seguridad de que el sistema de los valores deseados. Este sistema debe poseer tecnología escalable, para poder ajustarse en un futuro a los motores en uso; también se desea que el sistema sea de fácil transporte con dimensiones máximas de 30x15x15 [cm] y un peso no mayor a 2 [kg], así mismo por seguridad del sistema se busca que el sistema tenga el menor número de elementos desmontables y que su costo sea el menor posible.

Aunque se busca que el usuario tenga la menor interacción posible con la caracterización de los motores, se busca que el sistema desarrollado brinde la posibilidad de que de forma automática realice las pruebas necesarias para obtener los parámetros de los motores o en su defecto que de forma semi-automática, el usuario pueda seleccionar las pruebas deseadas.

V. Objetivo

Diseñar y validar los módulos mecánicos, electrónicos y de adquisición de datos de un sistema para caracterizar motores de corriente directa tipo Shunt, a fin de obtener los parámetros necesarios para implementar la función de transferencia del motor. Dichos parámetros son:

- K_a - Constante de torque del motor.
- K_b - Constante de velocidad del motor.
- R.- Resistencia de armadura del motor.
- J.- Inercia mecánica del motor.

VI. Hipótesis.

Diversas empresas e investigadores han desarrollado sistemas de caracterización de motores eléctricos. Estos dispositivos son capaces de desplegar diversas características de los motores las cuales dependen de la construcción de cada motor, y de la aplicación de cada motor. Los desarrollos realizados por estas empresas e investigadores permiten plantear la siguiente hipótesis:

Es posible el diseño y construcción de un sistema capaz de desplegar los parámetros necesarios para caracterizar motores de CD de tipo Shunt.

Capítulo 1. El primer paso, el diseño de la solución

João Magueijo¹ sostiene que la clave para encontrar respuestas está en saber como buscarlas. En este proyecto eso es un manifiesto irrefutable, pues en un motor no sólo se pueden definir cuatro parámetros como es nuestro objetivo, se pueden definir bastantes más. Es por ello que resulta fundamental definir que se está buscando y aun mas importante definir como se va a llegar al resultado, pues no se desea que después de realizar toda una prueba el resultado sea numéricamente correcto, pero físicamente sea un resultado no deseado.

El primer paso en ingeniería para comprender un sistema físico es modelarlo de forma matemática. Lo que nos indica que el primer paso para llegar a los resultados es modelar un motor de corriente directa.

Teniendo un modelo matemático resulta más fácil el identificar los parámetros buscados y más importante aún, es más sencillo observar como interactúan entre ellas y como se ven afectadas por posibles constantes del sistema. Partiendo del modelo matemático se pueden definir las pruebas que se requieran hacer para obtener los valores deseados; por lo que los primeros pasos que debemos dar para solucionar son: realizar un modelo matemático del motor, observar los parámetros que se desean conocer y finalmente determinar como interactúan entre ellas para así determinar la mejor forma de calcularlas.

Así pues, el primer paso para la solución de este problema, es convertir el sistema físico a un modelo matemático, a fin de realizar el mejor análisis posible de lo que se está buscando y de lo que se espera de resultado.

¹ João Magueijo. Profesor de Física y cosmólogo del Imperial College en Londres. Es el máximo representante de la teoría de la velocidad de luz variable la cual permite explicar diversos dilemas del Universo de una forma más simple que con las teorías convencionales aceptadas. Debido a su revolucionaria forma de ver la Física ha sido objeto de burlas por sus colegas en diversas ocasiones.

1.1 Modelado Matemático

Los motores eléctricos son la unión sinérgica de un sistema eléctrico y de un sistema mecánico. De manera ideal pensamos en los motores eléctricos como un elemento donde aplicamos un voltaje o corriente eléctrica y obtenemos un par o velocidad angular a la salida, figura 1. De manera minimalista esta visión es correcta, pero en sistemas donde se requiere un control avanzado y preciso de los motores esta visión queda demasiado corta.

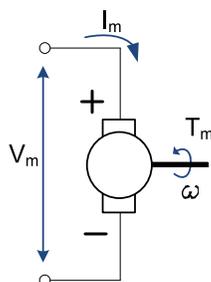


Figura 1. Representación general de un motor eléctrico de CD.

Una representación más fiel de los motores eléctricos debe considerar el comportamiento eléctrico de su devanado en el circuito de alimentación y también debe considerar la interacción de los elementos mecánicos con el medio donde la flecha gira.

El devanado de los motores de CD, es una sección de alambre de cobre enrollado sobre el rotor del motor. Al ser un alambre arrollado y al circular una corriente por él, este se comportará como un inductor; al mismo tiempo poseerá una resistencia eléctrica por la naturaleza misma del alambre.

En la flecha del motor se experimentan varias fuerzas, todas son pares de fuerza que actúan sobre el mecanismo del motor. La primera de ellas es el par desarrollado por el motor al aplicarle un voltaje y una corriente en sus terminales; pero también experimenta pares que se oponen a su libre movimiento y que influyen en el comportamiento mecánico del sistema. Uno de estos pares es producido por la fricción del ambiente y la flecha, mientras que el otro es el producto de la inercia misma de la flecha, este fenómeno de la inercia es explicado en la primera ley de Newton: *"Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él."* (García, 2003)

Estos elementos eléctricos y mecánicos alteran de forma sustancial la representación del motor en un diagrama, consecuentemente el modelo matemático se verá afectado. La figura 2 nos muestra la representación en diagrama del motor teniendo en cuenta los elementos eléctricos y mecánicos que en él intervienen.

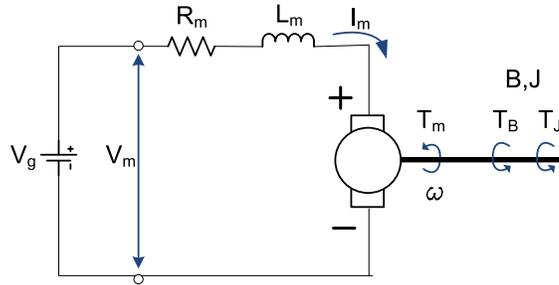


Figura 2. Modelo completo de un motor de CD, esta representación considera todos los elementos que intervienen en la operación de un motor eléctrico.

El modelo matemático del sistema completo deberá considerar los elementos mecánicos y eléctricos del motor y relacionar las ecuaciones de cada elemento en una sola función de transferencia.

El modelo matemático, como función del tiempo, que describe la parte eléctrica del motor de corriente directa se muestra en la ecuación (1) (Ogata, 2004)

$$L_m \frac{di_m}{dt} + R_m i_m + V_m = V_g \quad (1)$$

En la ecuación (1) se puede realizar la siguiente sustitución:

$$V_m = K_b \omega$$

Donde K_b es la constante de velocidad del motor, dicha magnitud relaciona el voltaje generado en las terminales del motor en función de la velocidad angular de la flecha; esta es una relación lineal y es representada por una recta donde la pendiente simboliza el valor de la constante K_b , hecha la sustitución anterior la ecuación queda reescrita como:

$$L_m \frac{di_m}{dt} + R_m i_m + K_b \omega = V_g \quad (1.1)$$

Los elementos mecánicos del sistema, también pueden ser descritos por una ecuación matemática. Esta representación se aprecia en la ecuación (2)

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = T_m \quad (2)$$

En esta última ecuación, ecuación (2), se puede realizar la siguiente sustitución:

$$T_m = K_a i_m$$

Donde K_a representa la constante de torque del motor, la cual señala la relación que existe entre el par entregado por la flecha y la corriente eléctrica suministrada a las terminales del motor. Esta es una relación lineal modelada por una recta, donde la pendiente de la misma señala el valor de la constante K_a . Realizando dicha sustitución tenemos:

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = K_a i_m \quad (2.1)$$

Finalmente en la ecuación (2.1) se realizará una nueva sustitución:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

Esta sustitución se debe a que resulta más de interés el conocimiento de la velocidad angular del motor que la posición de su flecha en cada instante, al menos para nuestro objetivo. Por lo que la ecuación (2.1) nos queda:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = K_a i_m \quad (2.2)$$

Las ecuaciones (1.1) y (2.2) modelan la parte eléctrica y mecánica respectivamente, de un motor eléctrico de corriente directa tipo Shunt, dichas partes mecánica y eléctrica se representan en la figura 3.

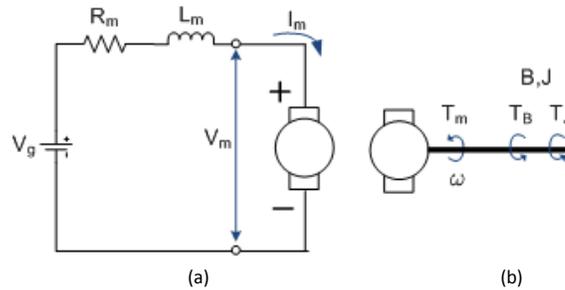


Figura 3. Elementos eléctricos de un motor de CD (a); elementos mecánicos de un motor de CD (b)

Es necesario relacionar las ecuaciones (1.1) y (2.2), con la finalidad de que puedan ser escritas como una sola ecuación que modele las dos partes del motor. La relación entre estas ecuaciones está dada por la corriente eléctrica suministrada al motor, pues este parámetro se encuentra presente en el modelo matemático de la parte mecánica y de la parte eléctrica.

Despejando la corriente eléctrica de la ecuación (2.2) obtenemos:

$$i_m = \frac{J}{K_a} \frac{d\omega}{dt} + \frac{B}{K_a} \omega \quad (2.3)$$

Sustituyendo la ecuación (2.3) en la ecuación (1.1) obtenemos:

$$\frac{L_m J}{K_a} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \left(\frac{L_m B}{K_a} + \frac{R_m J}{K_a} \right) \frac{d\omega}{dt} + \frac{R_m B \omega}{K_a} + K_b \omega = V_g \quad (3)$$

En la ecuación (3) se observa el comportamiento matemático completo del sistema, es importante señalar quien es la variable de entrada al sistema y cuál es la variable de salida de interés. En este caso la variable de entrada por excelencia es el voltaje de entrada o V_g , mientras que la variable de salida de interés es la velocidad angular de la flecha del motor ω .

La función de transferencia es una relación que existe entre la variable de entrada y la variable de salida, dicha relación es similar a un cociente de variables. Para poder escribir esta relación de variables a partir de la ecuación (3), se hará uso de la transformada de Laplace, la cual es una herramienta que es capaz de transformar una ecuación diferencial a una ecuación algebraica, la cual resulta más simple de operar.

Sin embargo, antes de realizar la Transformada de Laplace se plantearan las siguientes consideraciones:

- ✓ Todas las condiciones iniciales (C.I.) del sistema tendrán un valor de 0, C.I.=0, esto debido a que el análisis del sistema comienza en el reposo donde no existe voltaje, corriente o velocidad angular en el motor.
- ✓ El valor de la inductancia del motor, L_m , es despreciable. Esta inductancia posee un valor mayor a cero, pero en el circuito eléctrico su efecto es mínimo comparado con el de la resistencia del motor, por lo que el circuito eléctrico estará gobernado en su mayoría por las cualidades resistivas del embobinado y en una minoría por las propiedades inductivas del mismo.
- ✓ El valor de la fricción con el medio, B , se puede despreciar pues en la flecha este efecto es minimizado por los rodamientos de los motores. Esto provoca que la inercia misma de la flecha sea mucho más notoria que la propia fricción que pueda existir con el medio.

Con estas consideraciones, la Transformada de Laplace de la ecuación (3) nos queda:

$$\frac{R_m J}{K_a} s\omega(s) + K_b \omega(s) = V_g(s) \quad (4)$$

De la ecuación (4) obtenemos la función de transferencia que nos queda de la siguiente forma:

$$\frac{\omega(s)}{V_g(s)} = \frac{\frac{K_a}{JR_m}}{s + \frac{K_a K_b}{JR_m}} \quad (4.1)$$

Reescribiendo la ecuación (4.1) tenemos finalmente:

$\frac{\omega(s)}{V_g(s)} = \frac{a}{s+b} \quad (5)$ $a = \frac{K_a}{JR_m}$ $b = \frac{K_a K_b}{JR_m}$
--

1.2 K_a : Prueba a velocidad angular constante

Se sabe que el parámetro K_a relaciona de forma lineal el par entregado por la flecha del motor con la corriente eléctrica que se le suministra. Por lo que se busca diseñar una prueba donde se pueda medir en todo momento el par y la corriente eléctrica del motor a fin de poder calcular K_a .

Se propone acoplar un par de motores, uno de estos motores deberá fungir como motor patrón (MP) del cual se conoce completamente su dinámica interna; el otro motor es aquel del cual se buscan calcular sus parámetros (MT).

El MP deberá girar a una velocidad angular constante y conocida, mientras que en el MT se incrementará gradualmente su voltaje. Mientras el MP nos entrega una velocidad angular conocida, el MT al girar modificará dicha velocidad angular lo que obligará al MP a restablecer la velocidad angular constante incrementando el par otorgado en la flecha a fin de contrarrestar los efectos mecánicos del MT.

Puesto que las flechas están conectadas, se puede asumir que el par experimentado en los dos motores, siempre que la velocidad angular permanezca constante, es el mismo en ambas flechas. Dado que es posible calcular el par del MP en cualquier momento, se tiene el par del MT en todo instante. Al momento en que se incrementa el voltaje en el MT y sólo cuando el MP haya recuperado la condición de velocidad angular constante, se medirá la corriente en el MT.

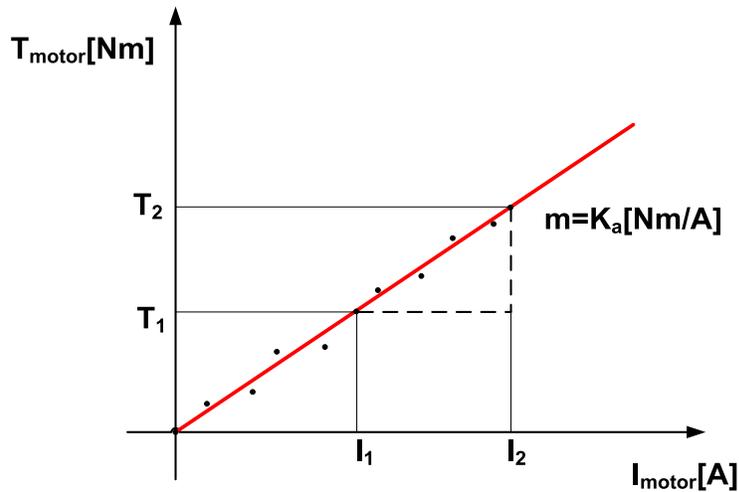
Al cumplir estas condiciones se tendrían los datos necesarios para calcular la relación existente entre la corriente del motor y su par entregado, haciendo posible el cálculo de K_a .

Los valores obtenidos del par del MT, (T_{motor}), y de la corriente del MT, (I_{motor}), para cada valor del voltaje del motor, (V_{motor}), se registrarán en una tabla para graficar posteriormente el par del MT contra la corriente del MT. En esta gráfica por medio de regresión lineal se obtendrá la ecuación que mejor modele el comportamiento de los puntos, esta ecuación tendrá la forma de la ecuación (6), de donde se puede observar que el valor que se busca en esta prueba es la pendiente de la recta. En la gráfica 1 se muestra una representación general de la forma que tendrá la gráfica obtenida en esta prueba.

$$T_{motor} = K_a \cdot I_{motor} \quad (6)$$

De donde:

$$m = K_a = \frac{T[Nm]}{I[A]}$$



Gráfica 1. T_{motor} vs I_{motor} su pendiente es K_a

1.3 Kb, R: Prueba a rotor libre

Mientras un motor eléctrico se encuentra en operación, se presenta una fuerza conocida como Fuerza Contra Electro Motriz, FCEM, la cual tiene la característica de que busca contrarrestar los cambios en los campos electromagnéticos; es decir la FCEM se presenta siempre que un campo electromagnético sufre alteraciones buscando contrarrestar estas alteraciones para conservar el llamado estatus quo. En un circuito eléctrico esta FCEM se manifiesta como un voltaje en sentido contrario al aplicado por la fuente, es decir, el motor de corriente directa al estar operando altera su campo magnético interno forzando la aparición de la FCEM la cual genera un voltaje de salida, este comportamiento hace que el motor se comporte como si fuera un generador.

El campo magnético del motor de corriente directa se afecta en función de la velocidad angular de su flecha, lo que plantea que la FCEM y la velocidad angular ω_{motor} están relacionadas. K_b es la constante que relaciona estos dos fenómenos.

La FCEM del motor, $FCEM_{motor}$, y la velocidad angular del mismo, ω_{motor} , se relacionan de manera lineal por medio de una constante de proporcionalidad llamada K_b . Para obtener esta constante de proporcionalidad se requiere aumentar el voltaje en las terminales del motor y medir la velocidad angular que la flecha adquiere con cada incremento de voltaje. Estos datos serán recolectados en una tabla para posteriormente graficarlos; la gráfica describirá una recta de la cual por regresión lineal nos dará la ecuación de la recta y con ello la pendiente que representa K_b , la constante de proporcionalidad buscada.

La resistencia de armadura, R, hace referencia a la resistencia eléctrica natural del alambre que forma el devanado del motor; dicha resistencia se rige bajo la ley de Ohm, ecuación (7). Esta ley nos muestra que el voltaje, V, y la corriente, I, que describen a un circuito resistivo, como el devanado del motor, están relacionados por una constante de proporcionalidad. Dicha constante es el valor de la resistencia eléctrica del circuito. Para obtener el valor de la resistencia de la armadura del motor podemos aprovechar el comportamiento del motor bajo la ley de Ohm y tomar diversas lecturas para los valores de voltaje del motor, V_{motor} , y de la corriente en el motor, I_{motor} . Estos valores de voltaje y corriente serán tabulados y posteriormente graficados. La grafica describe una recta que por regresión lineal arrojará un modelo de la recta donde se podrá apreciar el valor de la resistencia.

$$V = RI \quad (7)$$

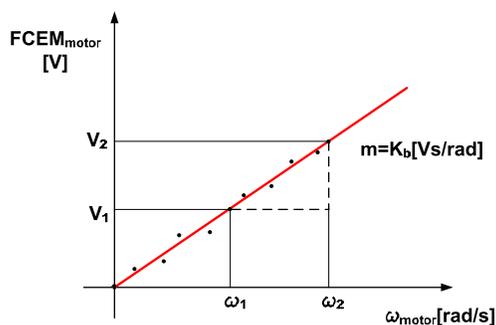
Las ecuaciones (8) y (9) muestran el comportamiento de K_b y R respectivamente

$$FCEM_{motor} = K_b \cdot \omega_{motor} \quad (8)$$

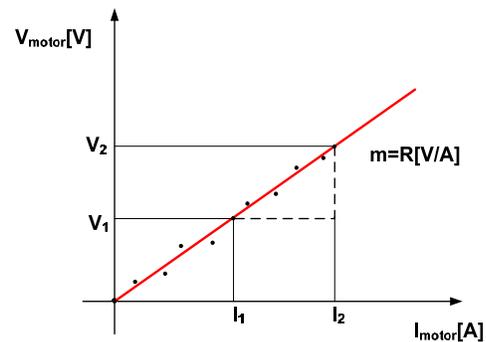
$$V_{motor} = R_{motor} I_{motor} \quad (9)$$

En esta prueba se incrementará el V_{motor} , por lo que se pueden medir para cada valor de voltaje la velocidad angular y la corriente del motor a fin de completar las tablas de K_b y R al mismo tiempo.

Las gráficas 2 y 3 muestran, respectivamente, el comportamiento esperado de la FCEM contra la velocidad angular del mismo y el comportamiento del voltaje aplicado al motor y la corriente consumida por el motor.



Gráfica 2. $FCEM_{motor}$ vs ω_{motor} , la pendiente describe la constante K_b del motor



Gráfica 3. V_{motor} vs I_{motor} , la pendiente es la R del motor

1.4 J: La prueba escalón.

Al realizar el modelado matemático del motor, se observa que el motor es un sistema de primer orden. Cuando en estos sistemas, la entrada corresponde a un escalón unitario, presentan una constante de tiempo, tau τ , la ecuación (10) muestra la forma general en el dominio del tiempo de la ecuación de un sistema de primer orden. El valor de dicha constante está relacionada con el tiempo que debe transcurrir para que el sistema alcance el 63.2% del valor de salida.

$$C(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

Cabe mencionar que mientras más pequeña es la constante de tiempo de los sistemas, estos alcanzan más rápido su valor final. En estos sistemas, la constante de tiempo se utiliza como parámetro para indicar cuanto tiempo tardaría el sistema en alcanzar el nivel de salida deseado, en general se dice que cuando el tiempo transcurrido es cuatro veces el valor de la constante, $t=4\tau$, el sistema se encuentra en una salida de $\pm 2\%$ del valor de salida deseado.

Dicha constante está definida en los motores eléctricos por la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{JR_{motor}}{K_a K_b} \quad (11)$$

La ecuación 11 la podemos reescribir de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{1}{\frac{K_a K_b}{JR_{motor}}} \quad (12)$$

En la ecuación (5) se definió:

$$b = \frac{K_a K_b}{JR_m}$$

Por lo que la ecuación (11) la podemos reescribir como:

$$\tau = \frac{1}{b} \quad (12.1)$$

De la ecuación (12.1) también tenemos:

$$b = \frac{1}{\tau} \quad (12.2)$$

Con la ecuación (12.2), es posible calcular el valor de b de la función de transferencia. Con este valor se puede plantear una ecuación con una incógnita con ayuda de la ecuación (5). De esta ecuación es posible despejar el valor de J, conociendo de antemano el valor de las constantes K_a , K_b , R_m y el valor de b obtenido con ayuda de τ .

$$b = \frac{1}{\tau} = \frac{K_a K_b}{JR_m}$$

$$J = \frac{\tau K_a K_b}{R_m} \quad (13)$$

Sin embargo, el valor de J también aparece en la ecuación (5) en el valor de a:

$$a = \frac{K_a}{JR_m}$$

Si comparamos los valores de a y b, podemos observar que el valor de a es posible obtenerlo conociendo a b:

$$a = \frac{b}{K_b} = \frac{\frac{K_a K_b}{JR_m}}{b} = \frac{K_a}{JR_m} \quad (14)$$

Si conocemos el valor de b y conocemos el valor de K_b , es posible obtener el valor de a. Con el valor de a definido y conociendo los valores de K_a y R_m , se puede plantear una ecuación donde la única incógnita es J, la cual puede obtenerse mediante un despeje.

$$J = \frac{K_a}{aR_m} \quad (15)$$

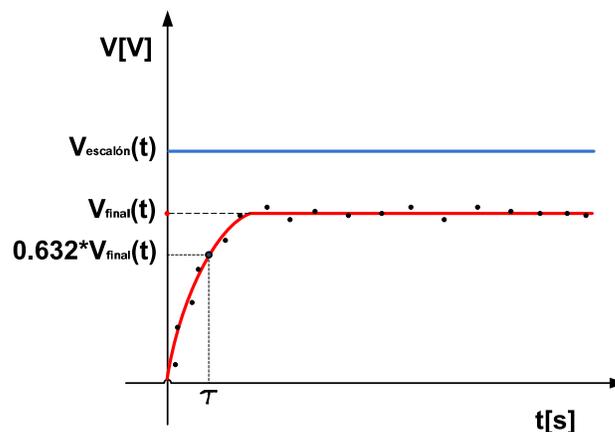
Las ecuaciones (13) y (15) muestran dos formas de calcular a J; el valor real de J será obtenido mediante el promedio de estas dos ecuaciones.

$$J = \frac{\frac{K_a}{aR_m} + \frac{\tau K_a K_b}{R_m}}{2} \quad (16)$$

La ecuación 15 muestra la forma de calcular a J. es necesario entonces obtener el valor de la constante de tiempo del motor; para lograr esto se le aplicara una entrada escalón y se determinara el tiempo que tarda en alcanzar el 63.2% del valor final.

Es importante señalar que la entrada no será unitaria pues con un voltaje unitario es muy difícil que el motor consiga vencer la inercia de su flecha, pero la constante de tiempo no se verá afectada por el valor de la entrada.

La gráfica 4 muestra una forma general del resultado que se espera obtener, el valor de τ en la gráfica ayudara a calcular los valores de a y b para posteriormente calcular J.



Gráfica 4. Respuesta al estímulo escalón

Capítulo 2. Diseño conceptual

La solución de un problema, sin importar la naturaleza del mismo, requiere una planeación sobre los pasos a seguir. En el caso del diseño de elementos o sistemas, esta planeación es equivalente a un análisis previo sobre las metas deseadas y los diversos caminos para llegar a ellas.

Para tener un diseño exitoso, es imperativo que esta parte del diseño esté lo mejor hecha posible y que abarque todas las necesidades que se requieran.

Este punto del diseño es llamado diseño conceptual, pues es en esta parte donde en términos conceptuales, se plantea la solución del problema. En este capítulo se aprecia las ideas generadas para resolver cada elemento en el sistema.

En este apartado, la solución se aborda como un todo, sin aclarar detalles o elementos específicos de la solución final. El término de este capítulo se debe contar con la idea general de la solución.

Para llegar a la solución del sistema nos valdremos de cuatro herramientas básicas:

- Descomposición en funciones: se analizará que acciones debe hacer el sistema en cada momento, esto es, se pondrá en el papel el “¿qué debe hacer el sistema?” En este mismo apartado se diferenciara entre funciones principales y auxiliares.
- Análisis de Funciones: este apartado tiene la finalidad de mostrar como es que las funciones del sistema interactúan entre ellas, a fin de observar funciones comunes en diferentes objetivos del sistema y también posibles interferencias entre las funciones del sistema..
- Configuración: es aquí donde se planteara la mejor disposición de los elementos para evitar las posibles interferencias vistas en el análisis de funciones, este apartado sirve para responder el “¿dónde soluciona el sistema cada función deseada?”.
- Composición: Es aquí donde se mostraran los diversos elementos que pueden dar solución al problema, en este apartado una vez que se han identificado perfectamente las funciones que el sistema debe hacer y una vez, que se han solucionado las posibles interferencias, se obtendrá el “¿cómo el sistema realizará cada función?”.
- Diagrama de flujo: en este dispositivo se requerirá proporcionar entradas, (de tipo eléctricas), al sistema y este otorgará salidas, (de tipo eléctricas). Para proporcionar de forma controlada estas entradas y para poder interpretar las salidas obtenidas, se empleará un circuito de control-instrumentación acoplado a una DAQ, esta DAQ será gobernada por un virtual instrument (VI) de LabVIEW, el cual, como cualquier programa, requiere de un Diagrama de flujo en su etapa inicial.

Estos pasos son parte fundamental de la metodología de diseño adoptada, sin embargo cabe mencionar que no son únicos, pues existen tantas y diversas metodologías, que estos pasos pudieran o no ser considerados en otros métodos de diseño para generar la solución del sistema.

2.1 Descomposición en funciones

Las siguientes tablas muestran las diversas funciones que se deben cumplir en cada prueba para conseguir el resultado deseado, estas características han sido determinadas en el capítulo 1 de este reporte; cada tabla corresponde a una prueba y a su vez en cada tabla están divididas las funciones según el área al que pertenecen.

Rotor Bloqueado	Elementos mecánicos	Tipo de función
	Sujetar el motor a caracterizar, Motor Tipo (MT)	Principal
	Frenar el motor a caracterizar (MT)	Principal
	Medir el torque aplicado al freno	Principal
	Elementos electrónicos	
	Aplicar voltaje gradual de alimentación (MT)	Principal
	Medir el voltaje aplicado al motor (MT)	Principal
	Medir la corriente consumida por el motor (MT)	Principal
	Elementos de control	
	Graficar el corriente vs voltaje	Principal
	Capturar los datos obtenidos de la prueba	Principal
	Calcular la constante K_a	Principal
	Guardar los datos y grafica obtenidos	Secundaria
	Desplegar los datos de la prueba	Principal

Tabla 1. Análisis de funciones de la prueba a rotor bloqueado

Rotor Libre	Elementos mecánicos	Tipo de función
	Sujetar el motor a caracterizar, Motor Tipo (MT)	Principal
	Sujetar el motor generador, Motor Patrón (MP)	Principal
	Acoplar las flechas de los motores	Principal
	Medir las RPM de las flechas	Principal
	Elementos electrónicos	
	Aplicar voltaje gradual al motor (MT)	Principal
	Medir el voltaje aplicado (MT)	Principal
	Medir el voltaje generado (MT)	Principal
	Medir la corriente consumida por el motor (MT)	Principal
	Elementos de Control	
	Graficar RPM vs Voltaje generado (MP)	Principal
	Graficar voltaje aplicado (MT) vs corriente (MT)	Principal
	Calcular K_b y R	Principal
Capturar los datos de la prueba	Principal	
Guardar los datos de la prueba	Secundaria	
Desplegar los datos de la prueba	Principal	

Tabla 2. Análisis de funciones de la prueba a rotor libre

Escalón	Elementos mecánicos	Tipo de función
	Sujetar el motor a caracterizar, Motor Tipo (MT)	Principal
	Sujetar el motor generador, Motor patrón (MP)	Principal
	Acoplar la flechas de los motores	Principal
	Elementos electrónicos	
	Aplicar una entrada escalón (MP)	Principal
	Medir el voltaje generado (MT)	Principal
	Elementos de control	
	Medir el tiempo de la prueba	Principal
	Calcular el voltaje final generado (MT)	Principal
	Calcular el 63.2% del voltaje final (MT)	Principal
	Calcular el tiempo al 63.2% del voltaje	Principal
	Graficar la entrada escalón (MP)	Principal
	Graficar el voltaje generado (MT)	Principal
Calcular J	Principal	
Capturar los datos de la prueba	Principal	
Desplegar los datos de la prueba	Principal	
Guardar los datos de la prueba	Secundaria	

Tabla 3. Análisis de funciones de la prueba escalón

2.2 Análisis de funciones

Esta es una herramienta gráfica, en la cual se muestran las entradas del sistema y las salidas del mismo, en su parte media permite relacionar las entradas en la forma necesaria para obtener las salidas deseadas. Una de las grandes ventajas de esta herramienta, es que permite observar cuales entradas son comunes para obtener diversas salidas del sistema, otra ventaja es que en esta etapa el sistema se considera como una caja negra, por lo que no hay necesidad de detallar el cómo se relacionan las entradas o de donde obtenemos las señales de excitación al interior del sistema; por último pero también importante, permite observar si pudieran existir interferencias entre algunas entradas del sistema. La figura 4 nos muestra el análisis de funciones del proyecto. Podemos observar los elementos de entrada los cuales son voltaje de energía y el propio banco; la salida del sistema es un motor caracterizado. Algunas observaciones que resaltan al hacer este análisis son:

- Entrada gradual de voltaje en dos de las pruebas y una constante en el escalón
- Los motores requieren la unión de sus flechas en dos pruebas
- La corriente del motor a caracterizar (MT) se mide en dos pruebas
- En todas las pruebas es necesario medir el voltaje en el MT ya sea el aplicado o el generado
- Se requiere medir la velocidad de las flechas unidas
- En todas las pruebas se debe desplegar, capturar y guardar los datos.
- La prueba a velocidad angular constante requiere que el MT se “frene”, Se desea que no existan piezas desmontables por lo que se debe frenar el motor sin que esto afecte al otro motor.
- Cada prueba requiere calcular una o dos constantes, se debe implementar un sistema que le permita al banco realizar los cálculos de forma autónoma.

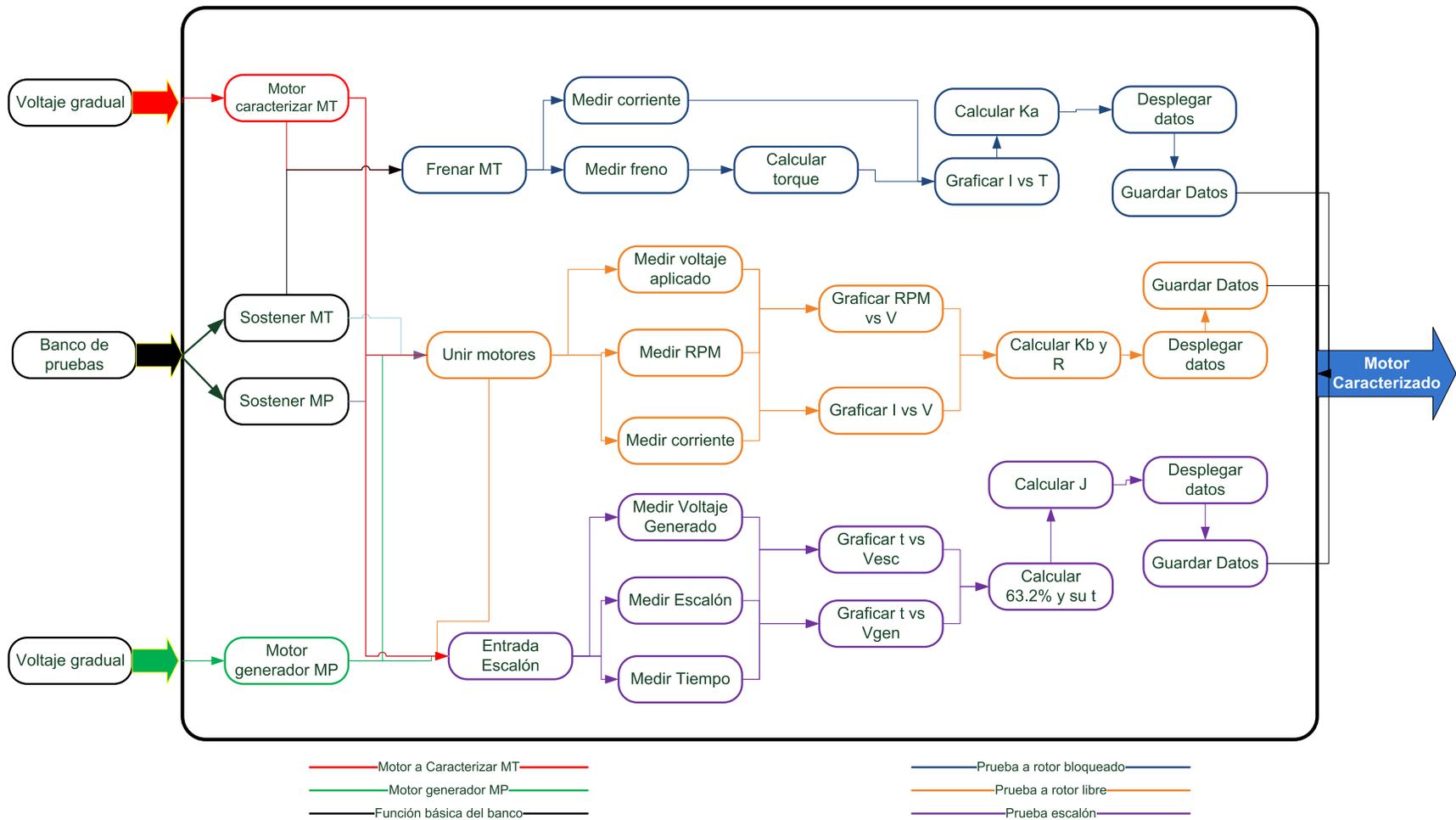


Figura 4. Análisis de funciones de las pruebas del banco.

2.3 Configuración

El acomodo correcto de los componentes del sistema ayuda a obtener el mejor aprovechamiento de las características de cada componente. En muchas ocasiones el acomodo de los elementos de un sistema no es único y existen ventajas y desventajas en cada diversa distribución.

Las diversas formas de acomodar los elementos en el diseño reciben el nombre de configuración. Este paso en el diseño, no sólo dará una idea general de la forma final del sistema, también acotará los elementos que se pueden usar para el cumplimiento de las diversas funciones necesarias.

Motores colineales

En esta propuesta los ejes de los motores son colineales, pudiendo estar en acomodo horizontal o vertical.

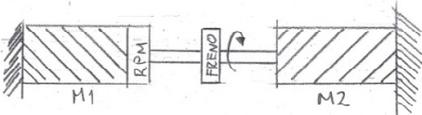
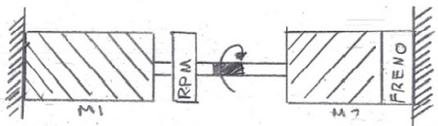
Sistema de freno centrado	
	Descripción El mecanismo de freno de los motores se coloca equidistante a los mismos sobre sus flechas acopladas, el sistema de medición de RPM se aloja en uno de los extremos de los motores.
	Ventajas El sistema de freno de los motores y el de acoplamiento de las flechas pudiera ser el mismo
	Desventajas Esta configuración sugiere que el sistema de freno es ajeno por completo a los motores, lo que implica que se desmontaría del sistema al cambiar el motor a caracterizar.
Sistema de medición de RPM centrado	
	Descripción El elemento de medición de las RPM se aloja sobre las flechas acopladas de los motores. El freno del sistema se acopla en alguno de los extremos de los motores.
	Ventajas El acoplamiento de los motores y la medición de las RPM las podría realizar un mismo dispositivo.
	Desventajas El elemento de medición de las RPM es desmontable en esta configuración, debido a que al momento del cambio del motor a caracterizar, se deben desacoplar los motores y las flechas quedarían separadas.

Tabla 4. Configuraciones colineales propuestas del sistema.

Sistema de medición de freno y RPM centrados	
	Descripción
	Los elementos para frenar los motores y medir su velocidad angular se encuentran sobre las flechas acopladas de los motores.
	Ventajas
	Un único elemento podría cumplir las funciones de freno, medición de RPM y acoplamiento de los motores.
	Desventajas
	Al momento de intercambiar el motor a caracterizar, se debería desmontar este elemento de freno y medición de RPM.
Sistema de medición de freno y RPM en los extremos de un motor	
	Descripción
	Los sistemas de freno y medición de RPM se colocan junto a uno de los motores. Estos elementos pueden o no ser partes del motor.
	Ventajas
	Estos elementos se pueden acoplar junto al motor patrón, de esa forma al intercambiar el motor a caracterizar no se requiere tocar estos dispositivos en lo absoluto.
	Desventajas
	Si se requiere reemplazar el motor patrón o alguno de estos dispositivos, se deberán desmontar diversos elementos del sistema para realizar estas acciones de mantenimiento.

Tabla 4 (Continuación). Configuraciones colineales propuestas del sistema.

Motores paralelos.

Estos acomodos sugieren que las flechas de los motores estén acomodadas de forma paralela. Todas estas propuestas tienen una ventaja sobre el acomodo de los motores de forma colineal, dicha ventaja es: las dimensiones del banco, si los motores se acoplan de forma paralela, el banco reduciría su longitud a la mitad aproximadamente, aunque este acomodo pudiera incrementar su altura.

Por otro lado, todas estas propuestas mantienen la desventaja del acoplamiento de las flechas, pues para la transmisión de movimiento entre estas ya no sería de forma directa; esto implica utilizar bandas, cadenas o engranajes y habría que considerar estos elementos para el modelado matemático, haciendo que el planteamiento teórico considerado en este proyecto, sea insuficiente.

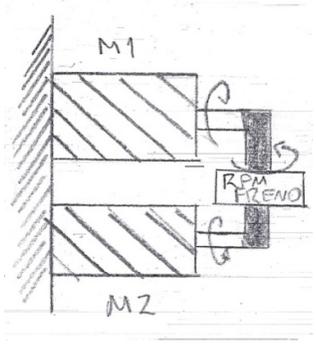
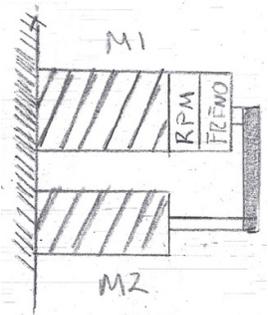
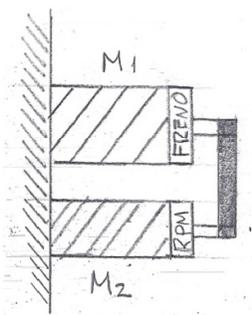
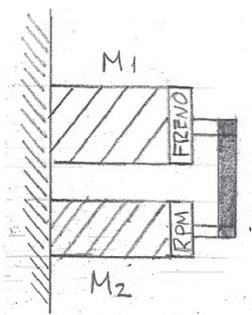
Sistema de medición de freno y RPM centrados	
	Descripción
	El mecanismo de freno y medición de RPM de los motores se coloca en el centro del acoplamiento de los mismos.
	Ventajas
	Un mismo dispositivo podría cumplir con la función de freno y medición de RPM
	Descripción
	En uno de los motores se acoplan estos dos dispositivos.
	Ventajas
	La medición de las RPM es directa, al desmontar el motor a caracterizar no se requiere tocar ninguno de estos dispositivos en lo absoluto.
	Descripción
	En un extremo de los motores se coloca el freno del mismo, mientras que en el otro motor se acopla el mecanismo de medición de las RPM
	Ventajas
	Se puede acoplar directamente el freno del sistema al motor a caracterizar, al momento de desmontar el motor a caracterizar, el sistema de medición de RPM no se vería afectado.
	Desventajas
	Al desmontar el motor a caracterizar, habría que desmontar también el freno del sistema. El elemento para medir las RPM se verá afectado al momento de desmontar el motor patrón. La transmisión indirecta de este arreglo puede afectar la medición real de las RPM.

Tabla 5. Configuraciones paralelas propuestas del sistema.

Motores perpendiculares

Se sugiere que las flechas de los motores sean perpendiculares entre sí. Esto implica un gran problema en el acoplamiento de las flechas aunque nuevamente comparándolo con las flechas colineales, se tienen dimensiones más pequeñas.

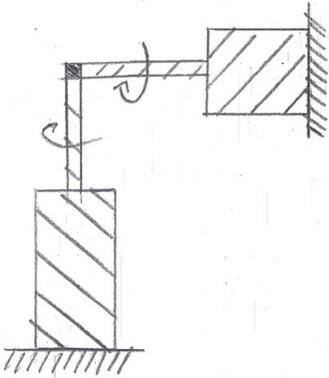
Flechas transversales	
	Descripción
	Los ejes de los motores forman un ángulo de 90° entre sí.
	Ventajas
	Dimensiones menores comparado con los motores colineales.
Desventajas	
El acoplamiento de los motores nuevamente no se puede realizar de forma directa, lo afectara la medición de las RPM y también al freno de los motores.	

Tabla 6. Configuración transversal propuestas del sistema.

Sistemas de freno y RPM extremos

En todos los acomodos de los motores, se considera el caso de poder colocar los mecanismos de freno y RPM de forma externa a los motores.

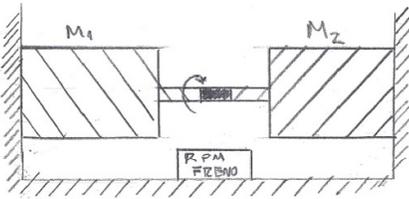
Sistema de medición de freno y RPM externos a los motores	
	Descripción
	Los elementos de freno y medición de RPM se encuentran separados de los motores.
	Ventajas
	El desacoplamiento y desmontaje de los motores no afecta al freno o al medidor de velocidad angular. El freno y el sistema de las RPM pueden ser una sola pieza. Con esta propuesta el problema de la transmisión directa o indirecta se soluciona, es decir, con esta configuración, no importa si las flechas son colineales, paralelas o transversales dado que los elementos del freno y de las RPM están separados de las flechas.
Desventajas	
Se requiere un análisis de funciones detallado, pues a simple costa se observa una contradicción en el freno del sistema y el hecho de que no este en contacto con las flechas. Se requiere realizar el montaje de los sistemas de freno y RPM al sistema antes de comenzar las pruebas.	

Tabla 7. Configuración externa propuestas del sistema.

Recordando lo descrito en el planteamiento del problema, se busca que el sistema sea portátil con dimensiones máximas de 30x30x15[cm] con un peso no mayor a 2[kg], el sistema debe poseer el menor número de elementos desmontables, debe ser capaz de proporcionar los parámetros necesarios para caracterizar un motor de corriente directa y debe ser del menor costo posible. Tomando en cuenta estas consideraciones se decidió elegir las siguientes configuraciones:

- Sistema de medición de freno y RPM en los extremos de un motor, su gran ventaja de poder intercambiar el motor a caracterizar, MT, sin necesidad de interferir en el montaje o desmontaje de estos elementos, lo hacen la opción más conveniente para el sistema desarrollado. Posiblemente buscar un sistema permanentemente anclado a un motor incrementa el costo, con respecto a un sistema desmontable, pero es preferible en esta instancia elevar el costo exponerse que en algún desmontaje o montaje, se pierdan piezas y el sistema quede inutilizado.
- Acoplamiento de los motores de forma colineal: aunque acoplarlos de forma paralela, o incluso de forma transversal, ofrece la posibilidad de reducir algunas de sus dimensiones y de poder ocultar el MP de la vista del usuario, le forma de transmisión indirecta entre las flechas de los motores hacen que estas dos últimas configuraciones pierdan sus ventajas contra el acomodo colineal de los motores. Acomodarlos de forma transversal o paralela implica tener un sistema de transmisión, lo que incrementa costos y complica el montaje y operación del sistema.
- Elemento de freno y medición de RPM acoplado en los extremos de un motor: al decidir que la medición de estos dos elementos, se colocarían en los extremos del MP, el lugar más conveniente para colocar estos dos sistemas es en los extremos del MP, de ese modo la medición de la fuerza de freno aplicada es la misma que la fuerza neta aplicada, sin inconveniente de transmisión de fuerza por estar separados el elemento de freno de su elemento de medición.

2.4 Composición

Con la configuración definida, se pueden comenzar a buscar elementos que cumpliendo con el acomodo seleccionado, desarrollen con éxito las funciones necesarias del sistema. El dispositivo desarrollado consta de diversas funciones, para cada una de ellas se realiza una composición diferente.

Las composiciones no nos brindan un único resultado, habrá que elegir entre varias alternativas la más adecuada a las necesidades del proyecto.

Freno del motor

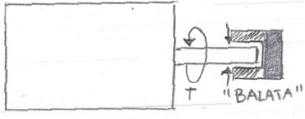
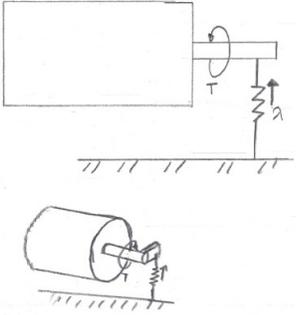
FRENO TIPO "BALATA"	
	Descripción Freno tipo balata, similar al freno de los servomotores.
	Ventajas Ofrece una fuerza de freno controlada, continua y conocida.
	Desventajas Su montaje mecánico no permitiría que fuera una pieza desmontable, así mismo, su operación se debe realizar con mucho cuidado pues podría resultar dañado el sistema del freno. El motor acoplado no puede exceder las capacidades mecánicas del freno, o lo dañará.
FRENO POR RESORTE A TRACCIÓN	
	Descripción Aprovechando la fuerza acumulada en un resorte, se propone frenar el rotor con su ayuda, al girar el rotor y tratar de extender el resorte este se opondrá.
	Ventajas Es una solución económica, puede ser fácilmente desmontado del dispositivo.
	Desventajas Para su completa operación, es necesario medir la elongación del resorte y conocer la Ley de Hooke. El resorte deberá remplazarse, pues tienen tiempo de vida útil. Este sistema no es compatible con un sistema de caracterización automático, esto debido a que la elongación del resorte se mediría manualmente. Si el motor acoplado excede las capacidades mecánicas del resorte, este se dañará irremediablemente.

Tabla 8. Propuestas para el freno de los motores.

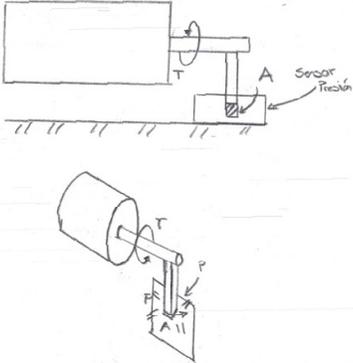
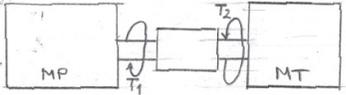
FRENO MEDIANTE UN SENSOR DE PRESIÓN	
	Descripción
	Con ayuda de un sensor de presión y una palanca, se propone que el rotor gire y tenga un límite mecánico proporcionado por una palanca acoplada a la flecha y un sensor de presión. El sensor indicara cuanta fuerza imprime el rotor.
	Ventajas
	El cálculo de la fuerza que el motor es simple, se conoce el área en contacto de la palanca, la distancia del brazo de palanca, la presión que se ejerce, por lo que se puede saber la fuerza que el motor otorga. Este diseño es de desmontaje sencillo.
	Desventajas
	El costo de los sensores de presión es la mitad del costo de su envío, por lo que no es rentable el adquirirlos. Los sensores que se encontraron en catálogos ofrecen intervalos de presión bastante pequeños. Si el motor que se acopla excede los límites del sensor, este se dañara
FRENO POR MOTORES ROTANDO EN SENTIDOS CONTRARIOS	
	Descripción
	Se propone acoplar dos motores mecánica y eléctricamente similares; dichos motores serán alimentados a voltajes diferentes y constantes a fin que sus flechas giren en sentidos inversos. Esta diferencia de sentidos actuará como un freno en ambas flechas, si se conoce el torque de uno de los motores, se sabrá el torque de la otra flecha cuando estas lleguen a punto de equilibrio.
	Ventajas
	Los motores acoplados sirven para las tres pruebas del sistema, por lo que no requiere un desmontaje mecánico. Es la propuesta más sencilla de implementar, pues la parte crítica de esta es el acoplamiento de los motores. No se requieren sensores o elementos extras a los que el sistema necesita de manera básica para caracterizar los motores.
	Desventajas
	El acoplamiento de las flechas debe garantizar que queden concéntricas o harán vibraciones indeseadas, el motor del cual se conozca el torque marcara el limite mecánico del motor acoplado. El embobinado del motor que actúa como freno, resultara degradado con el tiempo, resultado de cada vez que actúa de freno, incrementa su corriente y temperatura, deteriorando el material del que esta hecho.

Tabla 8 (Continuación). Propuestas para el freno de los motores.

Medición de la velocidad angular de la flecha del motor.

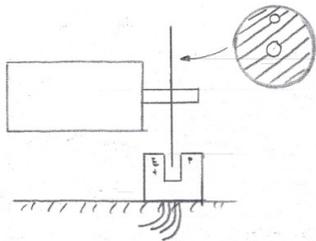
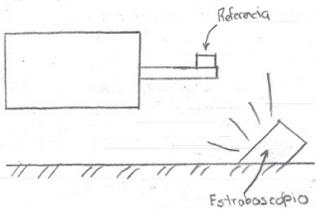
MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD ANGULAR POR OPTOINTERRUPTOR	
	Descripción
	<p>Por medio de un disco ranurado acoplado al eje del motor, se genera una señal de interrupción en un optointerruptor, el cual genera un tren de pulsos en función de la frecuencia de las interrupciones.</p>
	Ventajas
	<p>Maquinado sencillo, los componentes necesarios para su implementación son bastantes comunes. La señal generada puede ser leída directamente por una computadora</p>
	Desventajas
	<p>La ranura de interrupción debe ser lo suficientemente delgada para que a altas frecuencias de giro, el tren de pulsos sea confiable. La velocidad del optointerruptor marcará el límite de frecuencia de giro del motor.</p>
MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD ANGULAR CON UN ESTROBOSCOPIO	
	Descripción
	<p>Colocando una referencia en la flecha del motor e iluminándola con una luz estroboscópica, es posible determinar la velocidad angular de la misma.</p>
	Ventajas
	<p>Su operación es bastante simple, su implementación también es sencilla, pues la referencia puede ser desde cinta adhesiva en la flecha y el estroboscopio es de construcción simple.</p>
	Desventajas
	<p>No es un método exacto para medir la velocidad angular, se pueden tener bastantes iteraciones antes de conseguir "congelar" la imagen con ayuda del estroboscopio. No es posible que una computadora de forma automática implemente el estroboscopio para adquirir la velocidad angular. El estroboscopio sería un elemento adicional al sistema de caracterización, obligando al usuario a tener no sólo el sistema, también sus accesorios para operarlo.</p>

Tabla 9. Propuestas para medir la velocidad angular de la flecha.

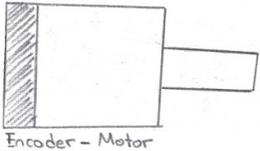
MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD ANGULAR POR MEDIO DE UN ENCODER	
	Descripción Un encoder es un dispositivo acoplado a la flecha cuyo funcionamiento es similar al de un disco y el optointerruptor. Los encoders tienen discos ranurados de manera muy fina y poseen dos o más optointerruptores para garantizar una lectura completa del tren de pulsos.
	Ventajas La medición de la velocidad angular es lo más exacta posible, es posible ingresar estos datos directamente a una computadora, existe la posibilidad de buscar un encoder que se pueda acoplar al motor o un motor con encoder integrado.
	Desventajas Se debe tener cuidado en su montaje, pues algunos encoders tienen discos de vidrio que pueden lastimarse si el montaje es brusco. De no conocerse las características ópticas del encoder, los cálculos obtenidos serán erróneos.

Tabla 9 (Continuación). Propuestas para medir la velocidad angular de la flecha.

Acoplamiento de los motores.

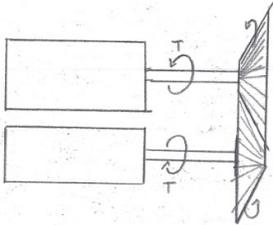
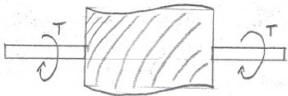
ACOPLAMIENTO DE LOS MOTORES POR ENGRANAJES	
	Descripción Con ayuda de algunos engranajes acoplados a las flechas, se propone acoplar el movimiento de las flechas
	Ventajas Se garantiza el arrastre en las flechas. Los motores pueden tener sus flechas colineales, paralelas o perpendiculares y sería posible su acoplamiento.
	Desventajas Es un sistema ruidoso, la inercia de los engranajes afectaría al sistema, requiere mantenimiento periódico, para acoplar motores de diversas dimensiones se requerirían varios trenes de engranajes con diversas medidas. Existen soluciones más económicas al problema aquí planteado.
ACOPLAMIENTO DE LOS MOTORES POR COPLE FLEXIBLE	
	Descripción Un cople flexible proporciona unión a las flechas y permite que existan excentricidades en sus flechas sin que estas afecten al resto del sistema.
	Ventajas Las posibles excentricidades de las flechas se verían absorbidas por este sistema. Es un mecanismo de unión simple, los motores estarían "pegados" en sus flechas por "cinta adhesiva".
	Desventajas Suelen ser dispositivos caros comparados con coples rígidos. Sus partes flexibles presentan fatiga.

Tabla 10. Propuestas para el acoplamiento de los motores.

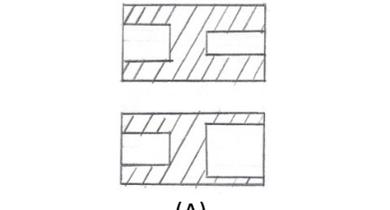
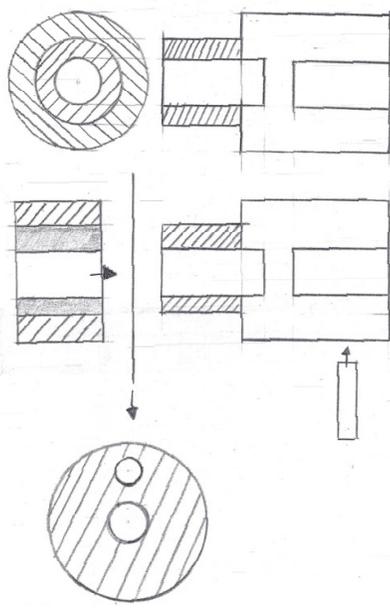
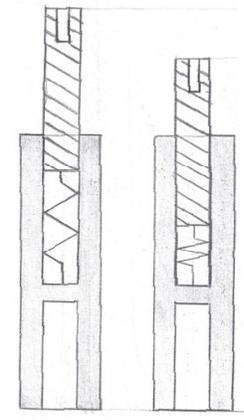
ACOPLAMIENTO DE LOS MOTORES POR COPLE RIGIDO	
 <p>(A)</p>	<p>Descripción</p> <p>Este es un dispositivo que une las flechas como una sola, sin puntos de flexión. La figura (A) nos muestra un cople rígido tradicional con sus dos entradas para las flechas de los motores. La figura (B) muestra un cople rígido pensado para montar en él un disco ranurado y una barra. Con el fin de poder medir la frecuencia de giro y poder frenar el motor.</p>
 <p>(B)</p>	<p>Ventajas</p> <p>Los coples rígidos ofrecen una transmisión directa del movimiento, prácticamente no agregan inercia al sistema. No tienen puntos flexibles que presenten fatiga con el tiempo. No requieren de mantenimiento en su vida útil.</p>
	<p>Desventajas</p> <p>Si en el montaje no se puede garantizar que las flechas queden colineales, al momento del giro existirán vibraciones indeseadas que afectaran al sistema. Requieren de prisioneros o cuñas en las flechas para garantizar el arrastre en las flechas.</p>
ACOPLAMIENTO DE LOS MOTORES POR COPLE RÍGIDO RETRÁCTIL	
	<p>Descripción</p> <p>Este cople es una evolución del cople rígido, mantiene su capacidad de transmitir directamente el movimiento sin puntos flexibles en su estructura. Pero tiene la capacidad de absorber la diferencia de longitudes en las flechas de los motores.</p>
	<p>Ventajas</p> <p>Se pueden acoplar motores de diversas longitudes con este cople. La transmisión del movimiento es directa.</p>
	<p>Desventajas</p> <p>El número de piezas de este cople retráctil es mayor al de un cople rígido tradicional. Requiere de un resorte para su funcionamiento, el cual tiene vida útil. A pesar de que puede absorber ciertas diferencias de longitudes de flechas, sigue teniendo límites en este aspecto.</p>

Tabla 10 (Continuación). Propuestas para el acoplamiento de los motores.

Soporte de los motores al sistema de caracterización.

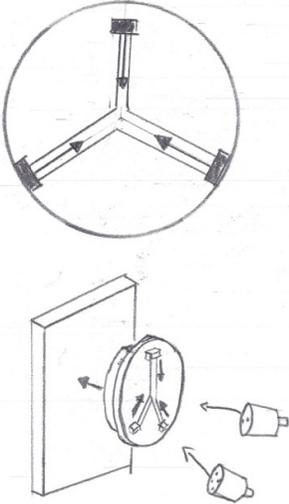
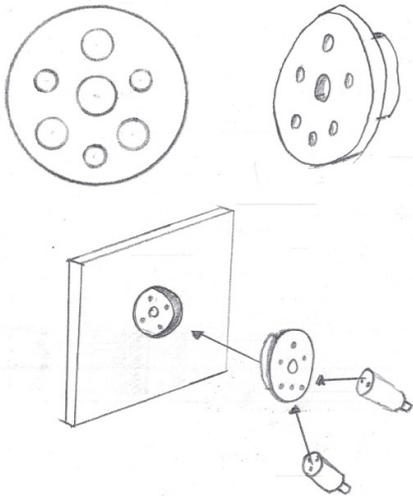
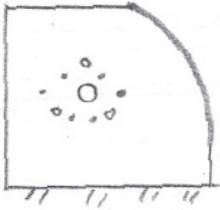
SOPORTE DE LOS MOTORES POR MEDIO DE UN CHUCK	
	Descripción
	<p>Para sujetar los motores al sistema de caracterización, se sugiere una pinza similar al chuck de un torno. La pinza se abrirá lo suficiente para acoplar el motor y luego se cerrará para sostenerlo en su lugar durante las pruebas.</p>
	Ventajas
	<p>Este dispositivo es capaz de sujetar motores cuyo diámetro sea distinto, limitado únicamente por el alcance de sus pinzas. Evita que la disposición de los barrenos de los motores sea la limitante para acoplar los motores al sistema.</p>
	Desventajas
	<p>Sus dimensiones y peso son bastante mayores a las del sistema en general. Su costo es muy elevado y su manufactura es bastante complicada. Se ha buscado algún equivalente y no se ha encontrado hasta el momento.</p>
SOPORTE DE LOS MOTORES POR MEDIO DE DISCO BARRENADO	
	Descripción
	<p>Las carcasas de los motores tienen barrenos para su montaje, este disco tiene las configuraciones más generales de esos barrenos para facilitar su acoplamiento al sistema de caracterización.</p>
	Ventajas
	<p>Existe una alta probabilidad de que el motor a caracterizar pueda ser acoplado con este disco barrenado. Su manufactura es sencilla.</p>
	Desventajas
	<p>Si se llega a dañar o a perder el disco, sería imposible acoplar el motor al sistema. Aun cuando el disco tiene las configuraciones más comunes de los barrenos, pueden existir motores que cumplan las características mecánicas y eléctricas pero que no puedan ser acoplados por falta de barrenos en el disco.</p>
SOPORTE DE LOS MOTORES POR MEDIO DE UNA PARED BARRENADA	
	Descripción
	<p>Esta es una evolución del disco barrenado, los barrenos se incluyen en una pared del dispositivo, en lugar de tener dos piezas para una función, tenemos sólo una que cumple dicha función.</p>
	Ventajas
	<p>Al no ser una pieza desmontable, se minimiza el riesgo de perder la capacidad de acoplar los motores. Su diversidad de barrenos y sus diferentes configuraciones aumentan la posibilidad de acoplar exitosamente los motores.</p>
	Desventajas
	<p>Pese a sus diversos barrenos, puede haber motores que no puedan acoplarse por este medio.</p>

Tabla 11. Propuestas para el soporte de los motores.

Para seleccionar las piezas a utilizar se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- ✓ Costo de las piezas, pues no se cuentan con recursos ilimitados para la fabricación del dispositivo.
- ✓ Versatilidad de montaje de los motores, se desea que el dispositivo sea lo más universal posible, por lo que las piezas que lo formen deben facilitar el poder acoplar diversos motores y poderlos caracterizar.
- ✓ Tamaño, pues se desea que el dispositivo pueda ser portátil.

Tras analizar las ventajas y desventajas de cada posible opción para solucionar las necesidades planteadas, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- El freno de los motores accionado por flechas rotando en sentido contrario ofrece la gran ventaja de no requerir elementos adicionales al sistema original, dos motores uno de ellos a caracterizar, el freno por balata es similar al utilizado en servomotores, lo cual encarece el sistema sin mencionar que sin el uso adecuado, el freno resulta dañado. El freno por resorte o por una barra acoplada a las flechas implica a la existencia de elementos desmontables, lo cual es indeseable en el sistema. Estas desventajas generan que los motores acoplados rotando en sentido contrario sea la mejor opción para la solución del problema.
- La medida de la velocidad angular se realizara por medio de un encoder proporcional acoplado a uno de los motores, MP. Aunque el sistema de disco-optointerruptor, es esencialmente lo mismo, se cuenta con un motor de CD que cuanta ya con un encoder acoplado a él, facilitando la tarea de la medición de la velocidad angular.
- Al acoplamiento de los motores será una mezcla entre un cople rígido y uno retráctil; pese a que un cople flexible es la mejor opción para absorber posibles excentricidades en las flechas, su propiedad de ser flexible afecta la medición de la velocidad angular. Un cople rígido garantiza la transmisión directa de potencia entre ambos motores y que las flechas tendrán la misma velocidad angular, mientras que una parte retráctil ayudaría a absorber la diferencia de longitudes de los motores que se deseen caracterizar.
- Para soportar los motores al mecanismo de caracterización, se ha optado por un par de paredes barrenadas con los barrenos y las posiciones más comunes en los motores de corriente directa, el disco barrenado es en esencia la misma solución, pero implica dos piezas donde una sola puede cumplir la función. El chuck tipo torno se convierte en la opción ideal, pues sin importar la posición ni medida de los barrenos de los motores, este sería capaz de sujetarlo, sin embargo, estas piezas son de dimensiones mucho mayores a las deseadas en el sistema y hasta el día de hoy no se ha podido localizar algún proveedor que ofrezca una pieza de esta naturaleza en dimensiones menores.

Con estos elementos en cuenta, los elementos seleccionados para cada función son:

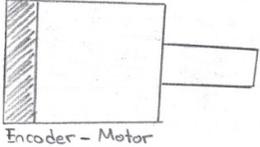
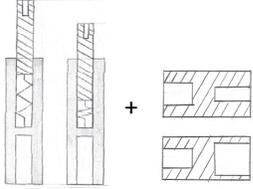
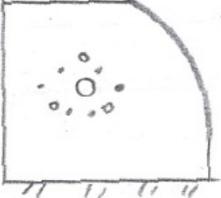
FRENO DE LOS MOTORES	
FRENO POR MOTORES ROTANDO EN SENTIDOS CONTRARIOS	
	Para las pruebas se requieren dos motores, aprovechando esa condición, se busca que los motores puedan proporcionarse el freno necesario girando en sentidos inversos.
MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD ANGULAR	
MEDICION DE LA VELOCIDAD ANGULAR POR MEDIO DE UN ENCODER	
	Se cuenta con un motor con encoder integrado, por lo que se decidió que este motor podría cumplir la función del freno y su encoder serviría para medir la velocidad angular de las flechas. Este motor será llamado Motor Patrón, MP, pues se cuenta con su datasheet donde el fabricante nos ha dado las características del motor.
ACOPLAMIENTO DE LOS MOTORES	
ACOPLAMIENTO POR COPLERETRÁCTIL + COPLERÍGIDO	
	En el cople se buscó absorber las diferentes longitudes que los motores llegan a tener y también los diferentes diámetros de las flechas que existen. El cople retráctil nos ofrece la oportunidad de tener diversas longitudes de los motores, si en uno de sus extremos podemos acoplar diversos coples rígidos capacitados para diferentes diámetros de flecha, tendremos un cople bastante versátil.
SOPORTE DE LOS MOTORES	
SOPORTE MEDIANTE UNA PARED BARRENADA	
	Para acoplar los motores al sistema, se decidió aprovechar los diversos barrenos que los motores tienen en sus carcasas, para esto se propone utilizar una pared barrenada para acoplar diversos motores. A diferencia del disco barrenado, esta composición es de una sola pieza.

Tabla 12. Composición final del sistema.

2.5 Diagrama de flujo del programa.

Parte importante del proyecto es el programa, el cual no sólo deberá capturar los datos, también deberá interpretarlos y mostrar la solución en la pantalla. La generación de todo programa inicia en el diagrama de flujo, el cual es un mapa que le señala al programador como se deben relacionar las variables del programa para cumplir con la meta deseada.

En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo del programa principal, aunque es posible resolver todo el programa en una sola rutina, no es recomendable esta práctica. Para la depuración y corrección de errores, es preferible que cada tarea se realice en una rutina diferente para que sea más fácil su corrección.

En el diagrama se aprecian tres diferentes subrutinas: Parámetros manuales, Parámetros automáticos, Desplegar/guardar datos, figura 6; estas secuencias realizarán las tareas de realizar las pruebas necesarias y de desplegar los resultados. El resto de las subrutinas se aprecian a detalle en el Apéndice C: Programación.

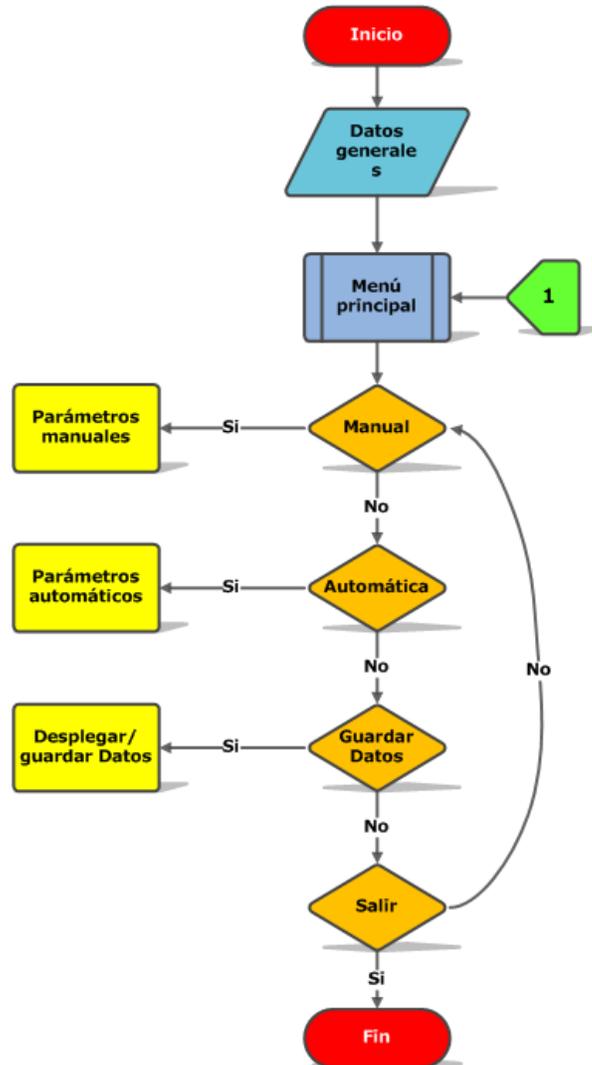
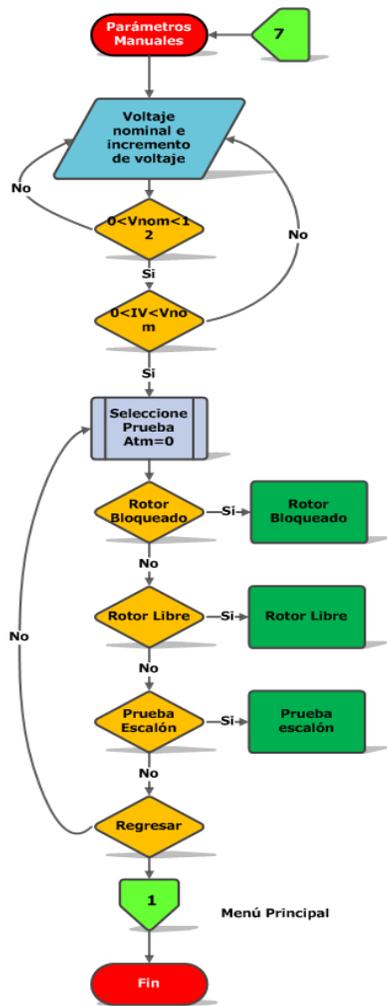
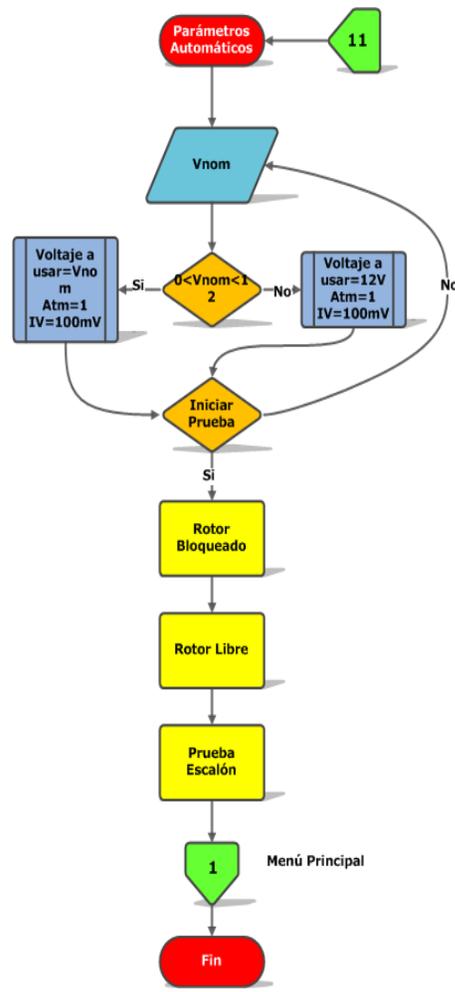


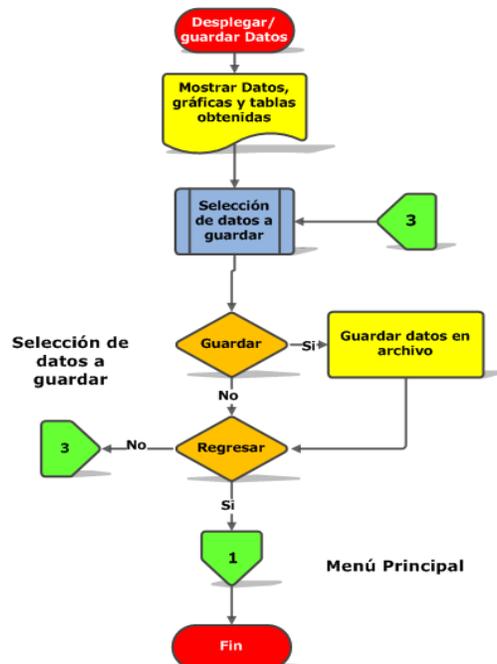
Figura 5. Diagrama de flujo del programa.



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Diagramas de flujo de las subrutinas: Parámetros manuales (a), Parámetros automáticos (b) y Desplegar y guardar datos (c).

Capítulo 3. Diseño de detalle.

Para implementar las ideas de solución en un diseño, se requiere la suficiente información para la manufactura y construcción de los elementos de un proyecto. Esta información es brindada por el diseño de detalle de un proyecto; es en esta parte del diseño donde se realizan los cálculos necesarios, donde a través de las necesidades del proyecto y con ayuda de los proveedores, se establecen los materiales necesarios para el desarrollo exitoso del sistema.

El diseño a detalle debe proporcionar los planos de manufactura y ensamble de las piezas del sistema, también le debe proporcionar al usuario una lista de los materiales necesarios y de ser posible una lista de posibles proveedores. En el caso de software, el diseño a detalle es el código de programación estructurado que solucione la necesidad del problema.

Al término de este capítulo se tendrán las herramientas necesarias y suficientes para manufacturar y programar el sistema de caracterización. No es correcto señalar que existen partes más importantes que otras en el proceso de diseño, pero es en esta fase donde los cambios propuestos tienen un fuerte impacto en el resultado final. Es por ello que el diseño a detalle constituye la médula del proceso de diseño, un acierto en este apartado del proceso y el resultado será un proyecto exitoso; pero si en estos momentos se comete un pequeño error, las consecuencias podrían ser fatales para el proyecto.

3.1 Diseño mecánico

La mayoría de los elementos mecánicos que forman la solución del diseño, son partes comunes y de fácil adquisición. Estos elementos mecánicos estarán sometidos a esfuerzos bastante inferiores a sus puntos límites de resistencia, por lo que un análisis a fondo de estos elementos es innecesario. Estos elementos son piezas que cumplirán la función de brindar soporte a los motores o aquellos elementos, que unirán entre si las bases de los motores.

Sin embargo, en la solución propuesta para el cople de los motores, se considera un cople rígido retráctil con un resorte a compresión en su interior. Es necesario calcular los parámetros del resorte para seleccionarlo de los catálogos existentes o en su defecto, maquinarlo.

Para el cálculo del resorte necesario se tomaran en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ La fuerza del resorte no debe exceder la fuerza natural de los dedos humanos, esto porque la idea del cople es que el usuario pueda retraerlo lo suficiente con la simple acción de sus dedos.
- ✓ El diámetro externo del resorte no debe ser mayor a 7[mm], se desea que el cople no sea muy pesado para no afectar el movimiento de las flechas, por lo que un cople de diámetro y longitud reducidos implica un resorte pequeño
- ✓ El resorte completamente estirado no debe exceder los 35[mm], el cople retráctil tiene la finalidad de absorber la diferencia de longitud de los motores. Acorde al motor patrón que se ha decidido usar, se buscaron motores similares en potencia eléctrica y dimensiones. El resultado es que para que el cople los una físicamente se requiere la capacidad de absorber en promedio 30[mm] de longitud.

Para que se pueda retraer el cople con la simple acción de los dedos, la fuerza máxima ejercida por el resorte debe ser de 4.5 [N] o 1.0116[lbf] (Smith, 1999), con este dato, se tiene definidos tres parámetros para el cálculo del resorte:

- ✓ Fuerza del resorte 4.5[N]=1.0116[lbf]
- ✓ Diámetro externo 6[mm], consideraremos 1[mm] de tolerancia entre el diámetro externo del resorte y el diámetro interno del cople.
- ✓ Longitud libre 35[mm]

El primer paso para el cálculo del resorte, es la selección del material del cual será fabricado. Se ha seleccionado alambre para piano (ASTM# A228), esto debido a que es el material más común y empleado para maquinar resortes (Norton, 2001)

Habrá que calcular el diámetro de alambre a utilizar, para ello se utiliza la razón del resorte (C), la cual debe ser un valor entre 4 y 12, se propone un valor de 11. Con este dato y el diámetro externo del resorte, se calcula el diámetro del alambre.

$$C = \frac{\text{Diametro del resorte}}{\text{diametro del alambre}}$$

$$C = \frac{D}{d}$$

$$d = \frac{D}{c}$$

$$d = \frac{6(mm)}{11} = 0.55(mm) \approx 0.02(in)$$

Hay que determinar el factor de seguridad para el resorte con los parámetros propuestos, primero calcularemos el cortante directo:

$$K_s = 1 + \frac{0.5}{C} = 1 + \frac{0.5}{11} = 1.045$$

Utilizamos este valor para calcular el esfuerzo cortante en la espira considerando la fuerza más grande:

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} = 1.045 \frac{8(1.0116[lbf])(0.236[in])}{(\pi 0.02[in])^3} = 8046.14 \left[\frac{lbf}{in^2} \right] = 8046.14 [psi]$$

*psi=pound per square inch (libra sobre pulgada cuadrada)

Calculando la resistencia máxima a la tensión del material para posteriormente determinar el límite elástico a la torsión del mismo material tenemos:

$$S_{ut} = Ad^b = 184649(0.02^{-0.1625}) = 348682.05 (psi)$$

$$S_{ys} = 0.6S_{ut} = (0.6)(239844.4) = 209209.23 (psi)$$

Donde:

A y b son constantes ya calculadas para los materiales empleados para la fabricación de resortes, tabla 13-4 (Norton, 2001)

Calculando el factor de seguridad contra la fluencia:

$$N_s = \frac{S_{ys}}{\tau} = \frac{209209.23}{8046.14} = 26$$

El factor de seguridad es aceptable, por lo que los parámetros propuestos pueden ser utilizados; sin embargo faltos por determinar el número de espiras del resorte y la tasa o constante del resorte.

Para la constante del resorte se tiene la fuerza máxima que el resorte debe aplicar, no se cuenta con una fuerza mínima establecida por lo que se considerará de 0[lb]; en cuanto al desplazamiento del resorte, se desea que sea capaz de comprimirse en 30[mm] (1.18 [in]), lo que nos da:

$$K = \frac{\Delta F}{y} = \frac{1.034-0}{1.18} = 0.88 \left(\frac{lb}{in} \right)$$

Calculando el número de espiras activas que debe poseer el resorte:

$$N_a = \frac{d^4 G}{8D^3 K} = \frac{(0.02^4)(11.7E6)}{8(0.236^3)(0.88)} \approx 18.5$$

Los extremos del resorte deben tener el mayor contacto posible con las superficies de apoyo, para esto se deberán rectificar los extremos. Para este caso un rectificado simple es suficiente, no es necesario cuadrar los extremos, por lo que el número total de espiras queda definido así:

$$N_t = N_a + 1 = 18.5 + 1 = 19.5$$

D[in]	C	d[in]	K_s	τ [psi]	S_{ut} [psi]	S_{ys} [psi]	N_s	K[lb/in]	N_a	N_t
0.23	11.00	0.02	1.05	8046.14	346172.45	207703.47	26	0.88	18.5	19.5

Tabla 13. Resumen de las propiedades del resorte calculado.

El resto de las piezas mecánicas del sistema están sometidas a fuerzas pequeñas, como el peso propio de los motores; motivo por el cual se consideró excesivo realizar un análisis de elementos finitos o realizar cálculos para completar su diseño. La figura 7 muestra la configuración mecánica final, los planos de los elementos mecánicos se incluyen en el Apéndice A

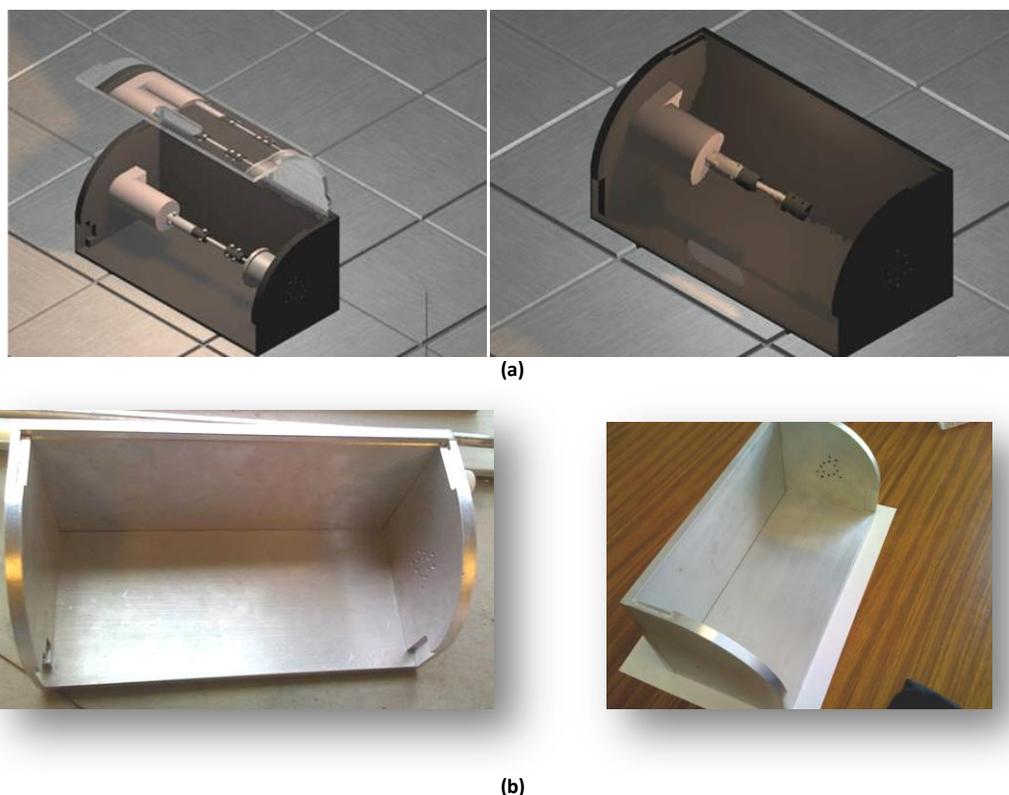


Figura 7. Configuración mecánica final, modelo CAD del sistema (a), fotografías de los elementos maquinados y ensamblados del banco (b)

3.2 Diseño electrónico

Para el control de voltaje en los motores se requiere una fuente de voltaje regulada por voltaje; el voltaje en los motores cuenta con un intervalo de 0 a 12 [V] esto contrasta con el voltaje analógico proporcionado por la DAQ que va de -10 a 10[V].

Para solucionar esto se acoplará un amplificador operacional conectado a otra fuente, el amplificador operacional nos dará la posibilidad de tener voltajes altos en la salida con una entrada pequeña, todo gracias a la ganancia. Por seguridad de la DAQ, para no exponerse y sobrepasar sus límites, se definió que el voltaje otorgado por la DAQ variara de 0 a 5V, El voltaje requerido en el motor y el entregado por la DAQ queda expresado en la tabla 14, a partir de esta tabla, se calculará la ganancia del amplificador.

V DAQ	Ganancia	V requerido
0	0	0
5	X	12

Tabla 14. Voltajes de la DAQ y en el motor.

Con estos datos, podemos plantear la siguiente ecuación:

$$V_{Requerido} = V_{DAQ} * Ganancia$$

$$Ganancia = \frac{V_{Requerido}}{V_{DAQ}}$$

$$Ganancia = \frac{12[V]}{5[V]} = 2.4$$

El arreglo para el amplificador operacional corresponde al inversor, en la figura 13 se observa la forma general de este arreglo; y la ecuación 16 muestra su comportamiento.

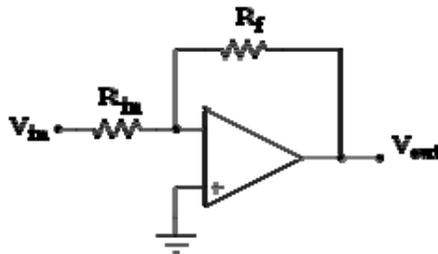


Figura 13. Amplificador operacional configuración inversor.

$$V_{out} = -V_{in} * \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (16)$$

Con la ganancia definida, se propone un valor para una de las resistencias; de esta forma el valor de la resistencia faltante se puede despejar

$$12(V) = -5(V) * \frac{R_2(K\Omega)}{1(K\Omega)}$$

$$R_2(K\Omega) = \left| \frac{12(V)}{-5(V)} * 1(K\Omega) \right| = |-2.4(K\Omega)| = 2.4(K\Omega)$$

El segundo motor se verá alimentado de forma similar, por lo que requiere una fuente que se comporte de la misma forma, los cálculos son entonces los mismos.

Para que el circuito pueda alternar las funciones de motor y generador, se incluye un relevador en el circuito, el cual es accionado por medio de una salida digital de la DAQ. Para realizar esto, se requiere acoplar un transistor al relevador, este tendrá la función de recibir la señal digital de la DAQ y proporcionar al embobinado el voltaje necesario para su operación. El relevador seleccionado tiene un embobinado que actúa con 12[V] y posee una resistencia de 155[Ω]. El transistor seleccionado es el TIP 122, este transistor es bastante comercial, pertenece a la familia de los transistores NPN tiene un voltaje colector-emisor de 60[V]@5[A] y una ganancia $h_{fe}=1000$.

La figura 14 muestra el arreglo del transistor y el relevador.

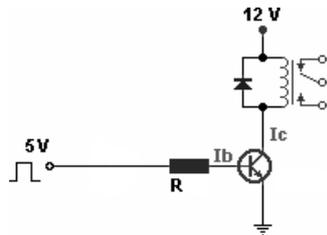


Figura 14. Transistor como interruptor con voltajes diferentes de alimentación.

Es necesario calcular la resistencia de base, R:

$$I_C = \frac{V_{relevador}}{R_{relevador}} = \frac{12(V)}{155(\Omega)} = 0.077(A)$$

$$I_b = \frac{I_C}{h_{fe}} = \frac{0.077(A)}{1000} = 77(\mu A)$$

$$V_b = R_b * I_b$$

$$R_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{5(V)}{77(\mu A)} = 64.5(k\Omega)$$

El diodo es un elemento de protección, el cual propicia que la energía residual en forma de carga eléctrica que conserva la bobina del relevador cuando se desactiva, no regrese por el circuito y ocasione daños a los demás componentes, el diodo debe soportar la corriente y el voltaje de la bobina por lo que se requiere un diodo que soporte 12[V] y 0.1 [A], de tal forma que podemos decir:

$$V_{diodo} = 12[V]$$

$$I_{diodo} = 0.1[A]$$

Para conectar el transistor a la DAQ se emplea un amplificador operacional en configuración de seguidor, de esa forma el voltaje de la DAQ se transmite íntegramente al transistor y si existiera alguna falla, el amplificador actuaría como un fusible eléctrico protegiendo el resto de los componentes. De la misma forma se conectará la salida del sensor de corriente, este da un voltaje analógico proporcional a la corriente censada. La figura 15 muestra la forma general de un amplificador operacional seguidor.

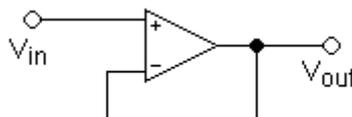


Figura 15. Amplificador operacional seguidor.

Se requiere medir el voltaje en las terminales del motor a caracterizar, MT; este voltaje es de tipo analógico y para garantizar que el voltaje corresponde únicamente al de las terminales, se tomará el valor de la tierra (0[V]) como referencia para esta medición. Esta comparación entre el voltaje de las terminales del MT y la tierra del circuito, se realizarán con ayuda de un amplificador operacional e configuración de restador.

La figura 16 muestra la forma básica de un amplificador operacional restador y la ecuación (17), modela su principio de funcionamiento.

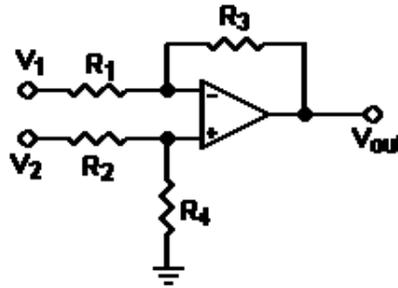


Figura 16. Amplificador operacional en configuración de restador.

$$V_{out} = V_2 \left(\frac{(R_3 + R_1)R_4}{(R_4 + R_2)R_1} \right) - V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right) \quad (17)$$

Por simplicidad buscaremos que las ganancias sean unitarias, esto se consigue si:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

$$V_{out} = V_2 \left(\frac{(R_1 + R_1)R_1}{(R_1 + R_1)R_1} \right) - V_1 \left(\frac{R_1}{R_1} \right) = V_2 \left(\frac{2R_1}{2R_1} \right) - V_1 = V_2 - V_1$$

Por lo que escogiendo cuatro resistencias iguales para el restador, los voltajes restados se obtendrán en forma directa.

Los motores tienen su fuente de voltaje regulada por voltaje, pero requieren de una etapa de potencia para poder encender los motores. Dicha etapa está constituida por dos transistores en arreglo T. La figura 17 muestra esta configuración. Este arreglo no sólo permite suministrar el voltaje y corriente necesarios, también nos permite cambiar el sentido de giro en el motor, en este caso eso nos permite que el usuario conecte los motores de forma arbitraria y que el sistema sea capaz de mover los motores en el sentido que se requiera para realizar las pruebas.

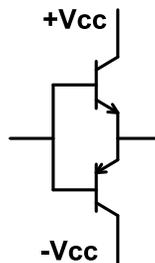


Figura 17. Transistores NPN y PNP respectivamente en configuración T.

Los transistores del arreglo deben poder soportar el voltaje, corriente y potencia eléctrica de los motores, estos datos serán tomados del motor patrón como referencia:

Pittman	V(V)	I(A)	Ipico(A)	Potencia (W)
9234	12	3.53	14.5	24

Tabla 15. Características eléctricas del motor patrón.

Los transistores 2SD1707 y 2SB1156 de Panasonic son capaces de soportar hasta 80(V) del colector al emisor, una corriente pico de 30(A) y una potencia máxima de 100(W). Las capacidades de estos transistores son adecuadas para el trabajo que se desea.

El circuito requiere de dos fuentes de voltaje de 0 a 12[V] con 20[A], con estas fuentes se debe formar un arreglo para obtener +12[V] GND y -12[V] de salida. En la salida de +12[V] se conecta un regulador de voltaje LM7805, a fin de tener una tercera señal de voltaje de 5[V] y alimentar con esta el encoder.

En la figura 8, se aprecian imágenes del circuito del sistema. En el Apéndice B se muestra la tabla de componentes, su diagrama de conexión y el diagrama de la PCB generada.

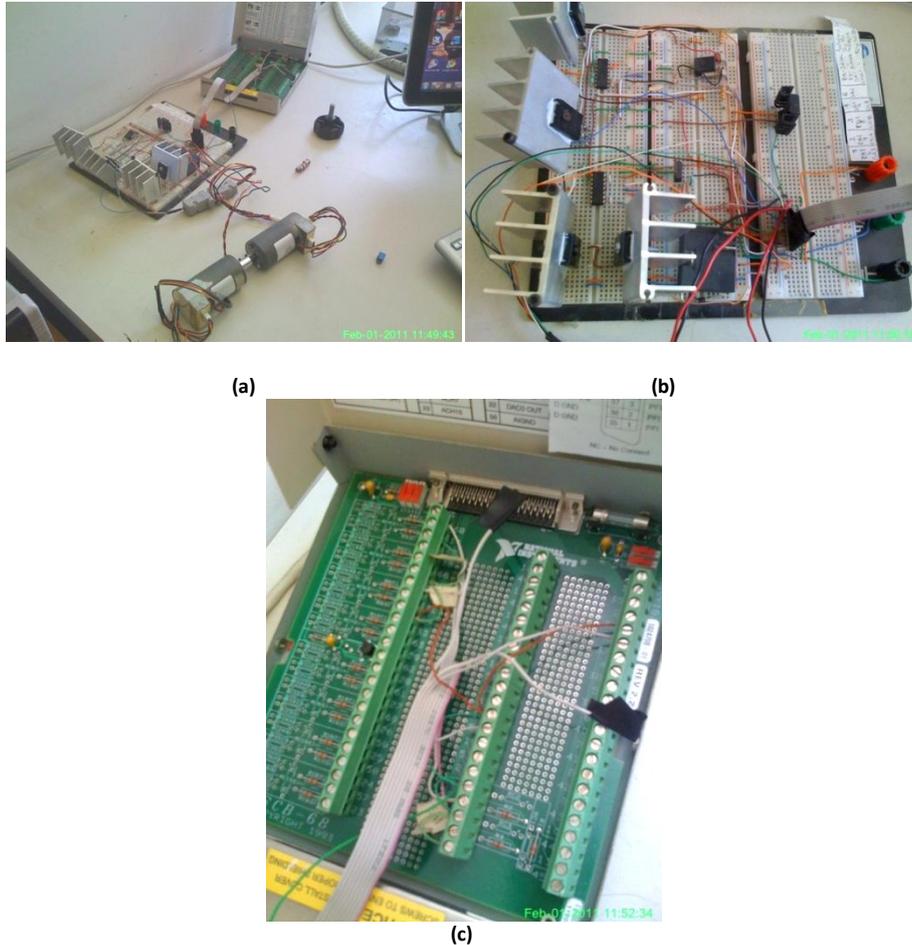


Figura 8. Imágenes del circuito del sistema, vista general del circuito y del sistema de adquisición de datos (a), vista del circuito del sistema (b), detalle de las conexiones en la DAQ (c).

3.3 Programación en LabVIEW

La instrumentación, control e interfaz humana está a cargo de LabVIEW, pese a ser un lenguaje de programación gráfico, se han seguido las recomendaciones de programación en lenguajes estructurados. Una de estas recomendaciones es el tener diversos subprogramas que realicen la mayor cantidad de tareas posibles, esto para que al depurar el programa sea fácil localizar que subprograma no cumple con lo esperado, esta forma de programar implica que el programa principal debe tener la menor cantidad de tareas a. Siguiendo esta ideología, se ha programado una rutina principal, llamada Virtual Instrument (VI) dentro de LabVIEW, la cual se apoya en subrutinas, Sub Virtual Instruments (SubVI), para cumplir con las tareas requeridas.

Cada VI y SubVI en LabVIEW tiene asociado un ícono, en dicho ícono es posible observar las entradas que la rutina requiere y las salidas que generará. Las señales de entrada en un VI son aquellos datos que la rutina requiere para ejecutar su tarea, mientras que las salidas serán los datos de salida que el VI arroje. Pueden existir VÍ's donde no existan entradas o salidas, todo depende de la forma de programar.

En los íconos las entradas y salidas se distinguen por su posición, dividiendo el ícono de forma axial exactamente por su mitad, aquellas etiquetas y señales localizadas a la izquierda de esta división serán las entradas al VI, mientras que las ubicadas a la derecha serán las salidas del VI. La figura 9 ilustra las entradas y salidas de un VI.

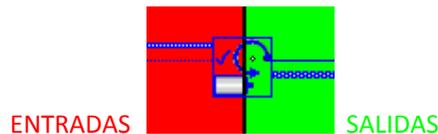


Figura 9. Distribución de las señales de entrada y de salida en el ícono de un VI en LabVIEW

Menú Principal

Esta rutina es la que llamara a las rutinas necesarias para caracterizar los motores La figura 18 nos muestra el icono del programa principal del banco, no posee entrada o salida alguna pues su única función es llamar a las demás rutinas.



Figura 18. Icono del menú principal del programa del banco

En el panel frontal de los VI se aprecian los elementos que el usuario puede ver, aunque dependiendo de la configuración que se le dé al VI en la ejecución, algunos elementos del panel frontal pueden quedar ocultos.

En el caso del menú, todos los elementos del panel frontal están expuestos al usuario, ver figura 19, la finalidad de estos es proporcionar una interfaz sencilla y completa para el control del banco, los elementos del panel que se aprecian son:

1. Instrucciones generales de operación del programa
2. Conjunto de cuadros de dialogo, donde el usuario podrá o no, introducir sus datos generales, asi como datos particulares del motor a caracterizar.
3. Conjunto de botones desde los que se podrá poner en marcha las pruebas, observar los datos obtenidos o salir del programa.

- ❖ “Manual”: Este botón le da acceso al usuario a un nuevo panel donde se podrá determinar el voltaje máximo a aplicar y el incremento de voltaje deseado en los motores., también se tendrá la opción de elegir que prueba se desea aplicar al motor.
- ❖ “Automático”: Esta opción llevara al usuario a un nuevo panel donde sólo se podrá ingresar el voltaje máximo a aplicar, el incremento de voltaje y las pruebas a realizar son determinados por el programa.
- ❖ “Resultados”: En esta opción se podrá desplegar en pantalla un resumen con los datos obtenidos de cada prueba, esta misma opción permitirá guardar dichos resultados.
- ❖ “Salir”: Al pulsar este botón se saldrá del programa.

Figura 19. Panel frontal del menú del programa del banco.

Ingresar parámetros automáticos

El banco de pruebas tiene dos formas de operar, automática y manual, en cada una de ellas se deben ingresar algunos parámetros para que la operación del banco no dañe alguno de sus componentes o al motor a caracterizar.

Aunque los parámetros necesarios para ambas modalidades son los mismos, voltaje nominal del motor e incremento de voltaje, la forma como el programa interpreta y valida estos parámetros varía. En el modo automático el usuario no tiene control total de los valores de estos parámetros, sólo puede modificar el incremento del voltaje y existe un valor de voltaje nominal precargado en el programa. Mientras que en la modalidad manual es capaz de ingresar los valores que desee en ambos parámetros.

Aun así en cada modalidad existen límites inferiores y superiores de los parámetros que deben ser respetados para garantizar la correcta operación del banco y la validez de los resultados. Es por ello que se requiere de alguna manera que el usuario ingrese los datos y que estos sean validados.

En respuesta a esto tenemos dos sub-rutinas, una de ellas “Ingresar parámetros automáticos”, cuyo icono se puede ver en la figura 20. Esta rutina permitirá ingresar los parámetros para la modalidad automática del banco y también los validará.



Figura 20. Icono del VI “Ingresar parámetros automáticos”.

Esta rutina no posee entradas ni salidas. En la figura 21 se puede observar el panel frontal de este VI.

1. Instrucciones de uso, el panel le muestra al usuario los pasos a seguir para iniciar la prueba. En este apartado se muestra el intervalo de voltaje para el motor y las consecuencias de ingresar un valor fuera de este intervalo. En caso de que el usuario ingrese un valor no válido, el programa en automático le asignará 12V al voltaje del motor y este será el valor a usar en el programa. El incremento de voltaje no puede ser modificado en este programa.
2. Cuadro de diálogo para ingresar el voltaje nominal del motor, este será el voltaje máximo aplicado por el programa.
3. Botón para iniciar la rutina, al ejecutar el programa se activa este botón. En cualquier momento este botón podrá ser presionado, si el usuario ha ingresado valores fuera del intervalo, el programa utilizará 12[V] como voltaje nominal y 100[mV] como incremento de voltaje.
4. Indicador del voltaje, este tiene la función de indicarle al usuario si el valor del voltaje está o no está dentro del intervalo permitido (0-12[V]), figura 21 (b) y (c) respectivamente, mediante un letrero y una luz de fondo.
5. Botón de regreso, con este botón se podrá detener esta rutina y regresar al menú principal.
6. Cuadros de diálogos, en estos cuadros se mostrarán los valores que el programa utilizará para realizar las pruebas, el usuario podrá observar que valores de voltaje e incremento de voltaje se utilizarán.

Banco de Pruebas para Caracterizar Motores de Corriente Directa

Parámetros de la PruebaModo Automático

1.- Ingrese el Voltaje de trabajo de su motor (V_{nom}), dicho valor debe estar en un intervalo de 0 a 12[V] en caso de no ingresarlo el programa asignará de forma automática un valor de 12[V], tenga cuidado pues si su motor trabaja a un voltaje menor esto podría dañarlo permanentemente.
 2.- En incremento de voltaje (IV), el programa automáticamente asignará un valor de 100[mV], es imposible en esta modalidad variar este dato.
 3.- Antes de seleccionar "Iniciar" verifique en el apartado "Valores a Utilizar", en caso de que los parámetros no sean los deseados, corrija antes de hacer clic.
 4.- Cuando todos los parámetros sean los correctos, de clic en "Iniciar", las pruebas comenzarán en secuencia automática.

Ingrese Voltaje Nominal V_{nom}	¿ V_{nom} Ingresado dentro del rango?	Valores a Utilizar
0 <input style="width: 80%;" type="text"/>	NO	Voltaje Nominal V_{nom} en [V]
Iniciar	Regresar	0 <input style="width: 80%;" type="text"/>
		Incremento de voltaje IV en [mV]
		0 <input style="width: 80%;" type="text"/>

(a)

Ingrese Voltaje Nominal V_{nom}	¿ V_{nom} Ingresado dentro del rango?	Ingrese Voltaje Nominal V_{nom}	¿ V_{nom} Ingresado dentro del rango?
9 <input style="width: 80%;" type="text"/>	SI	0 <input style="width: 80%;" type="text"/>	NO
Iniciar	Regresar	Iniciar	Regresar

(b)

(c)

Figura 21. Panel frontal “Ingresar parámetros manuales”. Estado del panel antes de ser ejecutado (a), el panel indica si el voltaje está en el intervalo (b) y el panel indica si está fuera del intervalo (c).

Introducir parámetros manuales

Si el usuario decidiera operar de forma manual el banco se deberán ingresar dos parámetros, uno para controlar el voltaje máximo aplicado al motor a caracterizar, V_{nom} , y también se debe ingresar el incremento de voltaje deseado en las terminales del mismo motor, IV.

En este menú el usuario también será capaz de seleccionar que prueba es la que desea realizar. Contrario a la forma automática, el usuario tendrá plena libertad de realizar el número de pruebas que desee así como el orden de las mismas. Al término de cada prueba seleccionada, se volverá a este menú donde el usuario podrá elegir una nueva prueba o salir del programa.



Figura 22. Ícono de la rutina "Introducir parámetros manuales"

En la figura 22 se muestra el icono que representa a esta rutina, podemos observar que no tiene entradas o salidas puesto que esta rutina actúa sólo como un enlace para las pruebas a realizar y el menú principal.

En la figura 23 podemos apreciar el panel frontal de esta rutina, los puntos más importantes de este panel son: Instrucciones de la rutina, en ellas se muestran los lineamientos generales que el usuario debe saber para poder usar esta rutina adecuadamente.

1. Instrucciones de uso, el panel le muestra al usuario los pasos a seguir para iniciar la prueba. En este apartado se muestra el intervalo de voltaje para el motor y del incremento de voltaje
2. Voltaje nominal V_{nom} , en esta sección el usuario ingresará el voltaje máximo que se le aplicará al motor a caracterizar. Internamente el programa validará que esté en el intervalo tolerado y emitirá una señal de aprobación o rechazo al valor ingresado.
3. Incremento de voltaje IV, es aquí donde el usuario ingresará que tanto variará el voltaje del motor, también será validado internamente y se emitirá una señal mostrando si cumple o no con las condiciones necesarias.
4. Selección de la prueba, con este menú desplegable el usuario podrá elegir la prueba que se quiera.
5. Indicadores de validez, los valores ingresados por el usuario serán validados internamente, si ambos cumplen con la condición del intervalo se podrá comenzar la prueba, en caso de que al menos uno de los valores no sea adecuado la prueba no podrá realizarse.
6. Una vez que se hayan ingresado los datos y estos cumplan con los valores del intervalo este botón tendrá la cualidad de comenzar la prueba seleccionada.
7. Con esta opción en cualquier momento se podrá salir de este panel frontal y regresar al menú principal del programa.

Banco de Pruebas para Caracterizar Motores de Corriente Directa	
Parámetros de la Prueba	Modo Manual
1.- Ingrese el voltaje de trabajo de su motor, este voltaje debe estar en un intervalo de 1 a 12[V] 2.- En incremento de voltaje ingrese el aumento que tendrá el motor en cada iteración, este incremento debe ser mayor a 0[V] y menor al voltaje nominal. Mientras mas pequeño sea el incremento de voltaje la prueba será mas precisa, pero llevará mas tiempo completarla. 3.- Seleccione la prueba que desea realizar con el menú desplegable 4.- Revise que los parámetros ingresados sean correctos así como la prueba seleccionada; posteriormente seleccione "Ir a la Prueba". Es importante señalar que con al menos un parámetro fuera de los rangos permitidos, no se podrá ir a la prueba deseada.	
Voltaje nominal Vnom en [V]	Incremento de voltaje IV en [mV]
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Seleccione la prueba a realizar <input type="text" value="Rotor Bloqueado"/>	¿Valor dentro del rango permitido? Vnom <input type="text" value="NO"/> IV <input type="text" value="NO"/>
<input type="button" value="IR A LA PRUEBA"/>	<input type="button" value="REGRESAR"/>

Figura 23. Panel frontal de "Ingresar parámetros manuales"

Entrada DAQ

Al emplear una DAQ es importante tener en cuenta los intervalos de voltajes de entrada y salida que posee; esto para evitar posibles daños a la tarjeta. La tarjeta seleccionada nos brinda salidas y entradas analógicas de voltaje con valores de -10 a 10 V y entradas y salidas digitales con valores de 0 ó 5 V. Para controlar en todo momento los voltajes de entrada y salida en la DAQ se diseñaron dos VI's, uno de ellos que regula los voltajes de entrada a la DAQ y otro que controla los voltajes de salida que brinda la DAQ. La figura 24 muestra el icono del VI para las señales de entrada al circuito desde la DAQ., mientras que en la figura 25 se muestra el panel frontal de esta rutina; dicho panel no es visible al usuario en ningún momento de la prueba.



Figura 24. Icono de la rutina "Entrada DAQ".

En el icono se observan líneas y etiquetas. En LabVIEW, estas líneas indican transmisión de datos y al estar colocadas en el icono nos señalan las entradas y salidas del programa. Las entradas se marcan a la izquierda del icono y las salidas a la derecha:

Entradas:

- V MT.- Voltaje del Motor Tipo, en esta entrada le llegara a la tarjeta un valor numérico dentro del intervalo 0-5[V]; dicho valor será el mismo que tendrá el voltaje analógico de salida para el motor tipo.
- V MP.- Voltaje del Motor Patrón, en esta entrada nuevamente la tarjeta recibirá un valor numérico en el intervalo de 0-5[V], este valor será la cantidad de voltaje que se enviará al circuito para hacer funcionar al motor patrón.
- RELE 1/0.- Relevador, en esta entrada la tarjeta recibirá una señal booleana, esta señal emitirá un voltaje de excitación en el transistor que controla al relevador.

Salidas:

- Error out.- Constituye una cadena de información, en caso de que al momento de ejecutar el programa surgiera algún error, esta cadena informaría que error se produjo.

Del panel frontal destacan los siguientes elementos:

1. V MT, en este cuadro de texto se ingresa el valor de voltaje que será suministrado al motor tipo a través del circuito de control.
2. V MP, en este apartado se ingresa el voltaje suministrado al motor patrón a través del circuito
3. RELE 1/0, este es el control para encender o apagar el relevador del circuito. Es un arreglo booleano el elemento 0 del arreglo es el encargado de controlar el relevador.
4. Error out, en este cuadro de texto aparecerá el numero de error y la descripción del error si este existe al ejecutar la sub-rutina.

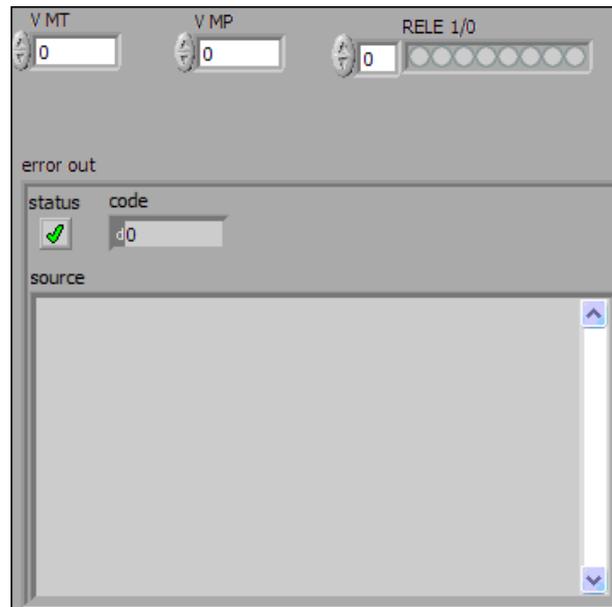


Figura 25. Panel frontal de "Entrada DAQ".

Salida DAQ

El circuito emitirá señales de salida que serán captadas por la DAQ, quien con ayuda del programa las interpretará y calculara las constantes buscadas.

En la figura 26 se observa el icono de esta rutina, en el icono se puede ver que no tiene entrada alguna, esto debido a que esta rutina funge como lectura de los valores emitidos por el circuito.



Figura 26. Icono de la rutina "Salida DAQ"

Salidas:

- V Real.- este valor constituye el voltaje que se le aplica directamente a las terminales del motor tipo.
- V Gen.- Este valor mostrará el voltaje generado por el motor patrón al girar libremente inducido por el motor tipo.
- V Sensor.- el sensor de corriente emite un voltaje de salida proporcional a la corriente de entrada.
- ω (rad/s).-la lectura del encoder del motor patrón es transformada a velocidad angular para que sus unidades sean congruentes con el resto de las mediciones.

En la figura 27 se observa el panel frontal de esta rutina, este panel no estará a la vista del usuario. Del panel frontal se destacan los siguientes elementos:

1. V real, en este cuadro se despliega el valor numérico del valor real aplicado al motor
2. V Gen, aquí se desplegara el valor del voltaje generado
3. V Sensor, la corriente leída en el sensor se transformara en voltaje y se desplegará en este cuadro de texto
4. ω (rad/s), la velocidad angular de las flechas del motor se despliega en este cuadro, el valor de este elemento de texto es el usado en el resto de las rutinas.
5. RPS, la velocidad angular de las flechas se despliega en este cuadro de texto en revoluciones por segundo, este valor en estas unidades no se utilizará en el resto del programa pero ayuda para depurar el programa y verificar que el encoder funcione correctamente
6. RPM, la velocidad angular de la flecha aparece en este recuadro en revoluciones por minuto, aunque no se utilizara este valor en estas unidades más adelante, tener esta referencia ayuda a verificar si el encoder y el programa despliegan datos verídicos.
7. Gráfica de velocidad angular, este elemento grafico muestra en tiempo real la velocidad de las flechas, este elemento tiene la función de mostrar en régimen permanente que tan constante es la velocidad de las flechas.
8. Error out, en este cuadro de texto se despliegan los errores que se pueden producir al ejecutar la rutina.

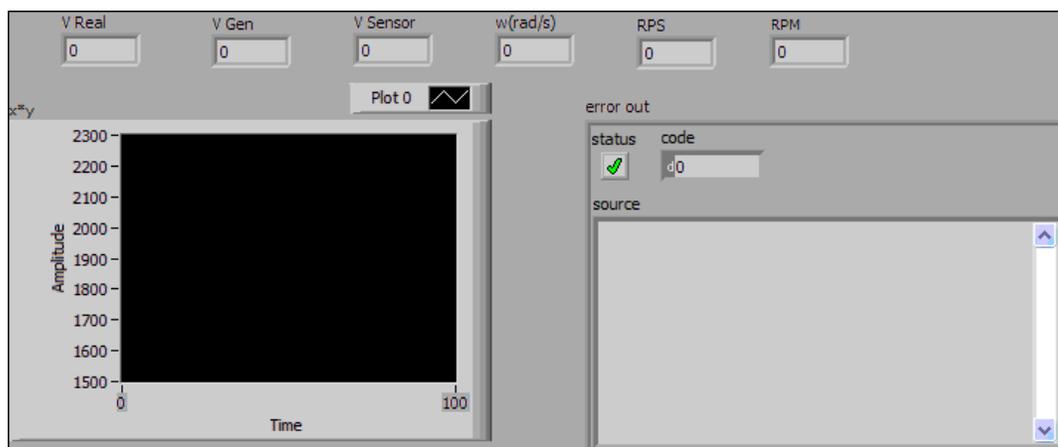


Figura 27. Panel frontal de "Salidas DAQ".

Rotor Bloqueado (Rotor a velocidad angular constante)

La prueba a rotor bloqueado determinará la constante que relaciona el par y la corriente, la figura 28 muestra el icono de esta rutina.



Figura 28. Ícono de la prueba a rotor bloqueado.

SE puede ver que posee una sola entrada, la cual de comunica a la rutina si el usuario ha seleccionado la opción de modo manual o automático.

El panel frontal de esta rutina se aprecia en la figura 29, des este panel destacan los siguientes elementos:

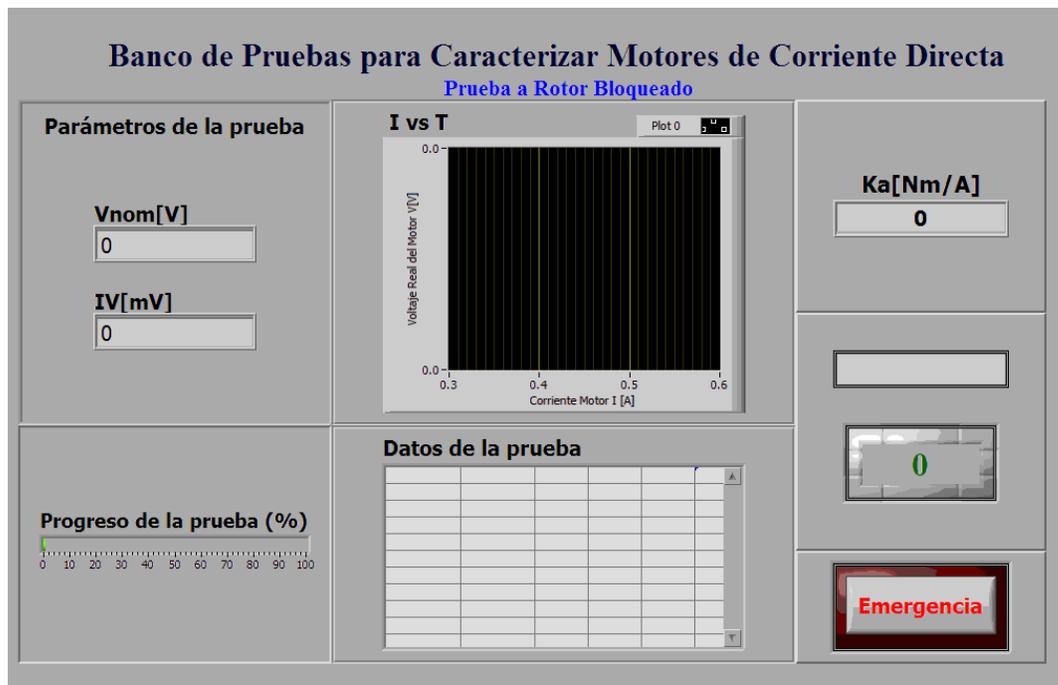


Figura 29. Panel frontal de la prueba a rotor bloqueado.

1. Parámetros de la prueba, en este apartado se mostrarán los parámetros de voltaje e incremento del voltaje que la computadora utilizará en la prueba. Estos datos no se pueden modificar desde esta rutina.
2. Gráfica I vs V, esta gráfica mostrará en tiempo real las lecturas de los sensores de voltaje y corriente; al término de la prueba mostrará la gráfica original y la regresión lineal para estimar la resistencia.
3. Resistencia, aquí se mostrará el valor de la pendiente de la regresión línea, la cual corresponde al valor de la constante K_a .
4. Progreso de la prueba, se muestra el avance de la prueba para que el usuario pueda estimar cuánto tiempo falta para el término de la misma.
5. Tabla de resultados, al concluir la prueba se desplegará en esta tabla u condensado de las lecturas hechas por la DAQ.

6. Siguiente proceso, en este apartado se pedirá al usuario que apriete un botón si el proceso se ha seleccionado de forma manual, o se iniciara una cuenta regresiva del 10 al 0 que al concluir conducirá automáticamente a la siguiente rutina del programa.
7. Paro de emergencia, en caso de requerir detener el proceso, este botón se comportara como un interruptor general. Una vez accionado, envía una señal a la DAQ para apagar los motores, envía 0[V] a cada motor como alimentación, el programa por completo se cierra y si se desea continuar con la caracterización del motor, el proceso deberá comenzar nuevamente.

Rotor Libre

La prueba a rotor libre determinara los valores de las constates K_b y la resistencia de armadura R . el icono de esta rutina se aprecia en la figura 30.



Figura 30. Icono de la prueba a rotor libre.

Entradas:

- Parámetros IN, en esta parte se le comunicara a la rutina los parámetros de la prueba.
- Man/atm, se le comunicara a la rutina si el usuario ha seleccionado la opción manual o automática

Salidas:

- K_b , esta salida comunica el valor de K_b
- Resultados, un condensado de todas las lecturas realizadas en la prueba se comunican en esta salida como una tabla de datos.

La figura 31 muestra el panel frontal de la rutina, destacan los siguientes elementos del panel:

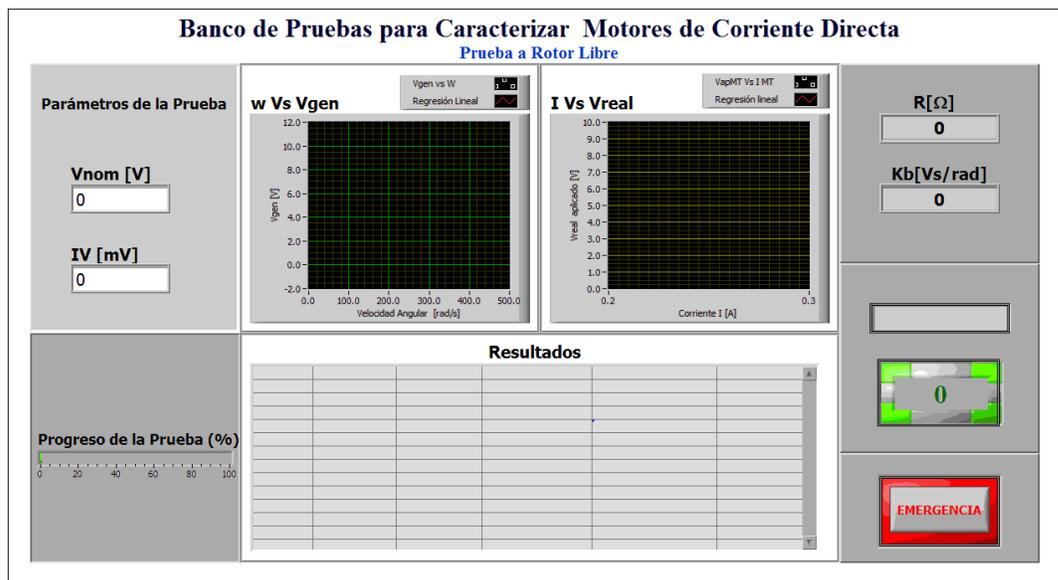


Figura 31. Panel frontal de la prueba a rotor libre.

1. Parámetros de la prueba, en este apartado se mostraran los parámetros de voltaje e incremento del voltaje que la computadora utilizara en la prueba. Estos datos no se pueden modificar desde esta rutina
2. Gráfica ω vs V_{gen} , esta gráfica muestra en tiempo real los datos obtenidos I DAQ, al término de la prueba despliega en la misma grafica los datos leídos y la regresión lineal correspondiente.
3. Gráfica I vs V, en esta grafica se despliega en tiempo real los valores obtenidos por la DAQ, al término de la prueba se observa la regresión lineal de los datos.
4. R y Kb, en esta sección se muestran los valores calculados para la resistencia de armadura y para la constante Kb
5. Progreso de la prueba, se muestra el avance de la prueba para que el usuario pueda estimar cuanto tiempo falta para el término de la misma.
6. Tabla de resultados, al concluir la prueba se desplegará en esta tabla u condensado de las lecturas hechas por la DAQ.
7. Siguiete proceso, en este apartado se pedirá al usuario que apriete un botón si el proceso se ha seleccionado de forma manual, o se iniciara una cuenta regresiva del 10 al 0 que al concluir conducirá automáticamente a la siguiente rutina del programa.
8. Paro de emergencia, en caso de requerir detener el proceso, este botón se comportara como un interruptor general.

Prueba escalón

La prueba escalón determina el valor de J, para ello se ha diseñado una rutina exclusivamente para esta prueba cuyo icono se aprecia en la figura 32



Figura 32. Icono de la prueba escalón.

Entradas:

Posee una única entrada en la cual se le comunican los parámetros de la prueba

Salidas:

La única salida que tiene envía en forma de tabla de datos, los resultados de la prueba.

La figura 33 muestra el panel frontal de esta rutina, destacan los siguientes elementos:

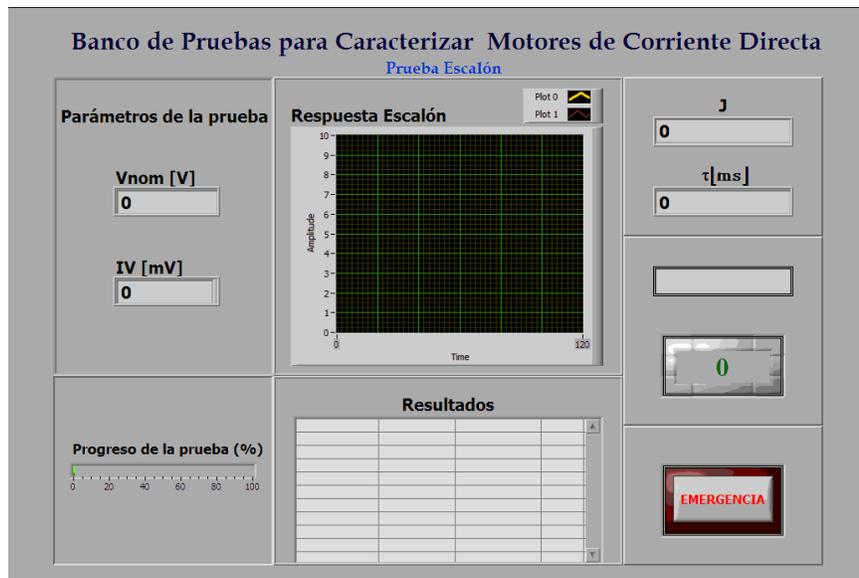


Figura 33. Panel frontal de la prueba escalón.

1. Parámetros de la prueba, en este apartado se mostraran los parámetros de voltaje e incremento del voltaje que la computadora utilizara en la prueba. Estos datos no se pueden modificar desde esta rutina.
2. Gráfica t vs V , esta grafica mostrara en tiempo real las lecturas de los sensores de voltaje aplicado y generado y el tiempo de la prueba.
3. J y τ , aquí se mostrará el valor J , la inercia del rotor, y la constate de tiempo τ del motor
4. Progreso de la prueba, se muestra el avance de la prueba para que el usuario pueda estimar cuanto tiempo falta para el término de la misma.
5. Tabla de resultados, al concluir la prueba se desplegará en esta tabla u condensado de las lecturas hechas por la DAQ.
6. Siguiete proceso, en este apartado se pedirá al usuario que apriete un botón si el proceso se ha seleccionado de forma manual, o se iniciara una cuenta regresiva del 10 al 0 que al concluir conducirá automáticamente a la siguiente rutina del programa.
7. Paro de emergencia, en caso de requerir detener el proceso, este botón se comportara como un interruptor general.

Mostrar y guardar datos

Los obtenidos de cada prueba se pueden observar detenidamente en una rutina especializada en este asunto, esta misma rutina nos permite guardar aquellos datos que creamos necesarios en un archivo de Microsoft Excel 2007 o superior.

En la figura 34 observamos el icono de esta rutina, se puede ver que tiene varias entradas.

Entradas:

- Datos generales, en el menú principal del programa se le pide al usuario que introduzca su nombre, datos del motor y de la prueba, estos datos serán grabados en el archivo de Excel.
- Parámetros del motor, los parámetros seleccionados para la prueba, ya sea en el menú de pruebas automáticas o pruebas manuales, se comunican por esta entrada al VI; el VI se encargará de guardar estos datos si el usuario así lo desea.
- Rotor libre resultados, los datos obtenidos del rotor libre se guardan en la hoja de Excel
- Rotor bloqueado resultados, los datos del rotor bloqueado se guardan en la hoja de Excel
- Prueba escalón resultados, los datos de la prueba escalón se guardan en la hoja de Excel.

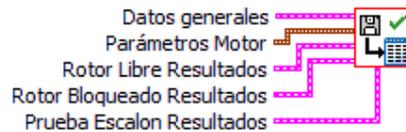


Figura 40. Icono de la rutina mostrar y guardar datos.

En la figura 41 se ve el panel frontal de esta rutina, este panel a diferencia del resto de los paneles posee 4 diferentes vistas para cumplir sus funciones.

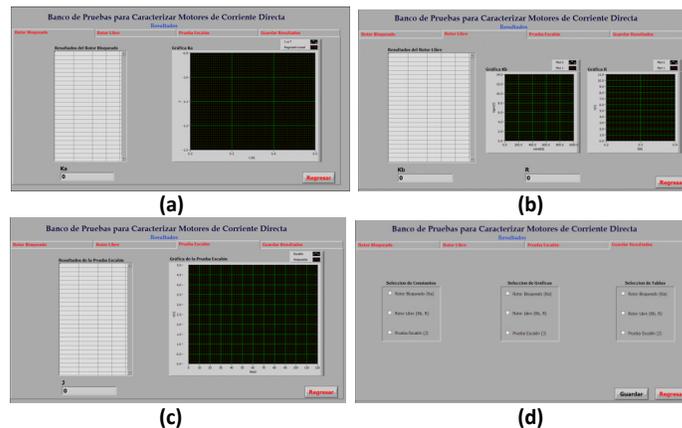


Figura 41. Las cuatro diferentes vistas del panel frontal de mostrar y guardar datos. Rotor bloqueado (a), Rotor libre (b), Prueba escalón (c) y Guardar datos (d).

Cada vista del panel tiene sus propios elementos los cuales son:

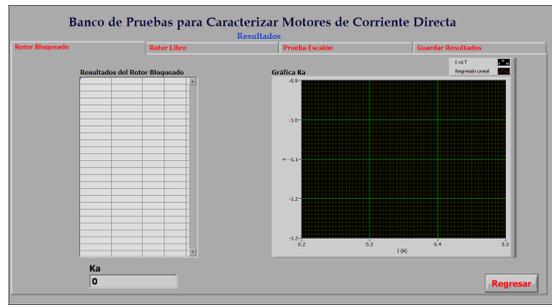


Figura 41(a). Vista de resultados de la Prueba a Rotor Bloqueado (Velocidad angular constante) en la rutina mostrar y guardar datos.

1. Tabla de resultados, los resultados del rotor bloqueado se muestran en esta tabla.
2. Constante K_a , el valor calculado de esta constante se despliega en este cuadro.
3. Gráfica de la prueba a rotor bloqueado, la grafica de los datos obtenidos y la regresión lineal de la prueba se muestran en este grafico.

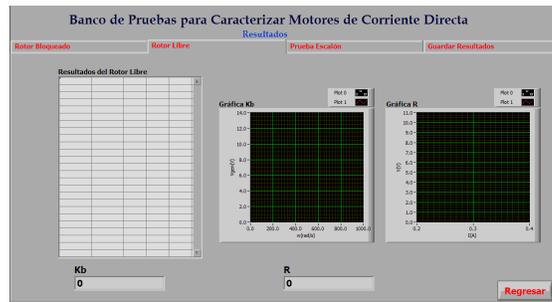


Figura 41(b). Vista de la Prueba a Rotor libre en la rutina mostrar y guardar datos.

1. Tabla de resultados, los resultados de la prueba a rotor libre se muestran en esta tabla.
2. Gráfica de K_b , la grafica de los datos obtenidos y la regresión lineal de la prueba se muestran en este grafico.
3. Gráfica de R , la grafica de los datos obtenidos y la regresión lineal de la prueba se muestran en este grafico.
4. Constante K_a , el valor calculado de esta constante se despliega en este cuadro.
5. Constante R , el valor calculado de esta constante se despliega en este cuadro.

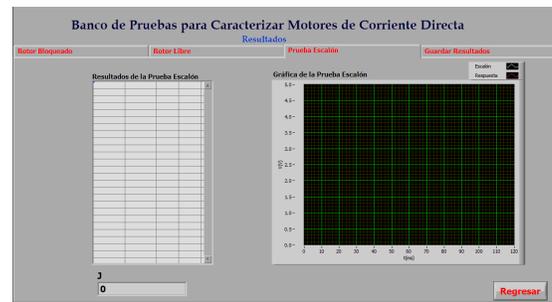


Figura 41(c). Vista de la prueba escalón de la rutina mostrar y guardar datos.

1. Tabla de resultados, los resultados la prueba escalón se muestran en esta tabla.
2. Constante J , el valor calculado de esta constante se despliega en este cuadro.
3. Gráfica de la prueba escalón, la grafica de los datos obtenidos se muestran en este grafico.



Figura 41(d). Vista de guardar resultados de la rutina mostrar y guardar datos.

1. Seleccionar constantes, en este apartado se pueden seleccionar las constantes a guardar, Kb y R al ser calculadas en la misma prueba se consideran como una sola opción
2. Seleccionar gráficas, de las gráficas desplegadas en cada constante se pueden seleccionar aquellas que se deseen guardar, las graficas de Kb y R se consideran como una sola opción.
3. Seleccionar tablas, las tablas de resultados de cada prueba pueden ser guardadas de forma independiente.
4. Guardar, después de haber seleccionado los datos a guardar, esta opción graba los datos en un archivo de Excel.

Las cuatro diferentes vistas de este panel tienen elementos comunes como se aprecia en la figura 42



Figura 42. Opciones comunes en las cuatro vistas del panel de mostrar y guardar datos.

1. Pestañas de selección, con estas pestañas se el usuario puede elegir que versión del panel frontal desea ver.
2. Regresar, con este botón se puede acceder nuevamente al menú principal del programa.

Capítulo 4: Pruebas.- condiciones, resultados y validación.

Una vez que se tiene desarrollado un sistema, este debe pasar por diversas pruebas para observar si cumple con las expectativas planteadas, para observar posibles fallas y así validar el sistema desarrollado o indicar los errores a corregir.

Por otro lado, estas pruebas también tienen la finalidad de mostrarnos que tan confiable es nuestro sistema, este sistema no es muy diferente a una regla, un cronómetro o un tacómetro. Como cualquier elemento de medición requiere tener sensibilidad, exactitud y repetibilidad aceptables; de lo contrario no serviría como elemento de medición y mucho menos de caracterización.

Para determinar todos estos elementos se realizan una serie de pruebas, mismas que se realizaron bajo elementos controlados y en circunstancias idénticas para evitar que algún elemento externo afectara los resultados.

La validación de un sistema es el alma del diseño, sin importar que la parte teórica, matemática y de manufactura de un proyecto sean correctos, de no ser capaz el sistema de cumplir adecuadamente la tarea para el cuál fue concebido, se tendrá un producto nuevo pero inefectivo para la aplicación deseada. Es por ello que este puede ser el capítulo más importante de todos, pese a que desde el Capítulo uno hasta el cuatro, se mostro el planteamiento del problema, su desarrollo, solución y puesta en marcha; es ahora cuando vamos a determinar de una vez si todo lo anterior que se desarrollo es válido o no lo es.

Mostrar todas las pruebas que se realizaron sería impráctico, se tendrían muchos datos, la gran mayoría de ellos repetidos, por lo que se mostrarán sólo los datos correspondientes a una de las pruebas realizadas, estos resultados corresponden a los de probar de forma automática el sistema, con un voltaje máximo de 10[V] y 100[mV] como incremento de voltaje.

4.1 Condiciones de la pruebas

- Fuente de alimentación con dos salidas variables de 0-20[V] a 3[A] y una salida fija de 5[V] a 3[A]
- Circuito montado en tabletas de experimentación o protoboards por la facilidad de reemplazo de componentes dañados a lo largo de las pruebas
- Adquisición de datos directamente desde LabVIEW (versión no ejecutable del programa), esta decisión es para facilitar la depuración del programa en las áreas donde no se obtengan los resultados deseados.
- Los motores se acoplaron mediante un cople rígido y no fueron montados al resto del banco.
- Se utilizaron dos motores del mismo fabricante y del mismo modelo. Esta elección obedece a que se tenían los dos motores y se contaba con la hoja de especificaciones del fabricante; lo que permitió al término de las pruebas comparar los datos obtenidos con los brindados por el fabricante.
- La prueba a rotor bloqueado fue limitada a 2.5[V] de alimentación en cada motor, esto debido a que la fuente con la que se realizó la prueba entraba en corto circuito al alimentar los dos motores y superar los 2.5[V] en cada motor..

Se desarrollaron tres grandes módulos en este proyecto, la parte mecánica, electrónica y de programación. La interacción conjunta de estos módulos constituye el desarrollo completo del sistema.

Sin embargo no ha sido posible probar de forma conjunta estos elementos. Se ha tenido que hacer la validación de estos elementos por separado y se ha buscado acoplar la mayor cantidad de elementos posible para una validación final.

El módulo mecánico fue validado por separado, el cople retráctil se ensambló y se verifico que era capaz de transmitir el movimiento entre las flechas, pese al resorte en su interior; sin embargo, la manufactura del mismo tenía defectos en las entradas a las flechas, lo que provocaba que al poner los motores a girar a su voltaje nominal, existirá mucha vibración, afectando el funcionamiento del circuito y de la lectura de la DAQ. Por este motivo se decidió no utilizar este cople en la prueba final y se reemplazo por un cople rígido simple ajustado para las flechas de los motores que se tenían. Dado que no se utilizo en las pruebas finales el cople retráctil, no fue posible montar los motores en el bastidor mecánico del banco, además de que el motor patrón requiere un par de tornillos, para su montaje, que fueron imposibles de conseguir.

Aunque esto podría parecer un punto en contra y un argumento para decir que no se comprobó si el sistema funciona o no, se debe recordar que el sistema desarrollado es un prototipo y que en una siguiente versión del mismo, se deben tomar en cuenta estas observaciones para evitar cometer los mismos contratiempos.

Finalmente hay que decir que el freno en el motor a caracterizar se brindó por medio de un motor acoplado a este cuyo rotor giraba en sentido opuesto. Este tipo de freno ofrece la ventaja de no requerir elementos externos como balatas, barras de palanca y topes mecánicos etc..., sin embargo este acomodo genera que los motores aumenten su demanda de corriente eléctrica al estar semi bloqueados sus rotores. La fuente empleada no es capaz de completar el barrido completo desde 0[V] hasta 12[V], voltaje nominal de los motores empleados, si estos tienen su rotor semi bloqueado o bloqueado completamente. La fuente es capaz de alimentar

en esta circunstancia a los motores hasta 2.5[V] a cada uno. Esto llevo a tener que realizar esta prueba a escala. Recordemos que a la prueba a velocidad constante, Rotor Bloqueado, genera una recta como resultado, cuya pendiente es la constante K_a . Al ser una recta, la pendiente de la misma no debería cambiar si se tuvieran 100 puntos de la misma o sólo 2 puntos, bajo esta premisa, el hacer esta consideración no debería cambiar el hecho de demostrar que conceptualmente hablando, el sistema funciona o no.

Nuevamente recordemos que esto es un prototipo, por lo que si se deseará desarrollar un producto con estas bases, se debe adquirir la fuente adecuada para su alimentación.

4.2 Variantes de las pruebas

En el capítulo 3 se observo que el usuario tiene la posibilidad de seleccionar el modo de operación del sistema, automático o manual. También tiene la opción de determinar el incremento de voltaje a utilizar y el voltaje máximo en el motor.

Estas variantes fueron consideradas en las pruebas de los motores, de tal forma que se observo la diferencia en los resultados al tener incrementos de voltaje de 10[mV], 100[mV], 250[mV], 500[mV] y 1[V]. También se vario el voltaje máximo en los siguientes valores 5[V], 6[V], 8[V], 10[V] y 12[V].

Se observo que al tener un intervalo más amplio en el voltaje nominal del motor no influía de forma sustancial en la variación de los parámetros obtenidos, pero el variar el incremento de voltaje tiene una relación directa con la exactitud del sistema. Mientras más pequeña sea la variación de voltaje, mas puntos en las graficas, tablas y relaciones lineales se tienen, lo que da mayor exactitud al sistema, pero en contra parte, el tiempo de caracterización aumenta.

Se buscó una forma de tener el menor tiempo posible de caracterización, pero sin sacrificar la exactitud del sistema, tras varias pruebas se detectó que un incremento de 100[mV] ofrece un tiempo total de 12 minutos en el proceso y una exactitud con variación de 0.003 decimales en promedio en las constantes dadas por el fabricante. Por este motivo, las pruebas realizadas consideraron siempre una variación de 100[mV].

4.3 Ajustes de las pruebas

El plan trazado en cada prueba de caracterización sufrió ajustes en el transcurso del proyecto.

El módulo mecánico requirió de ajustes en las dimensiones de las piezas manufacturadas, pese a estos ajustes, el cople retráctil concebido para el diseño original generó demasiadas vibraciones que afectaban el funcionamiento del resto del sistema.

Por otro lado, el freno mecánico del motor requirió de el estudio del motor patrón, MP. Recordemos que el sistema de freno seleccionado consiste en un motor acoplado al motor a caracterizar, donde ambos motores giran en sentidos opuestos, generando en las flechas que las velocidades angulares se resten emulando la acción de un freno. Se pone a girar el MP, hasta que alcance una velocidad angular constante ya conocida, en el momento que el motor alcanza su estado permanente de trabajo, se acciona el motor a caracterizar, MT, que gira en sentido inverso y frena al primer motor. Esta acción de freno se traduce en la reducción de la velocidad angular de los motores, lo que obliga al MP a incrementar su torque para recuperar la velocidad angular deseada.

Cuando ambos motores giran en sentido inverso, pero su velocidad angular es siempre la misma y constante, el torque de ambas flechas garantizando el estado de equilibrio en el sistema.

El freno del sistema es empleado para conocer la constante K_a (I contra T), por lo que se debe poder cuantificar el torque de los motores y la corriente que recibe el MT; para ello se emplearon los datos que el fabricante otorgó del MP, donde se proporcionan los datos necesarios para relacionar el voltaje que se aplica con la velocidad angular que entrega y la velocidad angular que el motor proporciona con el torque de su flecha. De esta forma es posible conocer el torque que el MP otorga en cada instante, pues sólo es necesario conocer el voltaje que recibe, la cual es una variable plenamente controlada por la DAQ.

Cada vez que los motores llegan al punto de equilibrio, cuando recuperan la velocidad angular deseada, se adquiere el voltaje aplicado en el MP y con ayuda del sensor de corriente, se adquiere la corriente que circula por el MT. Con estos datos es posible obtener la constante K_a del sistema. A lo largo de las pruebas se experimentó con el MP y las ecuaciones proporcionadas por el fabricante para corroborar que el torque entregado sea el calculado por las ecuaciones.

El circuito del sistema requirió de reemplazo de componentes dañados durante las pruebas, una vez que se adquirieron los componentes adecuados para el circuito, se pudieron realizar las pruebas requeridas en el sistema. El circuito fue probado con ayuda de una fuente y un osciloscopio para verificar su reacción ante diversos estímulos. De esta forma se comprobó si el circuito respondería adecuadamente cuando la DAQ emitiera las señales de control.

El módulo de control fue el más flexible para probar, en un inicio no se programaron las rutinas necesarias para las pruebas, se comenzó con rutinas de propósito general donde se pretendía observar el comportamiento de la computadora al procesar los datos. Cuando se aprendió lo suficiente de estos programas, se procedió a programar la rutina del sistema, misma que sufrió tres diversas modificaciones considerables en su formación.

4.4 Reporte de las pruebas en Excel

Una vez que se han concluido las pruebas, se pueden guardar las gráficas, tablas y constantes obtenidas en un libro de Excel. El sistema de almacenamiento de datos no es compatible con otros programas.

De forma automática el sistema distribuye los datos en las filas y columnas de la hoja de cálculo, pero le ofrece al usuario la capacidad de modificar el formato de los datos una vez que estos se encuentran en Excel. Esto ofrece no sólo la capacidad de recuperar los datos calculados, también nos brinda la oportunidad de manipularlos a nuestro antojo para generar los reportes que más le convenga a cada usuario del sistema.

La figura 43 muestra la hoja uno del libro generado como reporte del sistema. Se debe notar que el libro posee cuatro diferentes hojas donde se condensan todos los resultados obtenidos.

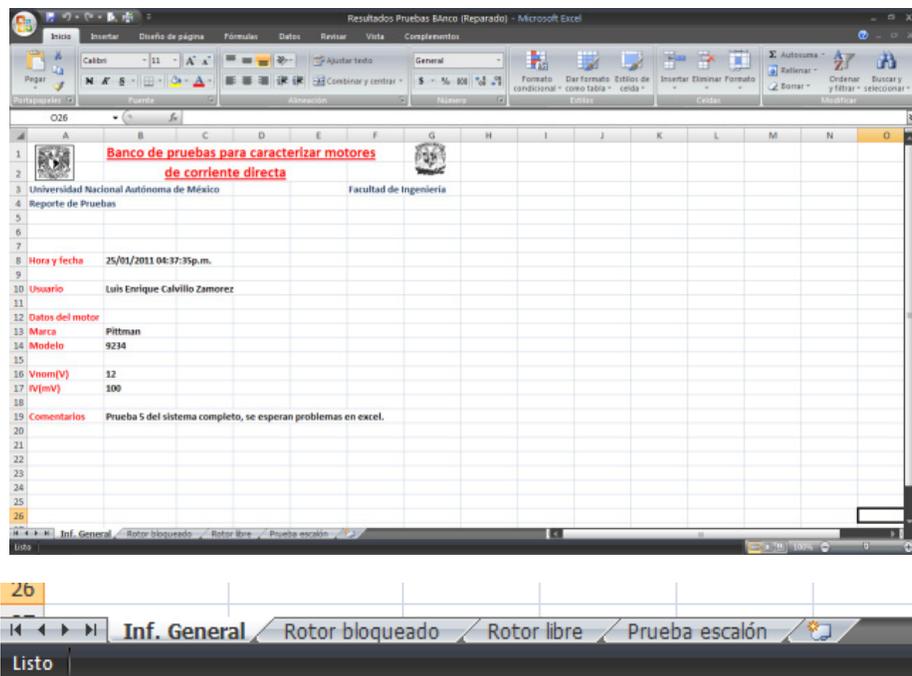
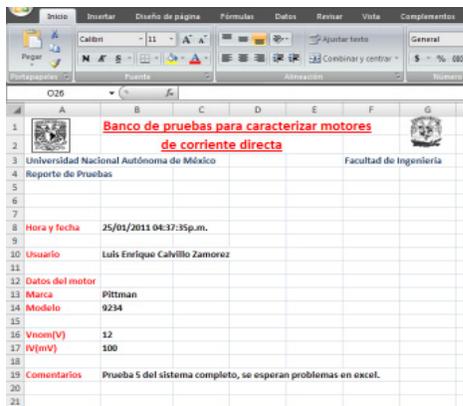


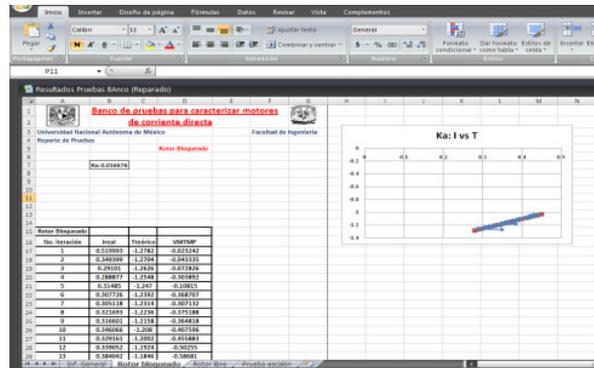
Figura 43. Hoja uno del reporte de pruebas en Excel.

Cada hoja del libro generado como reporte es capaz de contener las constantes calculadas en cada prueba, una tabla de datos y las graficas de las pruebas. La figura 44 nos muestra una vista general de las diferentes hojas del libro de reporte.

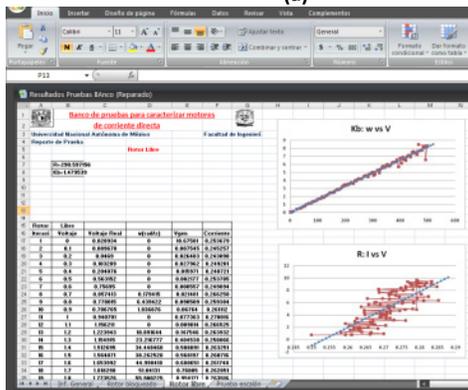
El archivo de Excel que se genera al guardar los datos no tiene una ubicación fija en la unidad de almacenamiento de la computadora, el usuario debe recordar que antes de cerrar el archivo de Excel, se debe guardar dicho archivo o se perderán los datos.



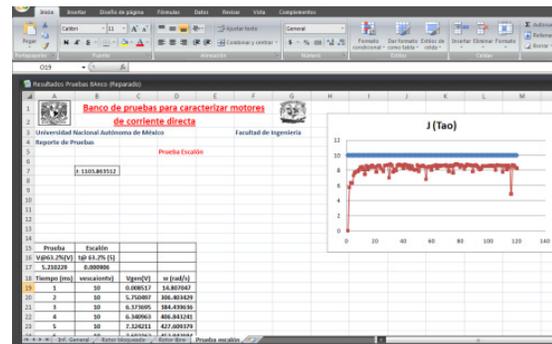
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 44. Vista general de las cuatro hojas de resultados del sistema. Datos generales de la prueba (a), Prueba ha rotor bloqueado (b), Prueba a rotor libre (c), Prueba escalón (d).

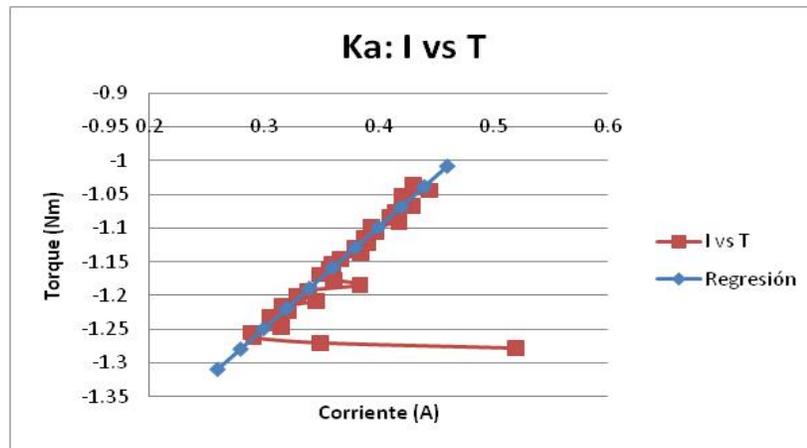
En el Apéndice D se puede observar un archivo completo de Excel, generado por el sistema de caracterización.

4.5 Gráficas y valores obtenidos.

Las graficas mostradas, así como los valores, son los más representativos que se ha obtenido de las pruebas del sistema. Los valores obtenidos no se repitieron exactamente iguales en todas las pruebas realizadas, es decir, el sistema no tiene un índice de 100% en la repetibilidad de sus resultados.

Rotor Bloqueado

Esta prueba nos señala el valor de K_a , constante que señala la relación entre la corriente y el torque del motor. Esta es una relación lineal estimada por medio de una regresión lineal. La grafica 5 muestra el resultado obtenido al realizar la prueba con el sistema.



Gráfica 5. Resultado de la prueba a rotor bloqueado.

Después de realizadas varias pruebas del sistema, se obtuvo que la moda de esta constante es de

$$MoK_s = 0.016723 [Nm/A]$$

En la prueba mostrada en la gráfica 5, la constante tiene el valor de:

$$K_a = 0.016676 [Nm/A]$$

Emplearemos estos valores para observar la repetibilidad que el sistema ofrece en el cálculo de la constante K_a

$$EA = |ValorReal - ValorObtenido|$$

$$\%ER = \frac{EA}{ValorReal} * 100\%$$

$$EA_{MoKa} = |0.016723 - 0.016676| = 0.000047 [N m/A]$$

$$\%ER_{MoKa} = \frac{0.000047}{0.016723} * 100\% = 0.28\%$$

Al observar este dato, se observa que el valor obtenido con ayuda del sistema de caracterización de K_a , es prácticamente constante y no sufre variaciones significativas al realizar diversas pruebas.

Con esto queda establecido que el sistema es repetible al calcular K_a , ahora habrá de establecerse si el sistema es exacto en el cálculo de K_a . Para esto, utilizaremos los datos proporcionados por el fabricante del motor a caracterizar. (Products). El fabricante del motor muestra en su hoja de datos que el valor de dicha constante es de:

$$K_T = 0.0182 [Nm/A]$$

Empleado este dato y el de la moda de K_a obtenido por el sistema, se calculó el error relativo del sistema con respecto a los datos del fabricante.

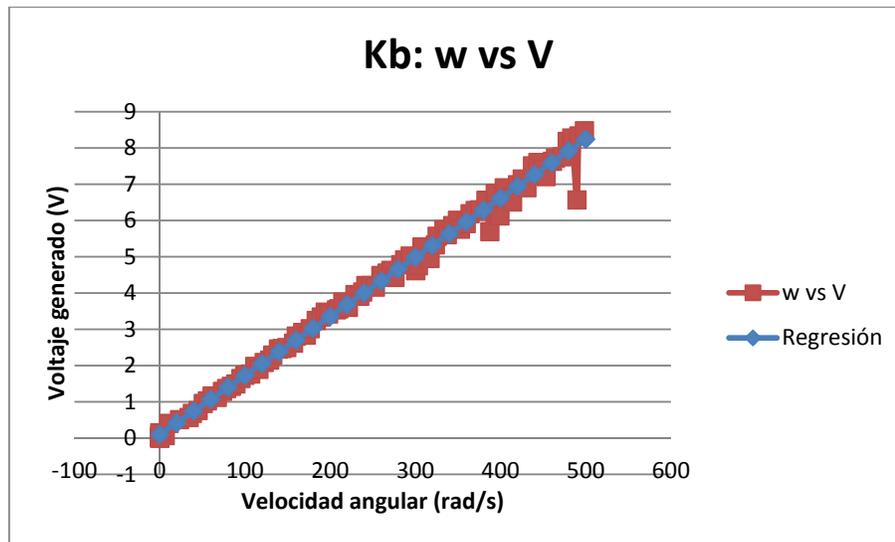
$$EA_{Ka} = |0.0182 - 0.016723| = 0.001477 [Nm/A]$$

$$\%ER_{Ka} = \frac{EA}{0.0182} * 100\% = \frac{0.001477}{0.0182} * 100\% = 8.11\%$$

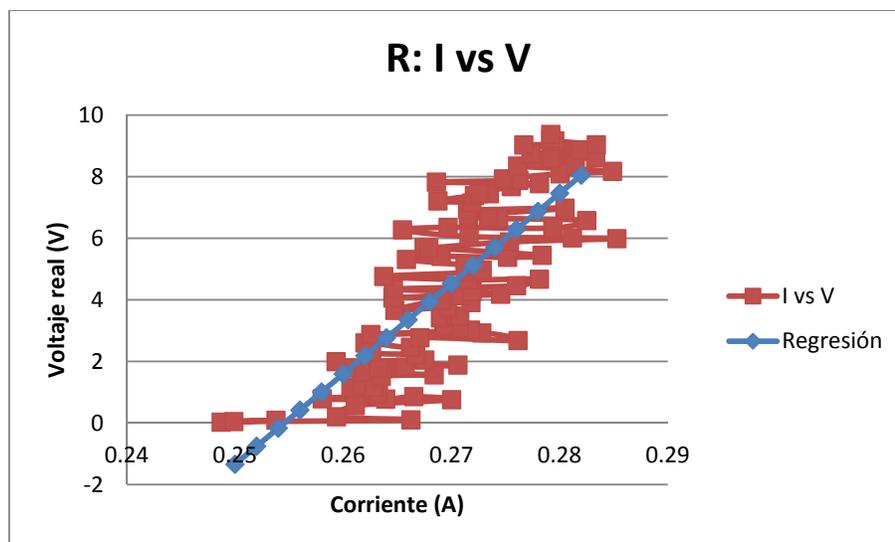
El error del sistema al calcular K_a con respecto a los datos del fabricante, tiene un porcentaje alto; con este porcentaje de error no se puede calcular una función de transferencia completamente fiable.

Rotor libre

El rotor libre nos muestra el valor de K_b , esta constante relaciona el valor de la velocidad angular del motor y la fuerza contra electro motriz; esta prueba también nos da el valor de R , la Resistencia de armadura del motor. Estas dos constantes son de comportamiento lineal obtenidas mediante regresión lineal. La grafica 6 muestra el resultado de la constante K_b mientras que la grafica 7 muestra el resultado del cálculo de la resistencia de armadura R .



Gráfica 6. Resultado de K_b por medio de la prueba a rotor libre.



Gráfica 7. Resultado de R por medio de la prueba a rotor libre.

Realizando un análisis similar para estas dos constantes, compararemos el error relativo obtenido en la prueba correspondiente a las gráficas mostradas, con la moda de los datos obtenidos en las pruebas hechas.

$$\mathbf{MoK_b=0.016792[V s/rad]}$$

$$\mathbf{MoR=296.47[\Omega]}$$

Los valores obtenidos en las pruebas fueron:

$$\mathbf{K_b= 0.016324[V s/rad]}$$

$$\mathbf{R=290.6[\Omega]}$$

Para K_b se tiene:

$$\mathbf{EA_{MoK_b} = |0.016792 - 0.016324| = 0.000468(V s/rad)}$$

$$\%ER_{MoK_b} = \frac{EA}{0.016792} * 100\% = \frac{0.000468}{0.016792} * 100\% = \mathbf{2.78\%}$$

El error obtenido en cada prueba realizada en el sistema, tiene un porcentaje bajo, esto señala que el sistema mantiene los valores obtenidos en cada prueba realizada sin que sufran variaciones significativas.

Para R tenemos lo siguiente:

$$\mathbf{EA_{MoR} = |296.47 - 290.6| = 5.87(\Omega)}$$

$$\%ER_{MoR} = \frac{EA}{296.47} * 100\% = \frac{5.87}{296.47} * 100\% = \mathbf{1.98\%}$$

El sistema al calcular la resistencia, no presenta grandes variantes entre prueba y prueba realizada. El sistema es capaz de repetir casi los mismos valores en cada prueba.

Nuevamente compararemos la moda de la constante K_b obtenida en las pruebas con el dato proporcionado por el fabricante, el valor de R no puede ser comparado de esta forma pues el fabricante no proporcionó este valor.

El valor de K_b dado por el fabricante es:

$$\mathbf{K_F=0.0182[V S/rad]}$$

Entonces, tenemos:

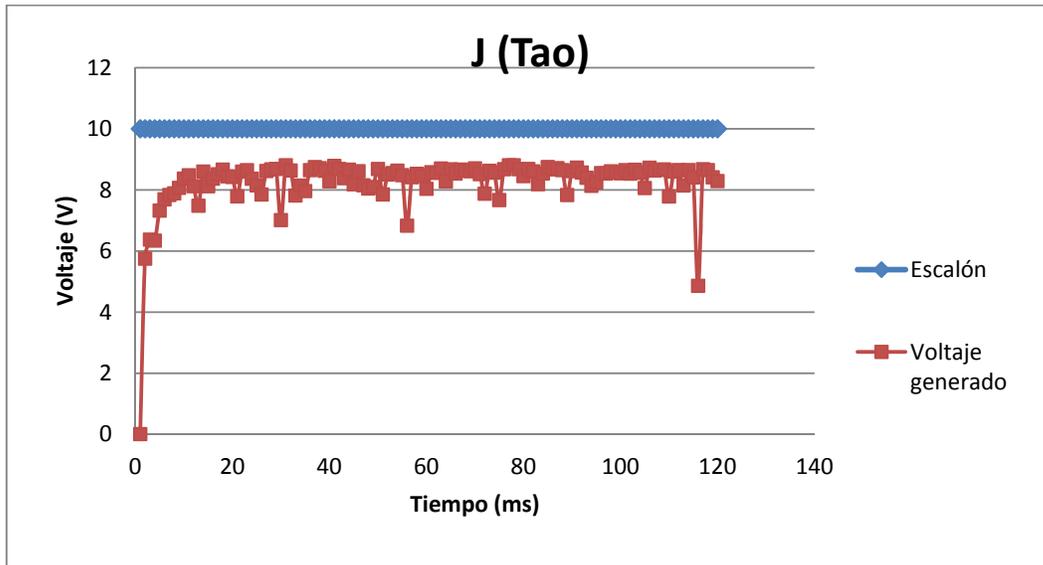
$$\mathbf{EA_{K_b} = |0.0182 - 0.016792| = 0.001408(V s/rad)}$$

$$\%ER_{K_b} = \frac{EA}{0.0182} * 100\% = \frac{0.001408}{0.0182} * 100\% = \mathbf{7.74\%}$$

Este error obtenido señala que el dato obtenido en el sistema no es suficiente para construir una función de transferencia completamente fiable.

Prueba escalón

La prueba escalón nos permite obtener el valor de la constante de tiempo del motor, τ , la cual es el tiempo que el motor tarda en alcanzar el 63.2% del valor final de la respuesta esperada. Con dicho valor se puede calcular el valor de la inercia del rotor, J . La gráfica 8 muestra el resultado obtenido de dicha prueba.



Gráfica 8. Resultado de la prueba escalón.

Los valores obtenidos de esta prueba son los siguientes:

$$\tau = 0.906 [ms]$$

$$J = 1.5442E-06 [Kg m^2]$$

Comparando estos valores con la moda de los datos obtenidos tenemos

$$Mo\tau = 0.908 [ms]$$

$$MoJ = 1.5354E-06 [Kg m^2]$$

Con estos datos calculamos el error relativo de t

$$EA_{Mo\tau} = |0.908 - 0.906| = 0.002 (ms)$$

$$\%ER_{Mo\tau} = \frac{EA}{0.908} * 100\% = \frac{0.002}{0.908} * 100\% = 0.22\%$$

La variación de la constante de tiempo obtenida en las diversas pruebas es bastante pequeña, el sistema tiene un alto índice de repetibilidad en el cálculo de esta constante del motor.

Para el valor de J , recordemos que J es una función de K_a , K_b y t , tenemos:

$$EA_{MoJ} = |(1.5354E - 06) - (1.5442E - 06)| = 0.0088E - 6 (Kg m^2)$$

$$\%ER_{MoJ} = \frac{EA}{1.5354E-06} * 100\% = \frac{0.0088E-6}{1.5354E-06} * 100\% = 0.57\%$$

El sistema no sufre de grandes variaciones al momento de calcular J, este resultado es consistente con el error observado en la repetibilidad de Ka, Kb y t, donde se observó que no varían mucho estos tres parámetros, por lo que J al ser parámetro de estas tres constantes, tampoco debería variar.

Comparamos ahora los datos otorgados por el fabricante con los obtenidos en la prueba escalón.

Para la constante de tiempo t se tiene:

$$EA_{\tau} = |0.76 - 0.908| = 0.148(\text{ms})$$

$$\%ER_{\tau} = \frac{EA}{0.76} * 100\% = \frac{0.148}{0.076} * 100\% = 19.47\%$$

Mientras que los errores para la constante de inercia son:

$$EA_J = |(4.2E - 0.6) - (1.5354E - 06)| = 2.6646E - 06(\text{Kg m}^2)$$

$$\%ER_J = \frac{EA}{4.2E-06} * 100\% = \frac{2.6646E-06}{4.2E-06} * 100\% = 63.44\%$$

Estos resultados presentan variaciones altas con respecto a los datos del fabricante.

4.6 Validación de los resultados

En los diferentes experimentos realizados, se varió el voltaje máximo de alimentación en ocasiones la prueba se realizaba en intervalos de 0-5[V] y en otras de 0-10[V]; es decir se tuvieron diversos intervalos de pruebas. Estas variaciones en el voltaje, no significaron algún cambio de consideración en los resultados obtenidos, comportamiento que se esperaba, pues al ser tendencias lineales, no importa la cantidad de puntos, todos ellos deben seguir el mismo comportamiento. Del mismo modo, el incremento de voltaje fue variado desde 10[mV] hasta 500[mV]; esta variación en el sistema representó un aumento o disminución de la exactitud del sistema. Mientras más pequeño era el incremento de voltaje, más exactos han sido los resultados. Habrá que mencionar que en una ocasión se programó un incremento de voltaje de 1[mV], la prueba tardó cerca de 150[min] en concluir y el resultado obtenido no era significativamente diferente al obtenido con un incremento de voltaje de 100[mV] y una prueba de 10[min]; este comportamiento muestra que la exactitud sí se ve afectada por los puntos de prueba que existan, pero existe un momento donde el incremento o decremento de estos puntos no es una variación significativa de los resultados.

Pese a estas variaciones el sistema mostró tener un alto índice de repetibilidad en los resultados obtenidos. En un instrumento de medición, esta puede ser la característica más importante, los instrumentos de medición difícilmente son exactos y con el tiempo pierden esa exactitud, pero si muestran valores altos de repetibilidad, el error obtenido siempre será el mismo; esto quiere decir que un sistema repetible puede ser calibrado para minimizar el error, teniendo la certeza que con una calibración bastaría para todas las pruebas a realizar.

Al analizar el error absoluto de los valores obtenidos en el sistema, con los valores proporcionados por el fabricante, vemos que existen errores desde el 2.7% hasta el 63.4%. Valores bastantes grandes de error, aquí cabría aclarar que el fabricante al proporcionar los datos del motor, no nos esta dando los valores específicos del motor que se utilizo, más bien es la moda de los valores de todo un lote de motores, por lo que no podemos tomar como verdad absoluta los valores marcados en la hoja de especificaciones del motor, pero si como una buena referencia. Tomando estos datos como referencia y con los porcentajes de error obtenidos, indudablemente el sistema no es exacto y la función de transferencia obtenida es incorrecta.

Sin embargo el sistema puede ser calibrado y dado su índice de repetibilidad, una vez que se calibren los valores obtenidos, la función de transferencia obtenida sería altamente confiable.

Es importante señalar que las posibles causas de la inexactitud del sistema son:

- Perturbaciones mecánicas al realizar las pruebas como que el cople, pese a que se manufacturo un nuevo cople con mayor precisión, tiene imperfecciones de manufactura y las flechas no quedan perfectamente ajustadas y balanceadas provocando vibraciones que afectan la medición de los parámetros del motor. También habría que considerar que los motores al estar en operación se calientan y esto varia el valor de su resistencia de armadura, este cambio debe ser mínimo, pero todo cambio afecta la exactitud del sistema
- Perturbaciones en el circuito, el circuito del sistema esta plagado de resistencias que tienen una tolerancia en su valor, lo que nos señala que difícilmente tienen el valor señalado en su código de colores, lo que indudablemente afecta las ecuaciones realizadas para el cálculo de ganancias y esto a su vez afectaría la lectura de las señales obtenidas. Por otro lado, el sensor de corriente empleado es un dispositivo demasiado sensible, 0.001[A] de acuerdo al fabricante, esta sensibilidad provoca que el más mínimo cambio de corriente en el MT se vea reflejado en los datos.
- Perturbaciones en la programación, el modulo de adquisición de datos no afecta los resultados obtenidos, pues su única función es capturar los datos, desplegarlos en pantalla y realizar algunas operaciones matemáticas básicas con ellos, por lo que los errores de exactitud del sistema son ajenos a este modulo.

Con estos puntos es importante señalar que el sistema ha conseguido caracterizar el motor con una exactitud no muy buena pero con un alto índice de repetibilidad.

Capítulo 5. Conclusiones

Lo más importante de todo trabajo o desarrollo, no sólo en ingeniería, sino en cualquier ámbito de la vida, es la capacidad de poder aprender y adquirir nuevas experiencias. Esta capacidad es la que nos brinda como personas, la capacidad de ser cada vez mejores y de no cometer viejos errores.

Después de concluido el diseño, manufactura, ensamble y pruebas de este sistema, es necesario escribir aquellas conclusiones del proyecto que se crean pertinentes, así como consideraciones y observaciones personales que a lo largo del presente trabajo no se han mencionado todavía.

Este capítulo es una reflexión completamente personal y no sólo está sujeto a los resultados mostrados en este reporte, también está influenciado por los conocimientos técnicos y humanos adquiridos en el estudio de la carrera y en la vida diaria.

5.1 La hipótesis.

Al terminar los experimentos, se puede decir que la hipótesis inicial es correcta. El sistema desarrollado ha sido capaz de brindar los datos necesarios para caracterizar un motor de corriente directa. Pese a que el sistema desarrollado no es del todo exacto, la idea de desarrollo mostrada indica que es posible desarrollar un sistema lo suficientemente preciso, repetible y exacto para caracterizar los motores. Habría que tener mucho cuidado en la manufactura de los componentes, tanto mecánicos como electrónicos, para que el sistema otorgue una función de transferencia funcional.

5.2 El diseño, manufactura y desarrollo

El diseño del sistema es bastante simple pero eficiente, el modulo de control es funcional y escalable. La parte electrónica del sistema requiere una fuente de alimentación más grande, pues la actual no es capaz de proveer la corriente necesaria para realizar a fondo las pruebas. El modulo mecánico es el que presenta más puntos a mejorar como la manufactura de las piezas, o el desarrollo de piezas mecánicas más eficientes.

Uno de estos puntos a mejorar es la sujeción de los motores a la base mecánica del sistema. Se pensaron ideas bastante universales como el chuk, pero no viables para el actual proyecto. En un futuro podría pensarse que en lugar de contar con diferentes barrenos o un chuk, posiblemente un conjunto de diferentes soportes.

Por otro lado, el cople desarrollado en este sistema tiene la finalidad de absorber las diferentes longitudes de los motores, sin embargo sería bastante bueno poder desarrollar un cople que también pudiera absorber posibles excentricidades de las flechas y vibraciones mecánicas al momento del funcionamiento de los motores. Este cople a desarrollar deberá buscar integrar lo mejor de los coples rígidos, los coples retractiles y los coples flexibles en uno sólo, lo que sin duda representa un buen desafío en diseño mecánico.

Por último, dado que el motor patrón es el freno del motor a caracterizar, y también determina las máximas características eléctricas en el sistema; el contar con dos o más motores patrones de diversas capacidades mecánicas y eléctricas, ampliaría la gama de motores que pueden ser caracterizados.

5.3 Los resultados

Al analizar los resultados se puede notar que el sistema no es completamente exacto, pero tiene bastante repetibilidad. Si bien los resultados obtenidos del sistema desarrollado no lo respaldan para hablar de un producto terminal, estos resultados son lo suficientemente aceptables para que digamos que tenemos un muy buen prototipo de un sistema de caracterización de motores de corriente directa tipo Shunt.

La constante de la inercia del motor mostro una variación realmente grande con respecto a la proporcionada por el fabricante. Esta variación se puede deber a dos circunstancias. La primera es que el error de exactitud en las constantes K_a , K_b , R , t , a y b calculadas con el sistema sea suficiente para que el resultado de J sea muy diferente al correcto.

Los valores de K_a y K_b según el fabricante son numéricamente idénticos, el sistema arroja que estos valores son bastante similares, de hecho casi idénticos, lo que muestra que aunque puede que no sea exacto el sistema, el proceso de medición es correcto.

La corriente medida por el sensor se comparo en las pruebas con las lecturas de un multímetro y de un osciloscopio. Este sensor muestra un voltaje de salida proporcional a la corriente que circula por su circuito. El fabricante de este sensor pone a disposición una tabla que muestra el comportamiento del mismo. En las pruebas se pudo observar que este sensor no respetaba este comportamiento y fue necesario mediante diversas pruebas ajustar la ecuación proporcionada por el fabricante. Este comportamiento atípico del sensor se puede deber a que el sensor no es nuevo, ya que fue imposible adquirirlo en la Republica Mexicana. Esto debe ser tomado en cuenta pues este componente del sistema ya muestra degradación en su interior y debe ser reemplazado.

Las graficas que se observaron como resultados de los experimentos, muestran una gran similitud con las graficas propuestas al inicio del planteamiento del problema, el sistema se comporto y respondió como era de esperarse. Habrá que decir que las graficas mostradas en el planteamiento teórico del problema, muestran una ordenada al origen con valor de cero.

Las graficas obtenidas de los experimentos no tienen una ordenada al origen con valor nulo, muestran ordenadas diferentes. Esto se debe a que el planteamiento teórico es ideal y los motores en la vida real muestran inercia, llegan a almacenar voltaje por su embobinado, los cojinetes provocan que la rotación de la flecha no sea como el fabricante lo prevé; estos factores implican que las graficas de las regresiones lineales no se comporten de forma ideal.

5.4 El futuro del sistema

El sistema desarrollado dista de ser un producto completo para la caracterización de motores de corriente directa. Pero cuenta con las bases necesarias para perfeccionar sus elementos y convertirse en un verdadero producto para este fin.

Se debe simplificar el diseño en todos los aspectos, mecánicamente es necesario conseguir ese bastidor universal, donde el cople sea la pieza que pueda unir los motores, absorber las vibraciones y proporcionar ese elemento de universalización de motores.

El sistema electrónico requiere un cambio en sus elementos, pues por ahora algunos de ellos están pensados para potencias eléctricas adecuadas al motor utilizado como patrón, pero si se desea la universalidad del sistema, este circuito debe ser capaz de soportar potencias más grandes. Así mismo podría considerarse la opción de reemplazar algunos componentes por otros de mayores capacidades y que cumplan las tareas deseadas.

El sistema de control y adquisición de datos es un programa basado en un lenguaje grafico, como cualquier programa siempre se puede depurar y hacerla más pequeño a fin de que consuma menos recursos en la computadora. El programa cual requiere una depuración, pues como a lo largo del desarrollo del proyecto, fueron mejorando las habilidades de programación en este lenguaje, los primeros códigos son largos y muestran redundancias o elementos innecesarios.

La generación de reportes en Excel es un elemento de gran valor en el sistema, sin embargo no se ha conseguido que las tablas al ser transcritas de la pantalla de la computadora a Excel,

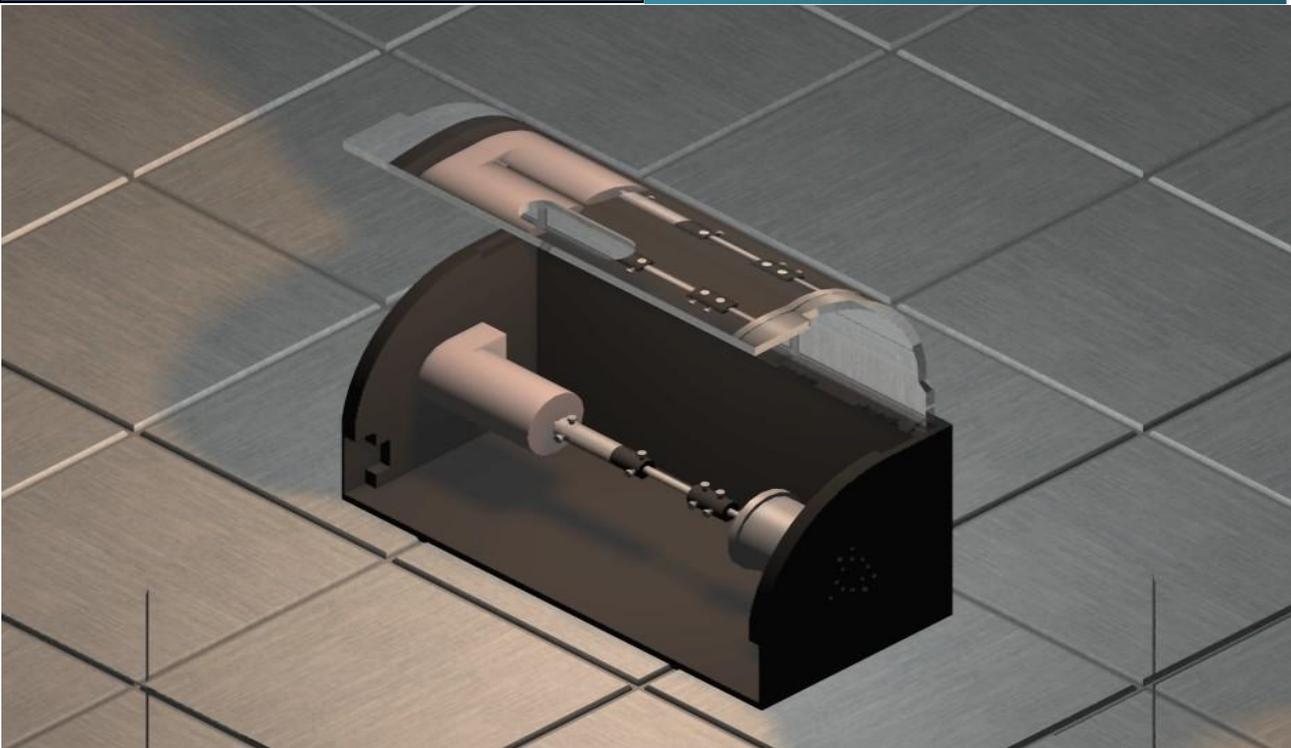
tengan el formato deseado por el usuario, o que las graficas mostradas en LabVIEW, tengan en Excel el formato que el usuario requiere. Estos detalles se deben corregir si se quiere que el programa sea tan funcional que baste con encenderlo y luego imprimir los resultados.

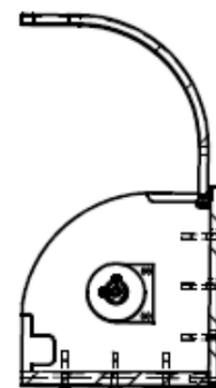
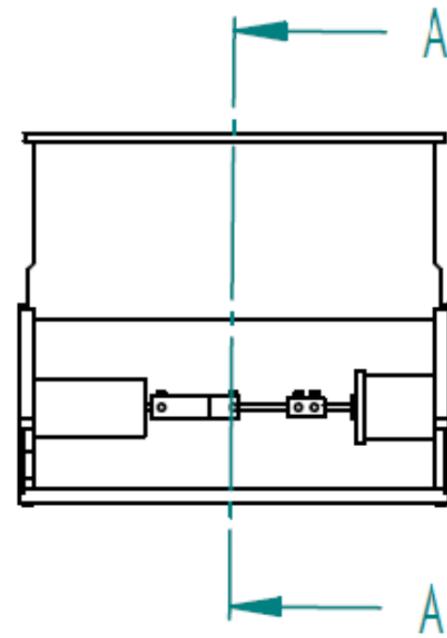
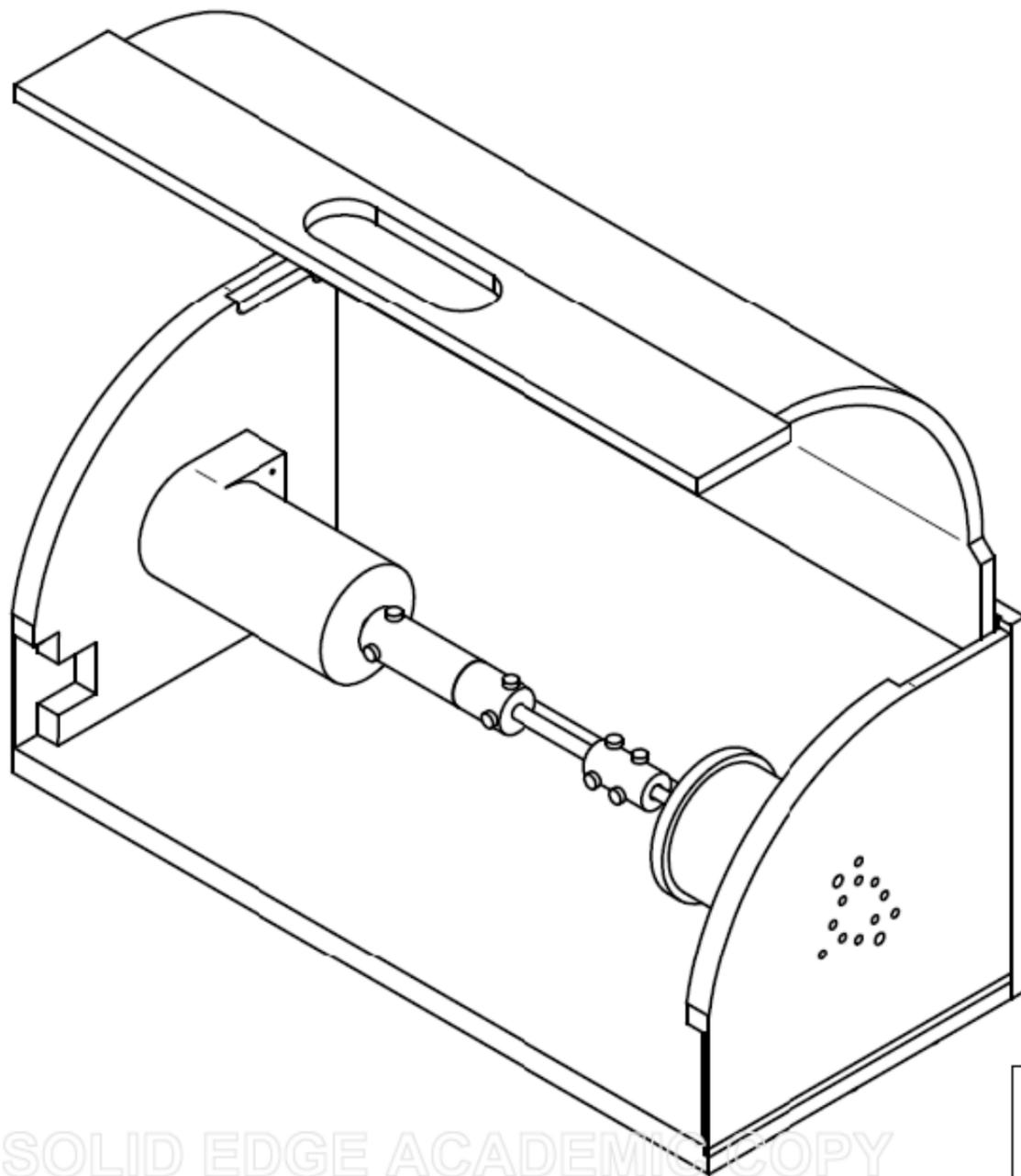
Si bien el sistema desarrollado no es un producto terminal, y esta muy lejos de poder ser lanzado al mercado, ofrece una amplia base para implementar en poco tiempo un sistema de caracterización de motores que cumpla cabalmente las expectativas planteadas. El sistema actual tiene un gran futuro, es cuestión de analizar las fallas que tiene el prototipo actual para mejorarlas y potenciar las cualidades y virtudes que este mismo prototipo tiene.

A

Apéndice

Planos Mecánicos

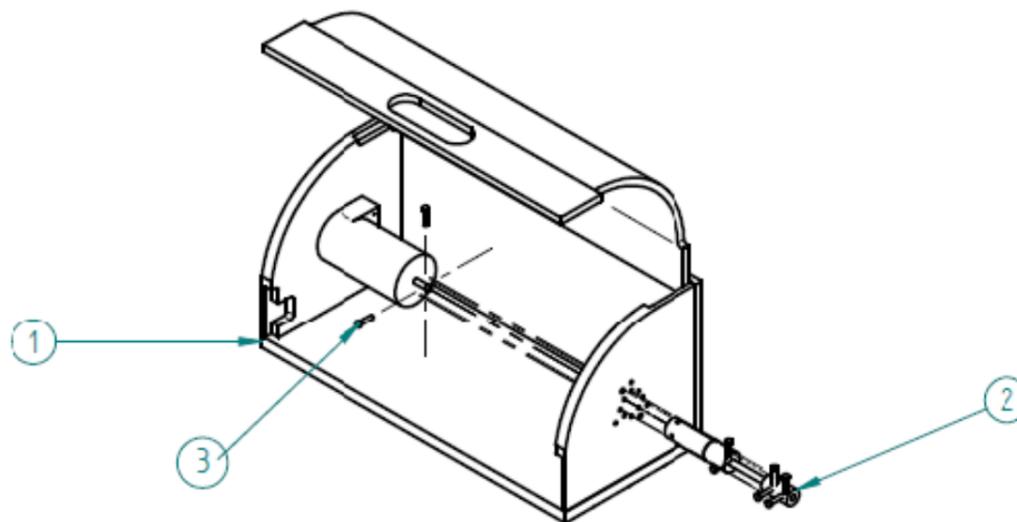




SECTION A-A

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

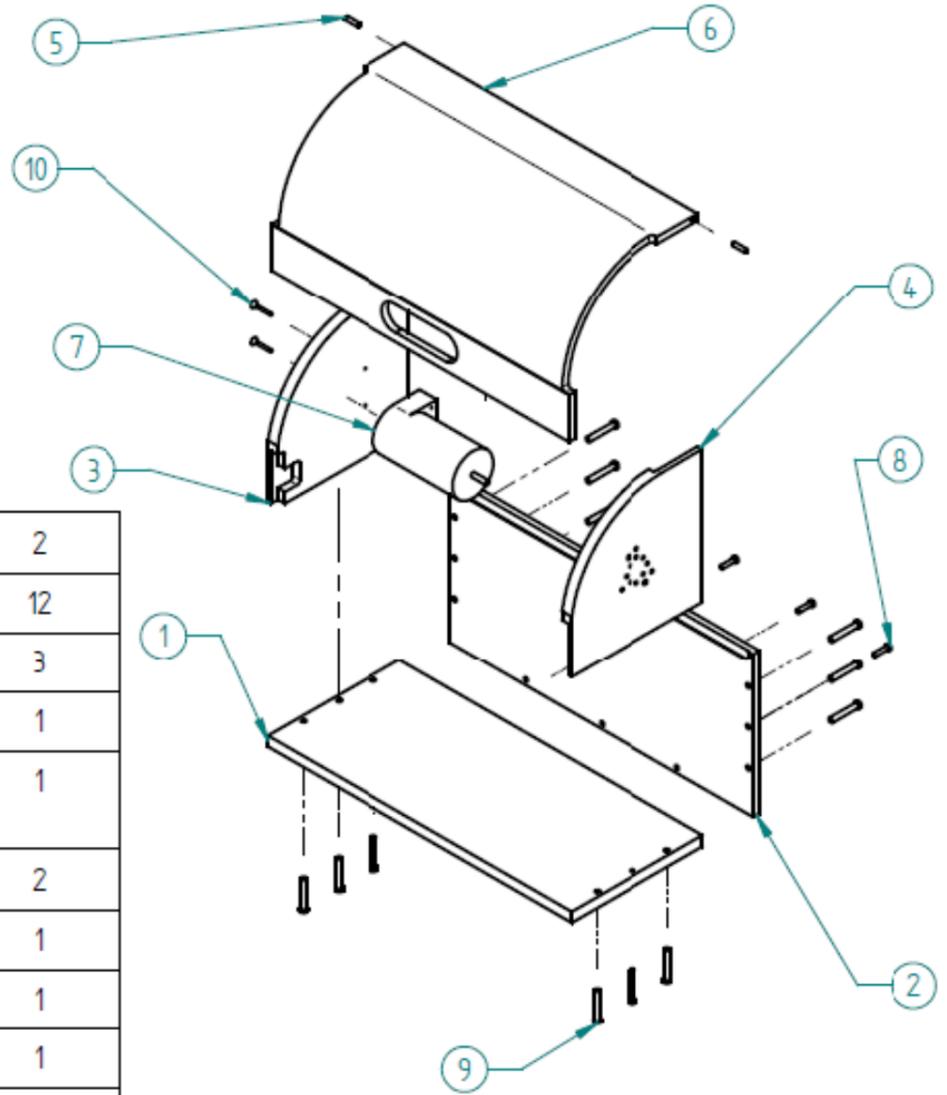
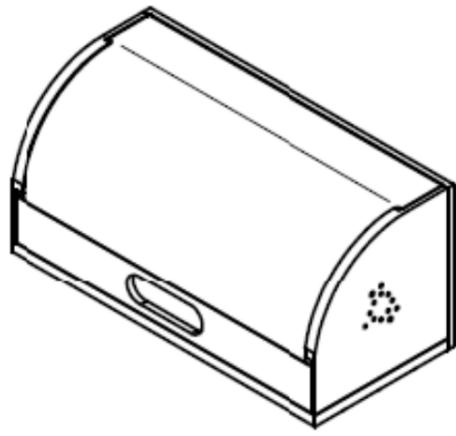
	Departamento de Ingeniería Mecatrónica	Rev:	Escala: 1:5
	Diseño Mecatrónico	Fecha: 03/09/09	Acot: mm[in]
	TÍTULO:	Dibujó: LECZ.	Cantidad: 1
	Arreglo general	Revisó: HMA.	Material:
		Aprobó:	Varios
		Dib. No.: BP-AG-500-A	



3	BCM-AG-501-A	Tornillo #8-32UNCx12.7[1/2]	Comercial	2
2	BCM-EC-500-A	Ensamble del cople	Varios	1
1	BCM-EB-500-A	Ensamble del bastidor	Varios	1
No. Item	No. Plano	Título	Material	Cantidad

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

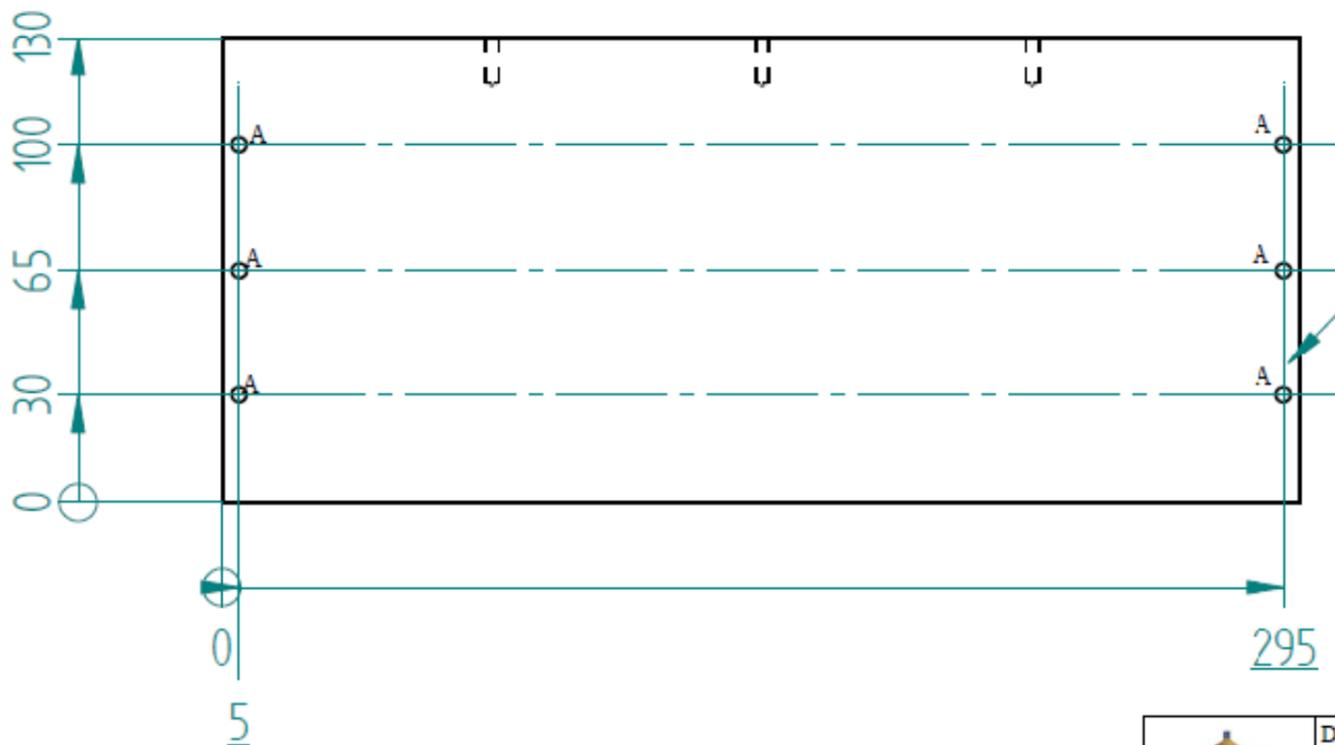
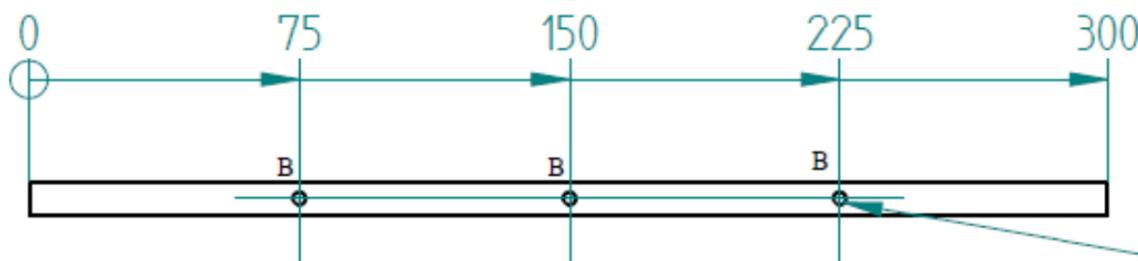
	Departamento de Ingeniería Mecatrónica	Rev:	Escala: 1:10
	Diseño Mecatrónico	Fecha: 03/09/09	Acot: mm[in]
	TÍTULO:	Dibujó: LECZ.	Cantidad: 1
	Explosivo general	Revisó: HMA.	Material:
		Aprobó:	Varios
		Dib. No.: BPEG-500-B	



10	BCM-EB-510-A	Tornillo avellanado 0.06"	Comercial	2
9	BCM-EB-509-A	Tornillo #8-32UNCx25.4[1]	Comercial	12
8	BCM-EB-508-A	Tornillo #5-40UNCx12.7[1/2]	Comercial	3
7	BCM-EB-507-A	Motor con encoder	Comercial	1
6	BCM-EB-506-A	Tapa del banco	Acrilico	1
5	BCM-EB-505-A	Perno para la tapa	Aluminio	2
4	BCM-EB-504-A	Base del motor	Aluminio	1
3	BCM-EB-503-A	Base del encoder	Aluminio	1
2	BCM-EB-502-A	Solera trasera	Aluminio	1
1	BCM-EB-501-A	Base del banco	Aluminio	1
No. Item	No. Planc	Título	Material	Cantidad

	Departamento de Ingeniería Mecatrónica	Rev:	Escala: 1:5
	Diseño Mecatrónico	Fecha: 03/09/09	Acot: mm[10]
	TÍTULO:	Dibujó: LECZ.	Cantidad: 1
	Explosivo del Bastidor	Revisó: HMA.	Material: Varios
	ANSI A	Aprobó:	Dib. No. BCM-EB-500-A

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



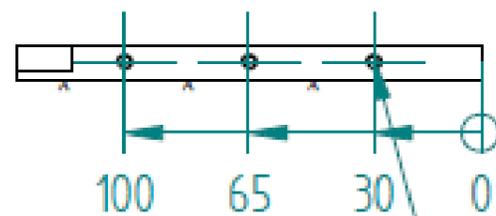
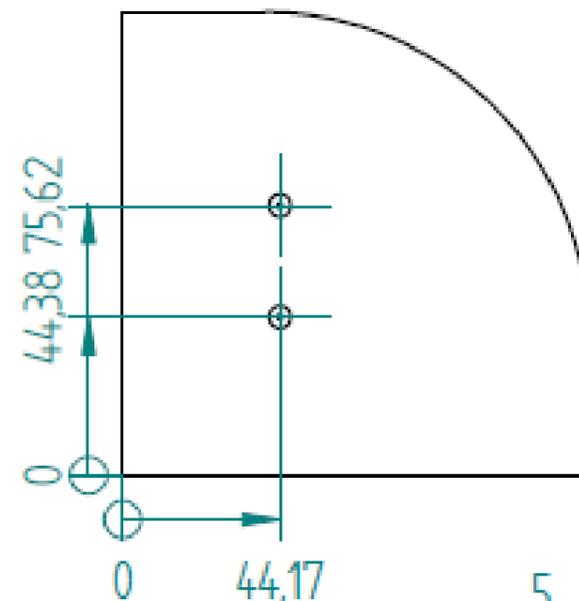
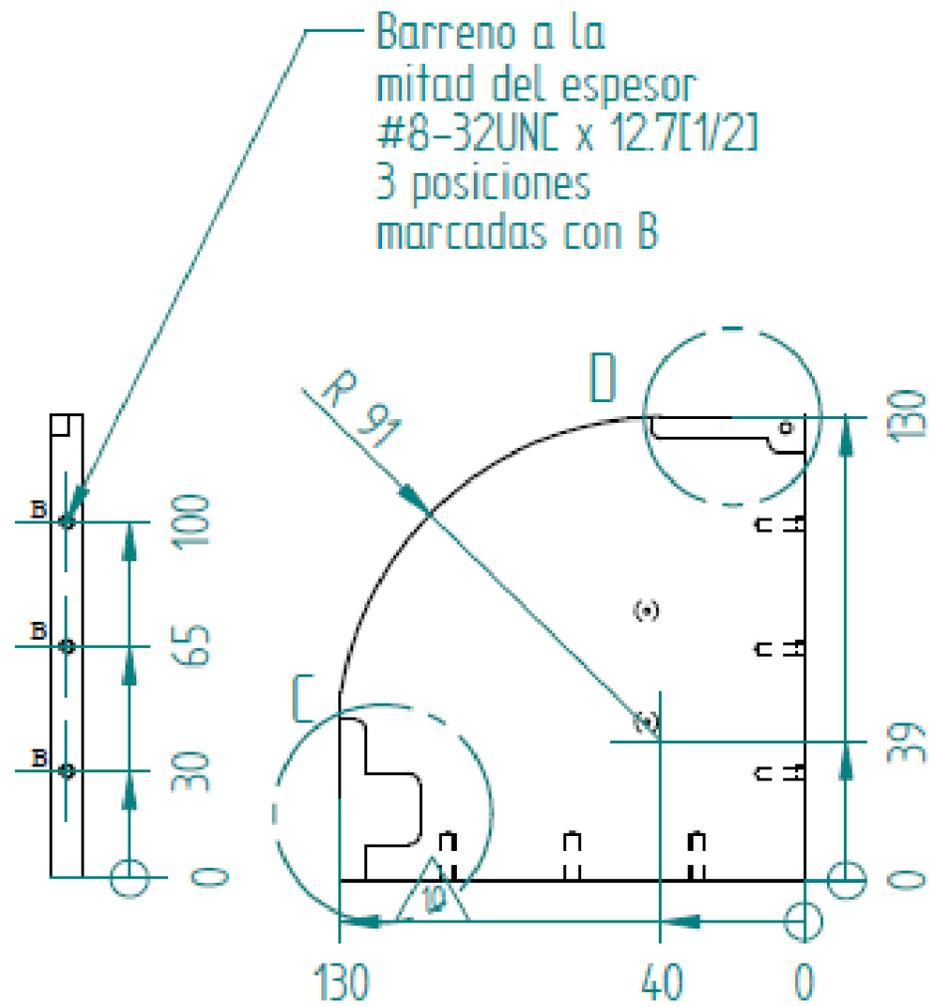
Barreno a la mitad del espesor #8-32UNC x 12.7[1/2] 3 posiciones marcadas con B

Barreno pasado ϕ 4[5/32] 6 posiciones marcadas con A

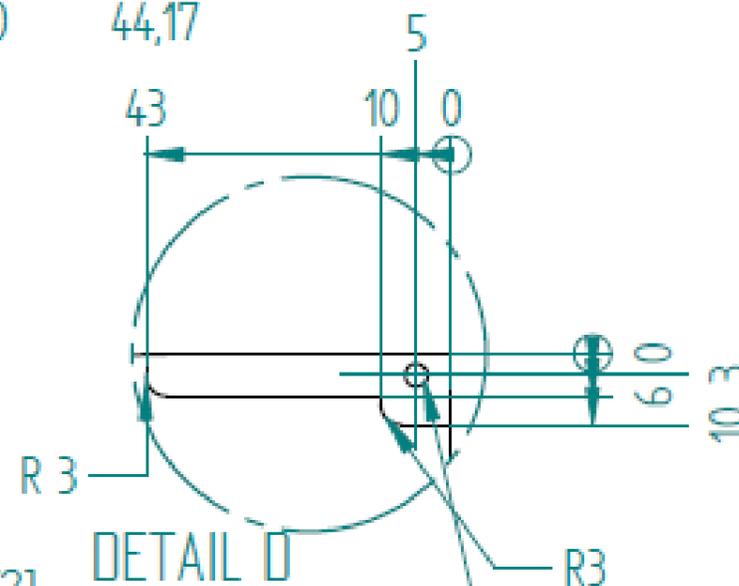
Espesor: 9.52[3/8]

	Departamento de Ingeniería Mecatrónica	Rev:	Escala: 1:2
	Diseño Mecatrónico	Fecha: 03/09/09	Acot: mm[10]
	TÍTULO:	Dibujó: LECZ.	Cantidad: 1
	Base del banco	Revisó: HMA.	Material: Aluminio
	ANSI A	Aprobó:	Dib. No. BCM-EB-501-A

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

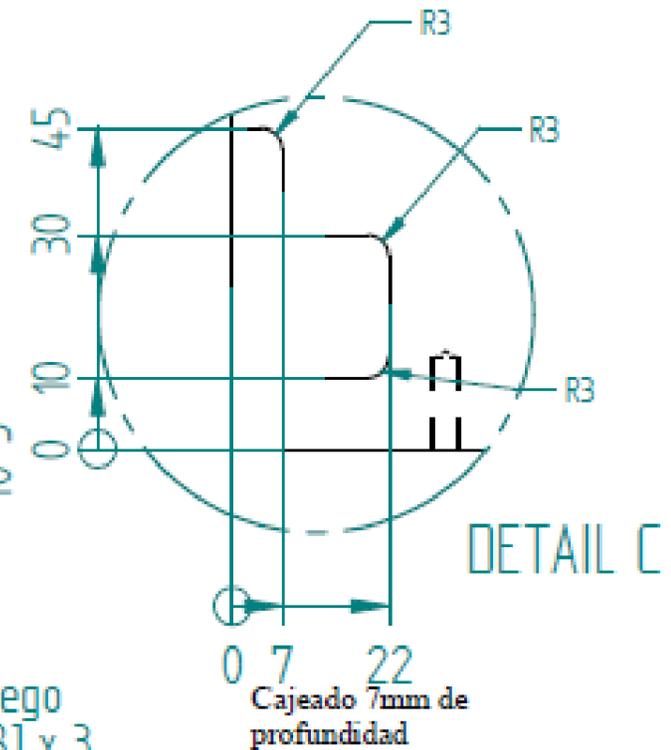


Barreno a la mitad del espesor #8-32UNC x 12.7[1/2] 3 posiciones marcadas con A

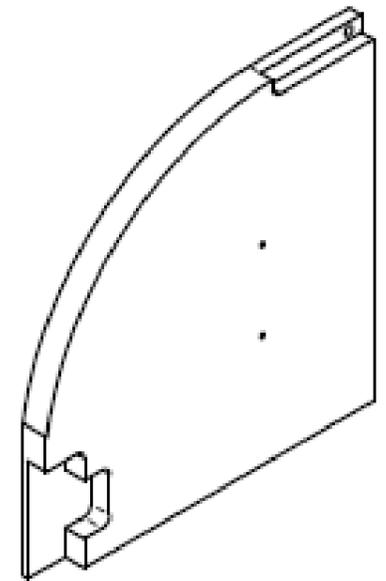


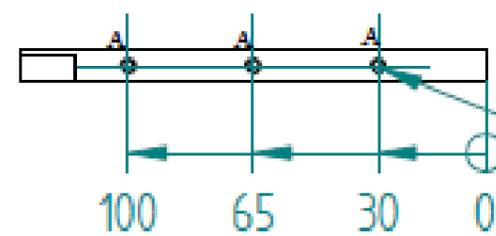
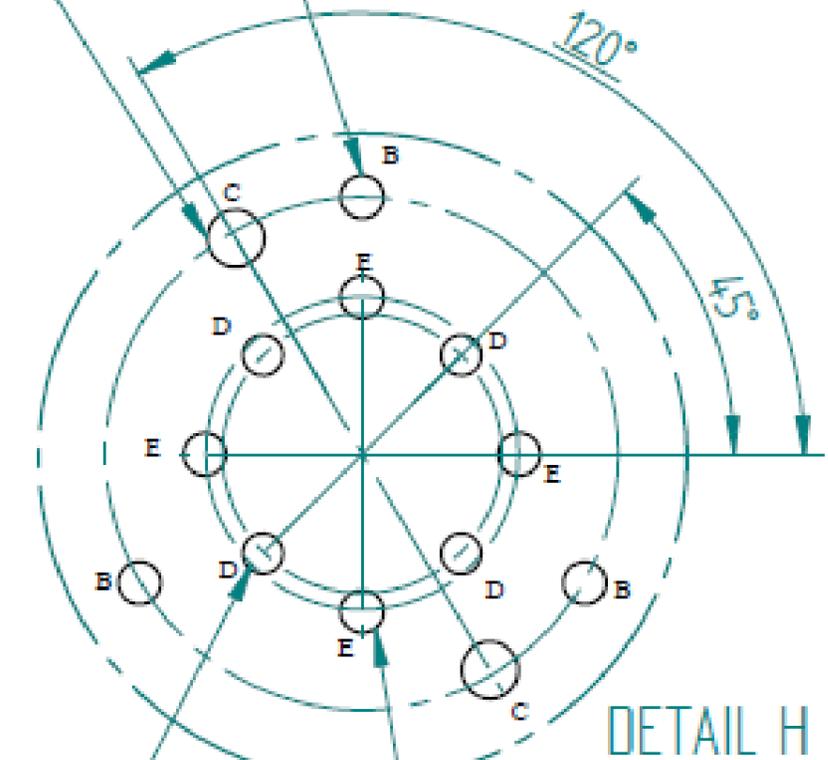
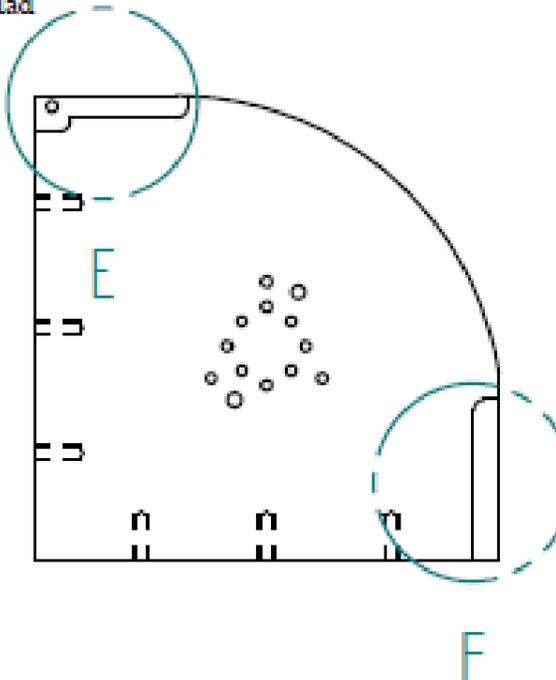
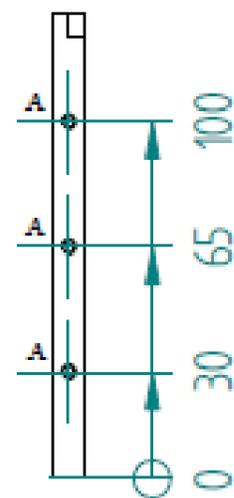
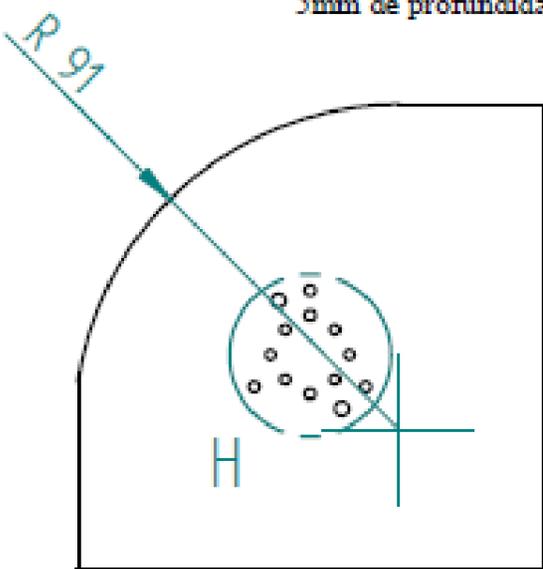
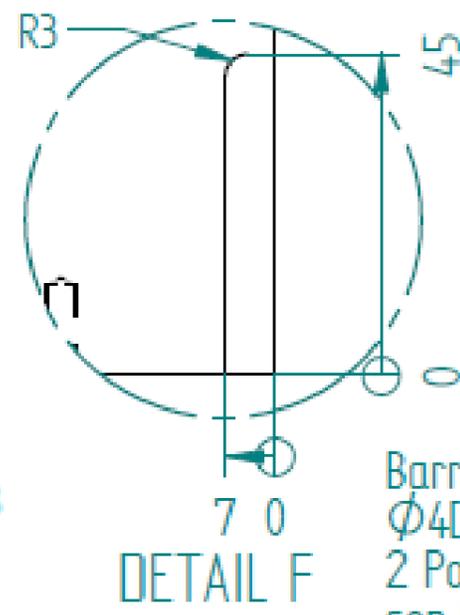
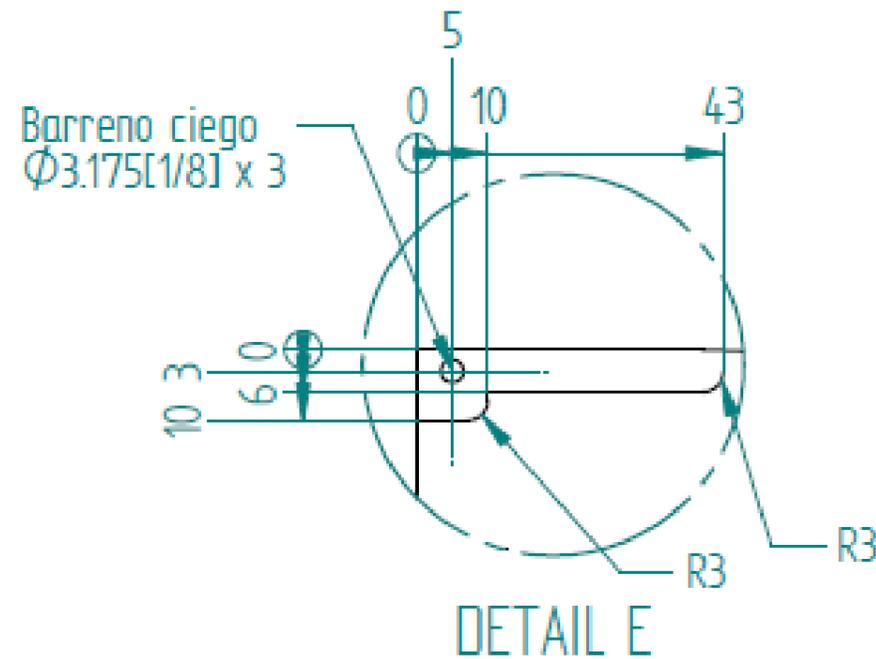
Cajeado de 5mm de profundidad

Barreno ciego $\Phi 3.175[1/8]$ x 3



Cajeado 7mm de profundidad





Barreno a la
 mitad del espesor
 $\# 8 - 32 \text{UNC} \times 12.7 [1/2]$
 6 Posiciones marcadas
 con A

Barreno pasado
 $\Phi 2.84 [7/64] @ \Phi 19.63$
 4 Posiciones marcadas
 con D

Barreno pasado
 $\Phi 3 [1/8] @ \Phi 22$
 4 Posiciones marcadas
 con E

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



Departamento de Ingeniería Mecatrónica
 Diseño Mecatrónico

TITULO:
 Base del motor

ANSI A

Rev: Escala: 1:3

Fecha: 29/06/09 Acot: $\frac{1}{2}$

Dibujo: LECZ. Cantidad: 1

Reviso: H.M.A. Material: Aluminio

Aprobo:

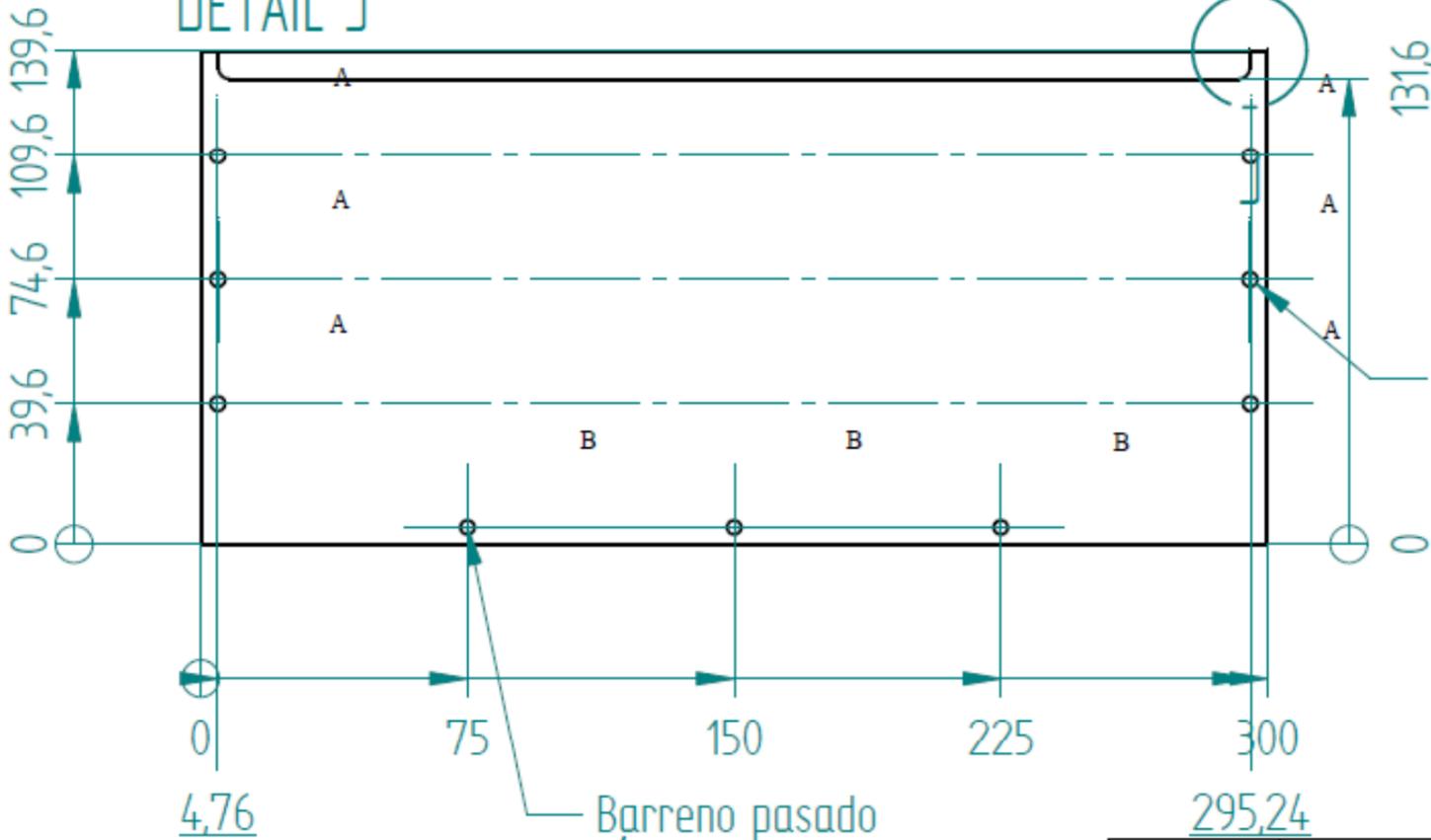
Dib. No.: DCM-123-204-A

Cajeado de 1mm de profundidad



R3

DETAIL J



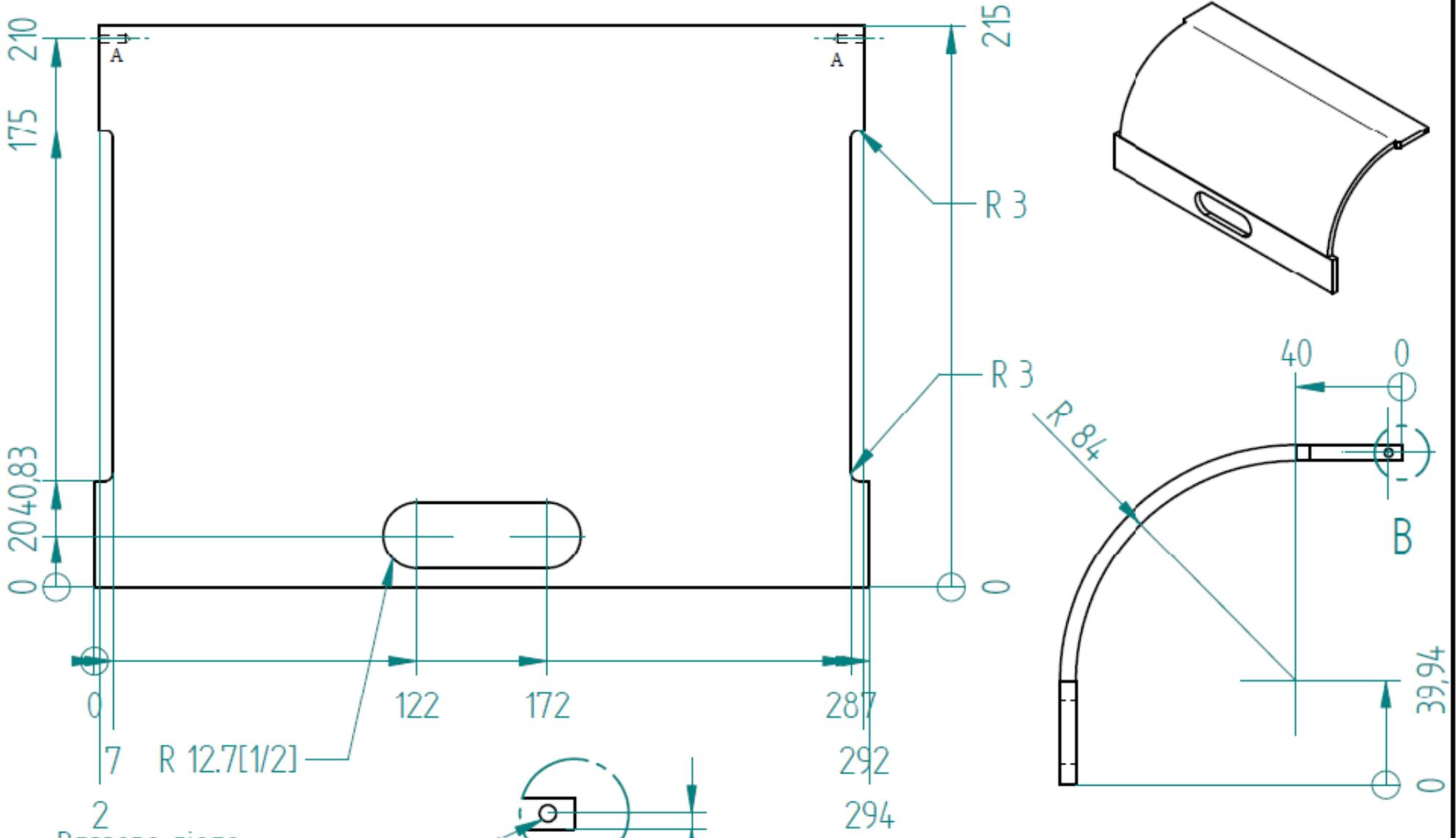
Barreno pasado $\Phi 4[5/32]$
6 posiciones marcadas con A

Barreno pasado $\Phi 3.175[1/8]$
3 posiciones marcadas con B

Espejar: 6.35[1/4]

	Departamento de Ingeniería Mecatrónica	Rev:	Escala: 1:2
	Diseño Mecatrónico	Fecha: 03/09/09	Acot: mm[in]
TÍTULO:		Dibujó: LECZ.	Cantidad: 1
Solera trasera		Revisó: HMA.	Material: Aluminio
		Aprobó:	Dib. No.: BCM-EB-302-A

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



Barreno ciego $\Phi 3.175[1/8"] \times 10\text{mm}$

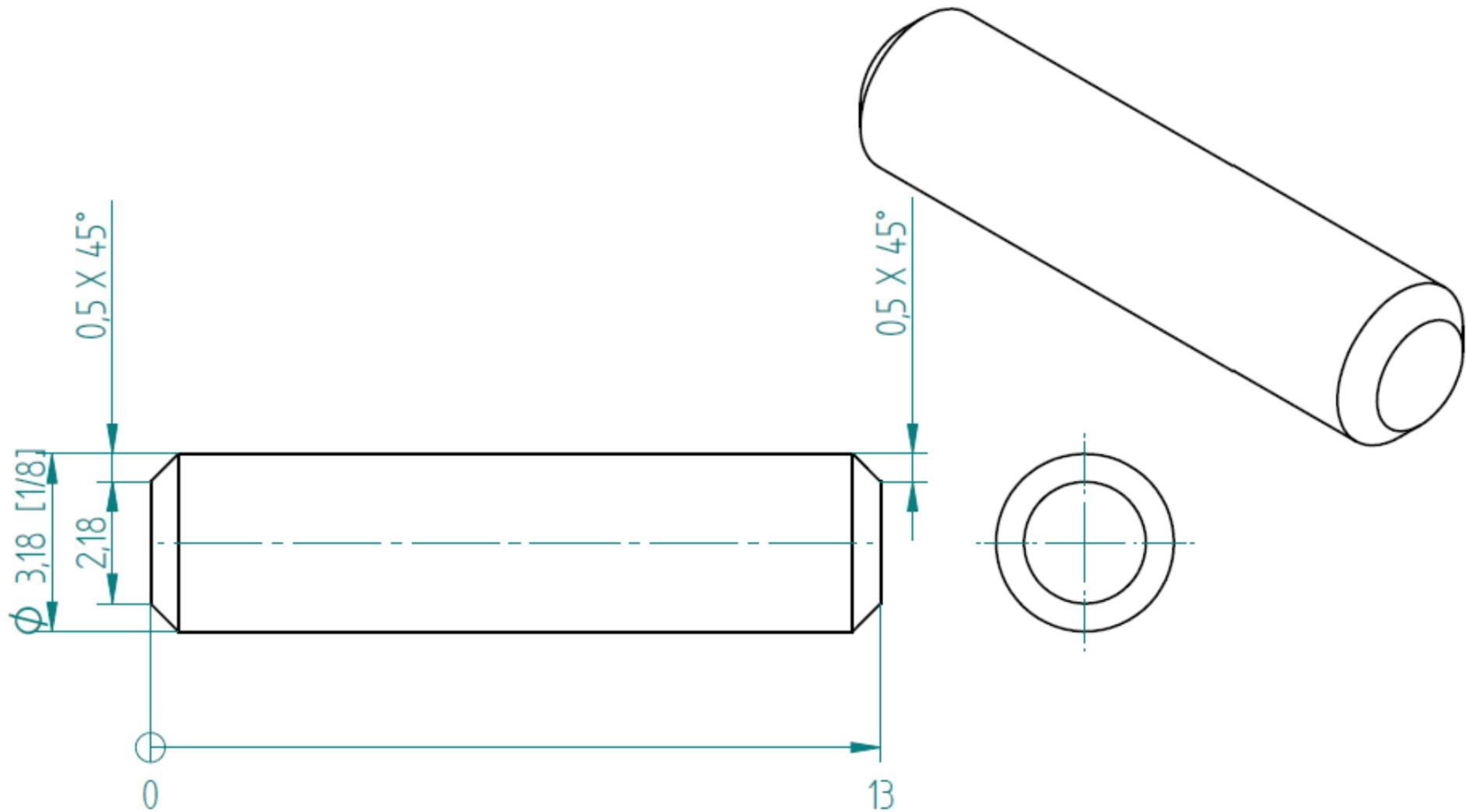
2 posiciones marcadas con A

DETAIL B

Espejar: 6mm

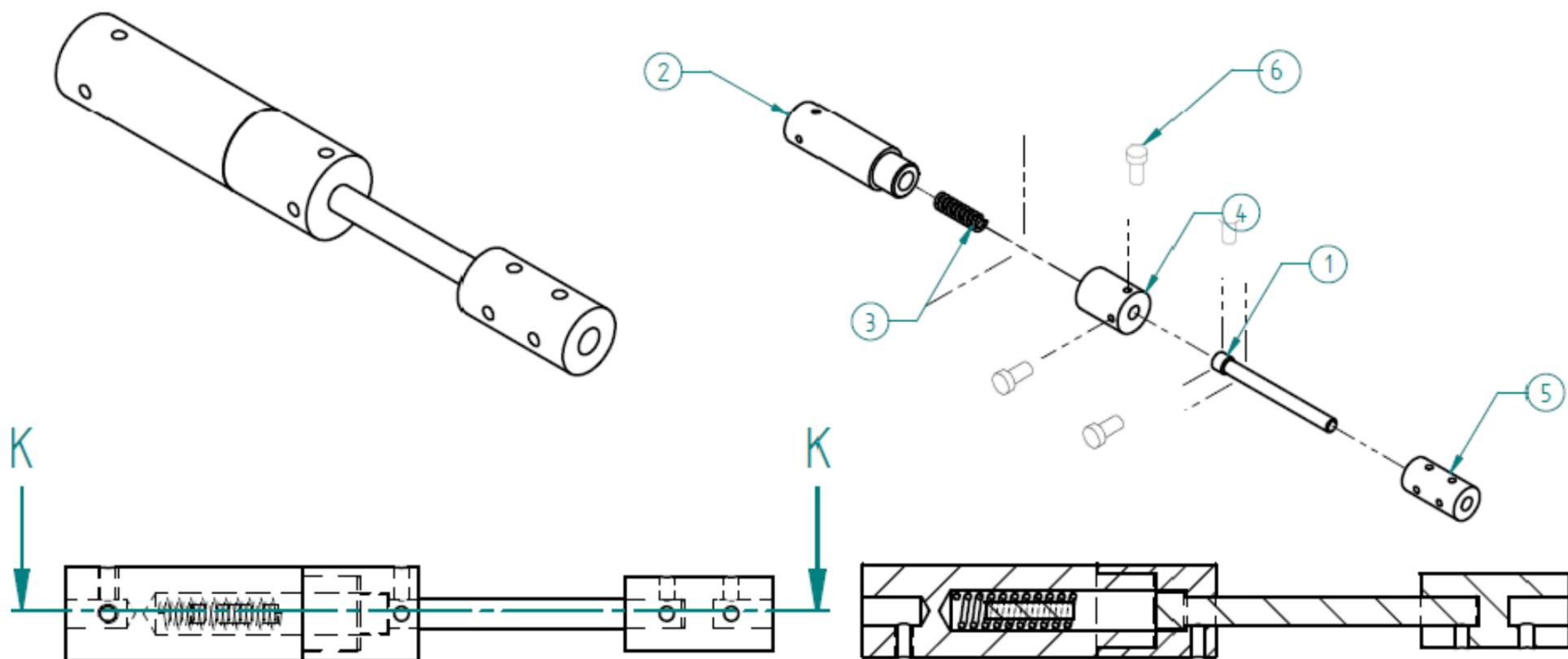
	Departamento de Ingeniería Mecatrónica	Rev:	Escala: 1:2
	Diseño Mecatrónico	Fecha: 03/09/09	Acot: mm[in]
TÍTULO:		Dibujó: LECZ.	Cantidad: 1
Tapa del banco		Revisó: HMA.	Material: Acilico
		Aprobó:	Dib. No.: BCM-EB-306-A

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

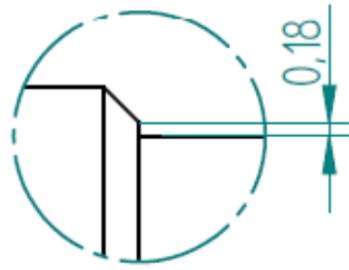
	Departamento de Ingeniería Mecatrónica Diseño Mecatrónico	Rev:	Escala: 10:1
	TÍTULO: Perno para la tapa	Fecha: 03/09/09	Acot: mm[in]
		Dibujó: LECZ.	Cantidad: 1
		Revisó: HMA.	Material: Aluminio
		Aprobó:	
		Dib. No.: BCM-EB-505-A	



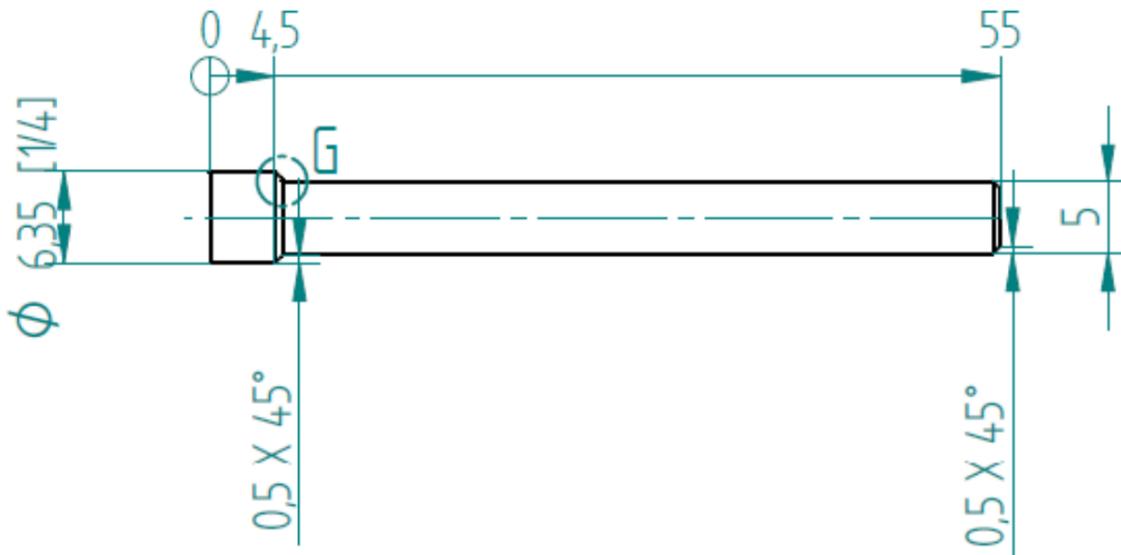
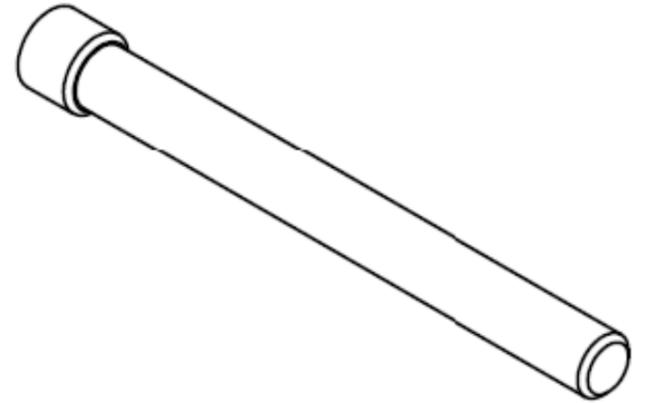
SECTION K-K

No. Item	No. Plano	Título	Material	Cantidad
6	BCM-EC-506-A	Tornillo #5-40UNCx12.7[1/2]	Comercial	6
5	BCM-EC-505-A	Prisionero intercambiable	Aluminio	1
4	BCM-EC-504-A	Tapa del cople	Aluminio	1
3	BCM-EC-503-A	Resorte del cople	Comercial	1
2	BCM-EC-502-A	Recamara del cople	Aluminio	1
1	BCM-EC-501-A	Embolo del cople	Aluminio	1

	Departamento de Ingeniería Mecatrónica Diseño Mecatrónico	Rev:	Escala: 1:2
	TÍTULO: Explosivo del cople	Fecha: 03/09/09	Acot: mm[in]
		Dibujó: LECZ.	Cantidad: 1
		Revisó: HMA.	Material: Aluminio
		Aprobó:	
		Dib. No.: BCM-EC-500-A	



DETAIL G



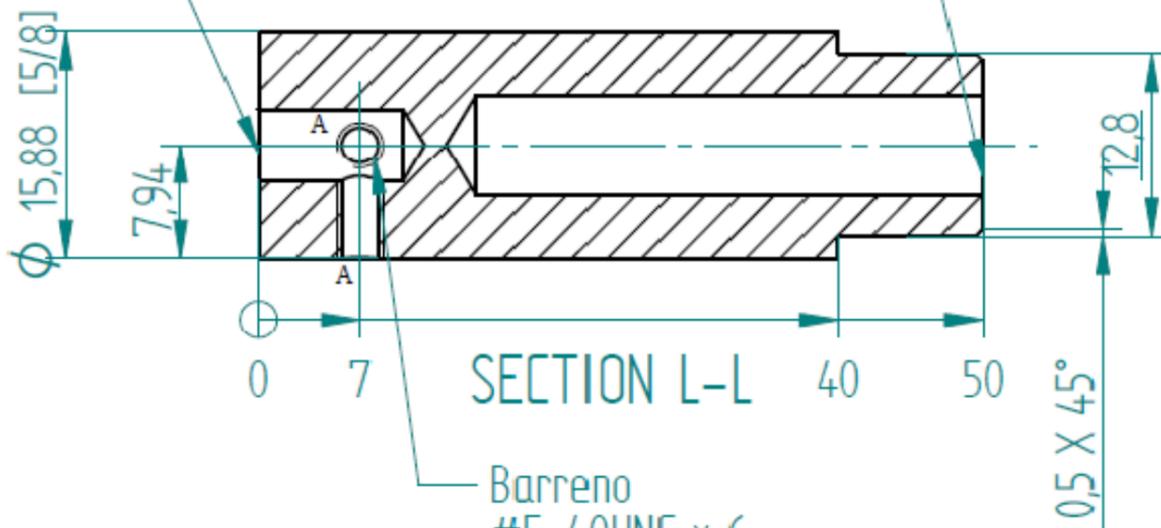
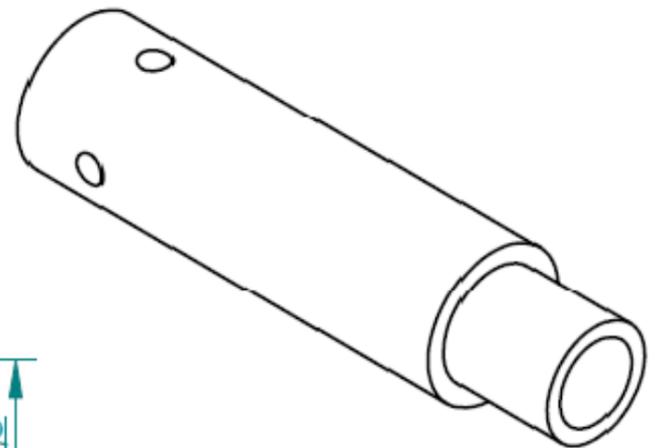
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	Departamento de Ingeniería Mecatrónica		Rev:	Escala: 2:1
	Diseño Mecatrónico		Fecha: 03/09/09	Acot: mm[in]
	TÍTULO:	 ANSI A	Dibujó: LBCZ.	Cantidad: 1
	Embolo del cople		Revisó: HMA.	Material: Aluminio
			Aprobó:	
	Dib. No.: BCM-EC-501-A			



Barreno ciego
Ø5 [13/64] x 10

Barreno ciego
Ø7 [9/32] x 35

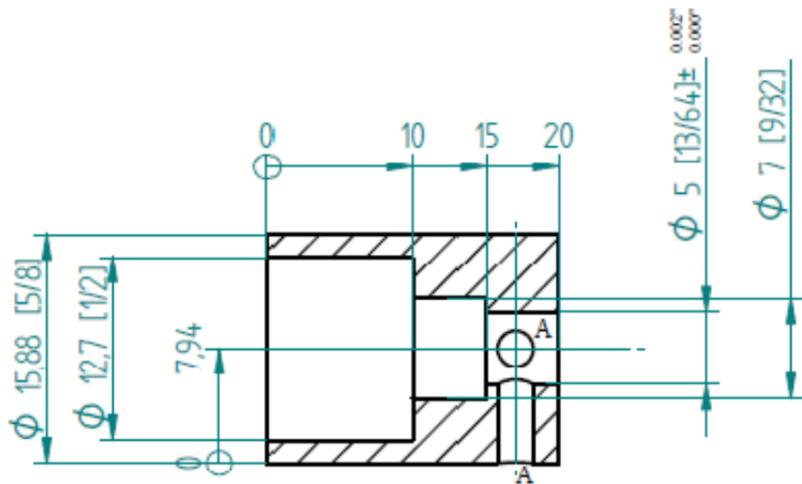


SECTION L-L

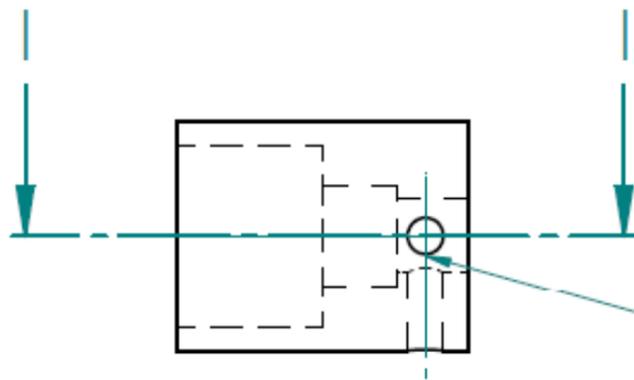
Barreno
#5-40UNC x 6
2 posiciones marcadas
con A

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

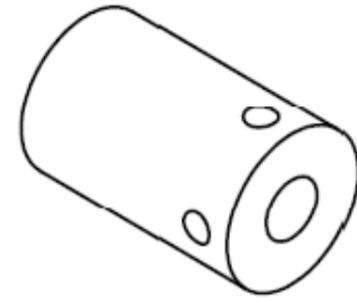
	Departamento de Ingeniería Mecatrónica		Rev:	Escala: 2:1
	Diseño Mecatrónico		Fecha: 03/09/09	Acot: mm[in]
	TÍTULO:	 ANSI A	Dibujó: LBCZ.	Cantidad: 1
	Recámara del cople		Revisó: HMA.	Material: Aluminio
			Aprobó:	
	Dib. No.: BCM-EC-502-A			



SECTION I-I

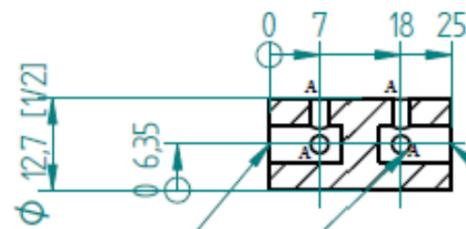


Barreno ciego
#5-40UNC x 6
2 posiciones
marcadas
con A



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	Departamento de Ingeniería Mecatrónica Diseño Mecatrónico	Rev:	Escala: 2:1
	TÍTULO:	Fecha: 03/09/09	Acot: mm[in]
	Tapa del cople	Dibujó: LECZ.	Cantidad: 1
	ANSI A	Revisó: HMA.	Material: Aluminio
		Aprobó:	Dib. No.: BCM-EC-504-A

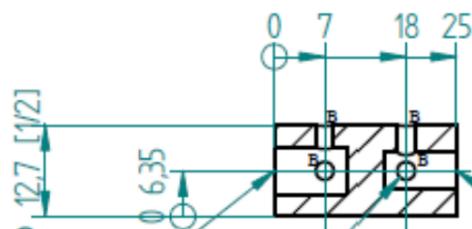
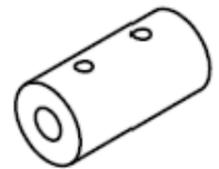
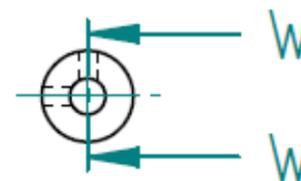


SECTION W-W

Barreno ciego
Φ5[13/64]
10mm profundidad

Barreno ciego
Φ5[13/64] ± 0.002
10mm profundidad

Barreno
#8-40UNC x 6
4 posiciones
marcadas con A

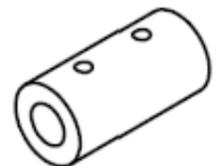
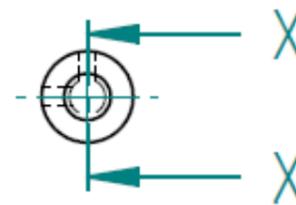


SECTION X-X

Barreno ciego
Φ6.5[1/4] ± 0.010
10mm de profundidad

Barreno ciego
Φ5[13/64] ± 0.002
10mm profundidad

Barreno
#8-40UNC x 6
4 posiciones
marcadas con B



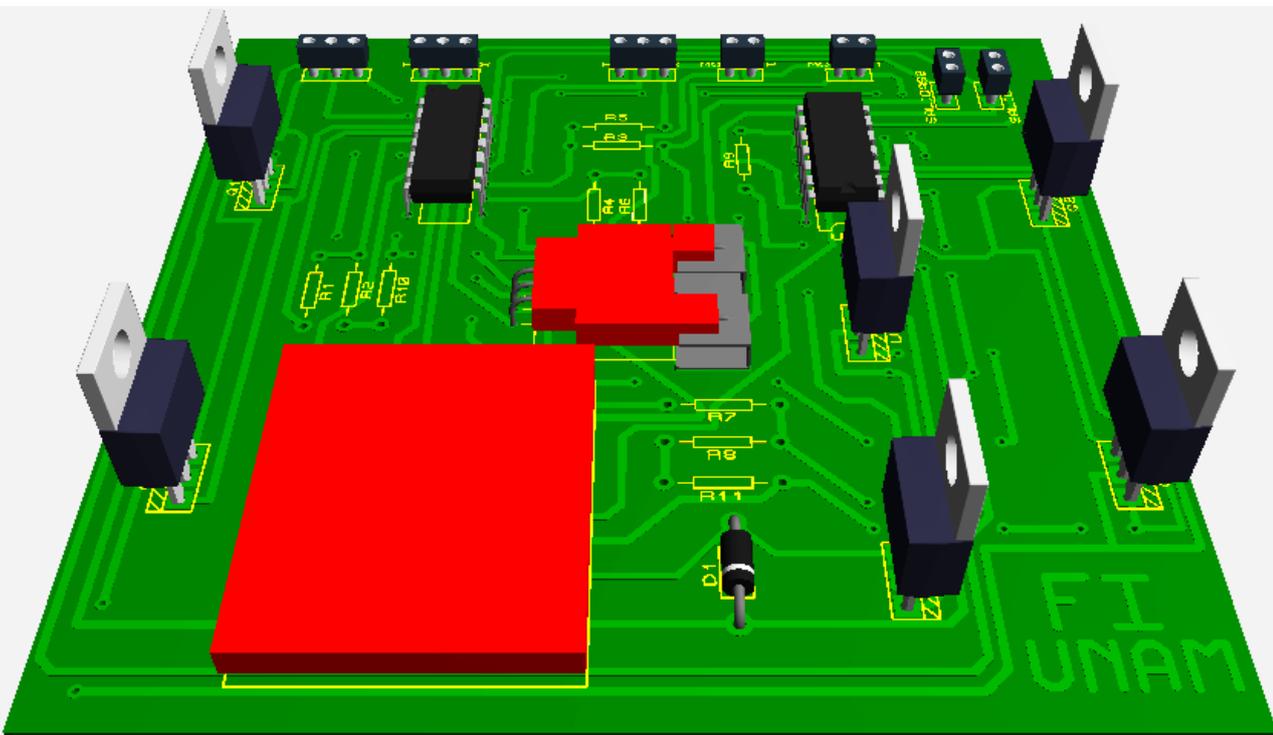
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

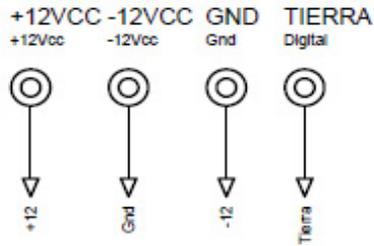
	Departamento de Ingeniería Mecatrónica Diseño Mecatrónico	Rev:	Escala: 1:1
	TÍTULO:	Fecha: 03/09/09	Acot: mm[in]
	Prisionero intercambiable	Dibujó: LECZ.	Cantidad: 1
	ANSI A	Revisó: HMA.	Material: Aluminio
		Aprobó:	Dib. No.: BCM-EC-505-A

B

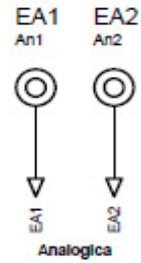
Apéndice

Planos
Electrónicos





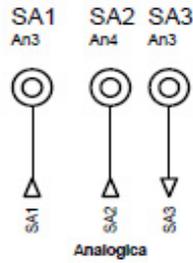
FUENTE



ENTRADAS



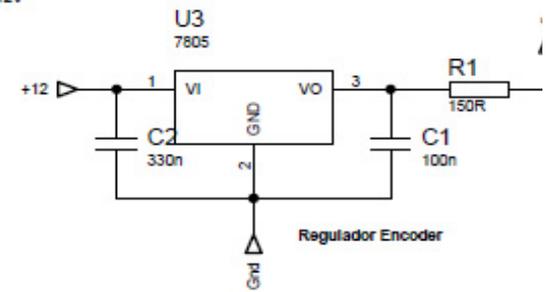
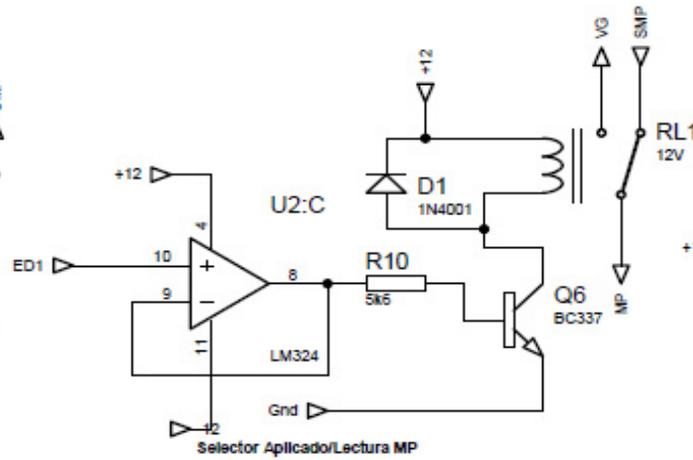
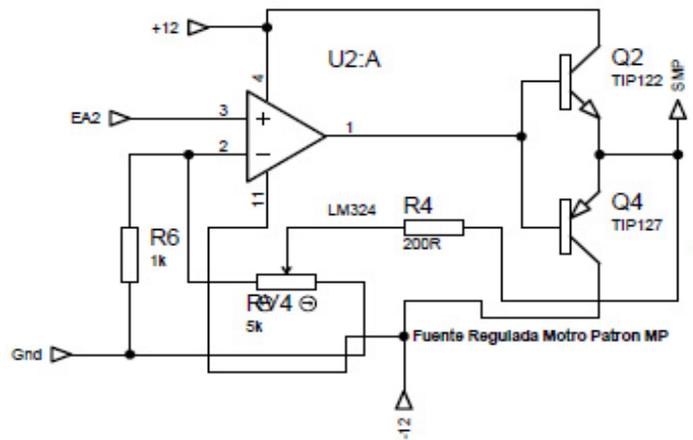
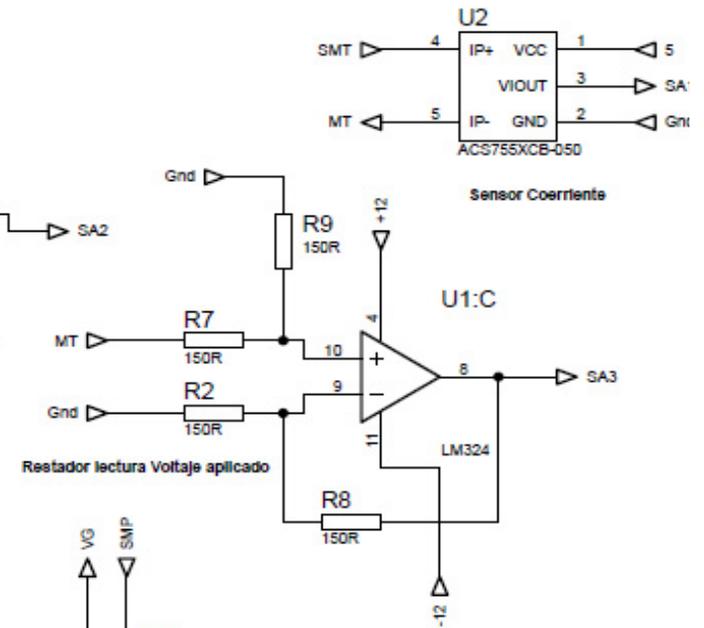
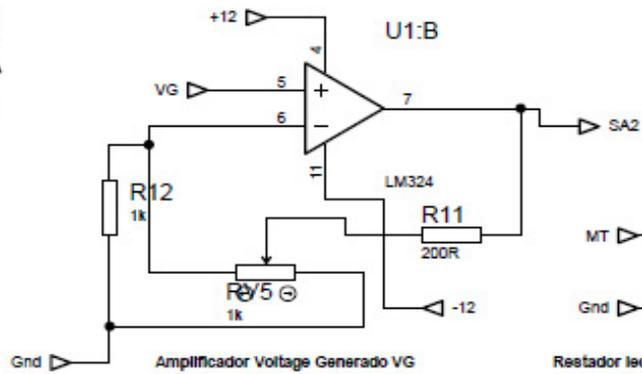
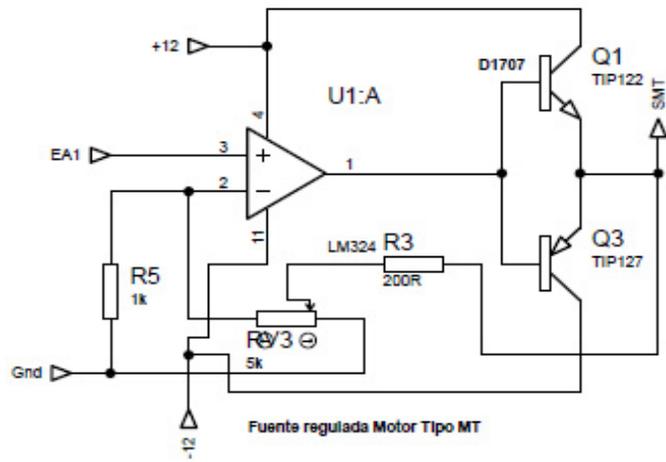
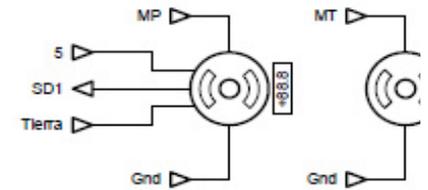
Digital



SALIDAS



Digital



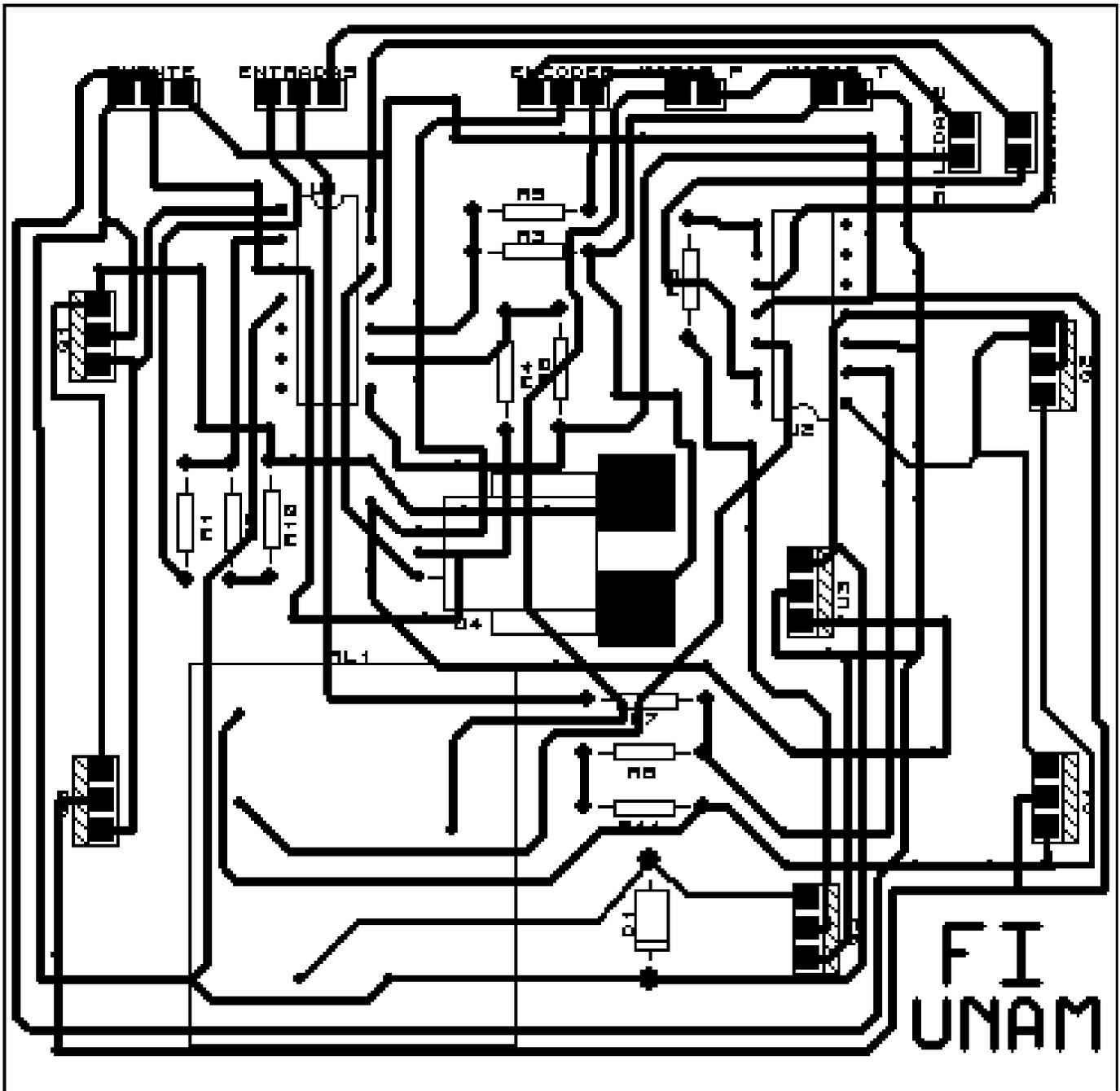


Figura 45. Circuito impreso del sistema, esta PCB es un diseño a dos caras.
 Nota: la imagen de la PCB no está a escala

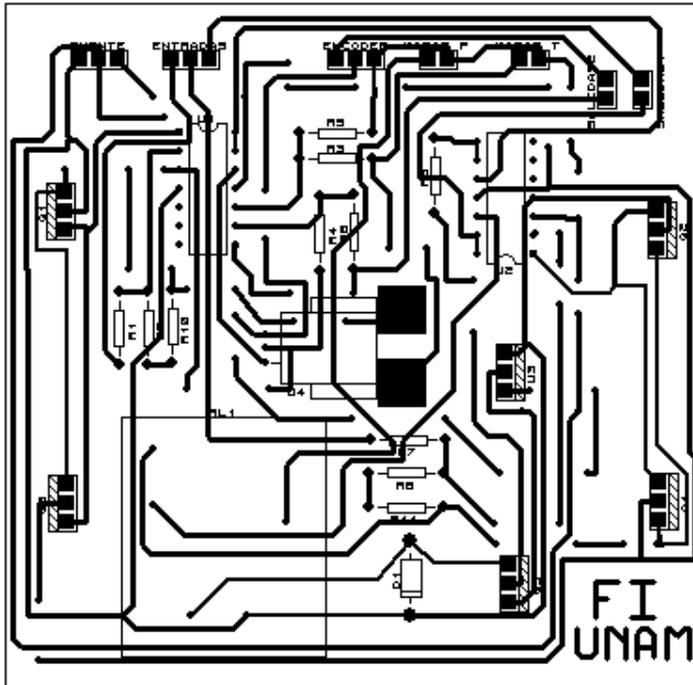


Figura 46. Cara superior de la PCB del sistema. Imagen a escala real.

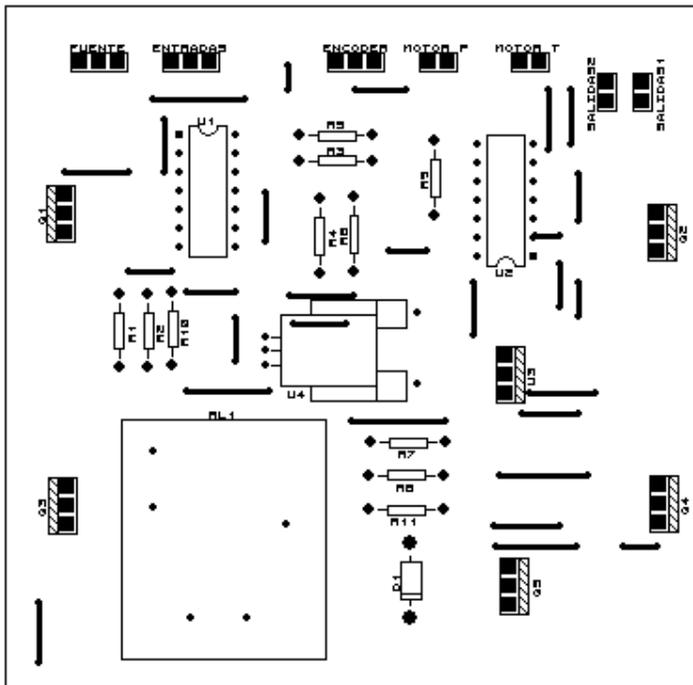


Figura 47. PCB de la cara inferior del sistema. Imagen a escala real.

Lista componentes electrónicos				
Banco de Pruebas para caracterizar motores de DC				
Descripción	No. Componente	Datos Componente	Cantidad Necesaria	Proveedor
Sensor de corriente	ACS755xCB-50	Allegro Micro Systems	1	AG Electrónica
Amplificador operacional	LMC6034IN	4 amplificadores	2	AG Electrónica
Transistor silicón NPN	2SD1707	20A 100W	2	AG Electrónica
Transistor silicón PNP	2SB1156	21A 100W	2	AG Electrónica
Transistor NPN darlington	TIP122	100V 5A 65W	1	AG Electrónica
Relevador alto amperaje	R45-5D20-12	30A max @ 28Vdc	1	AG Electrónica
Diodo propósito general	1N4001	1A 50V	1	AG Electrónica
Resistencia eléctrica	ND	1K Ω a1/2W	6	AG Electrónica
Resistencia eléctrica	ND	47K Ω a1/2W	1	AG Electrónica
Resistencia eléctrica	ND	18K Ω a1/2W	1	AG Electrónica
Resistencia eléctrica	ND	1.2K Ω a1/2W	2	AG Electrónica
Resistencia eléctrica	ND	200 Ω a1/2W	2	AG Electrónica

Tabla 16. Componentes electrónicos del sistema.

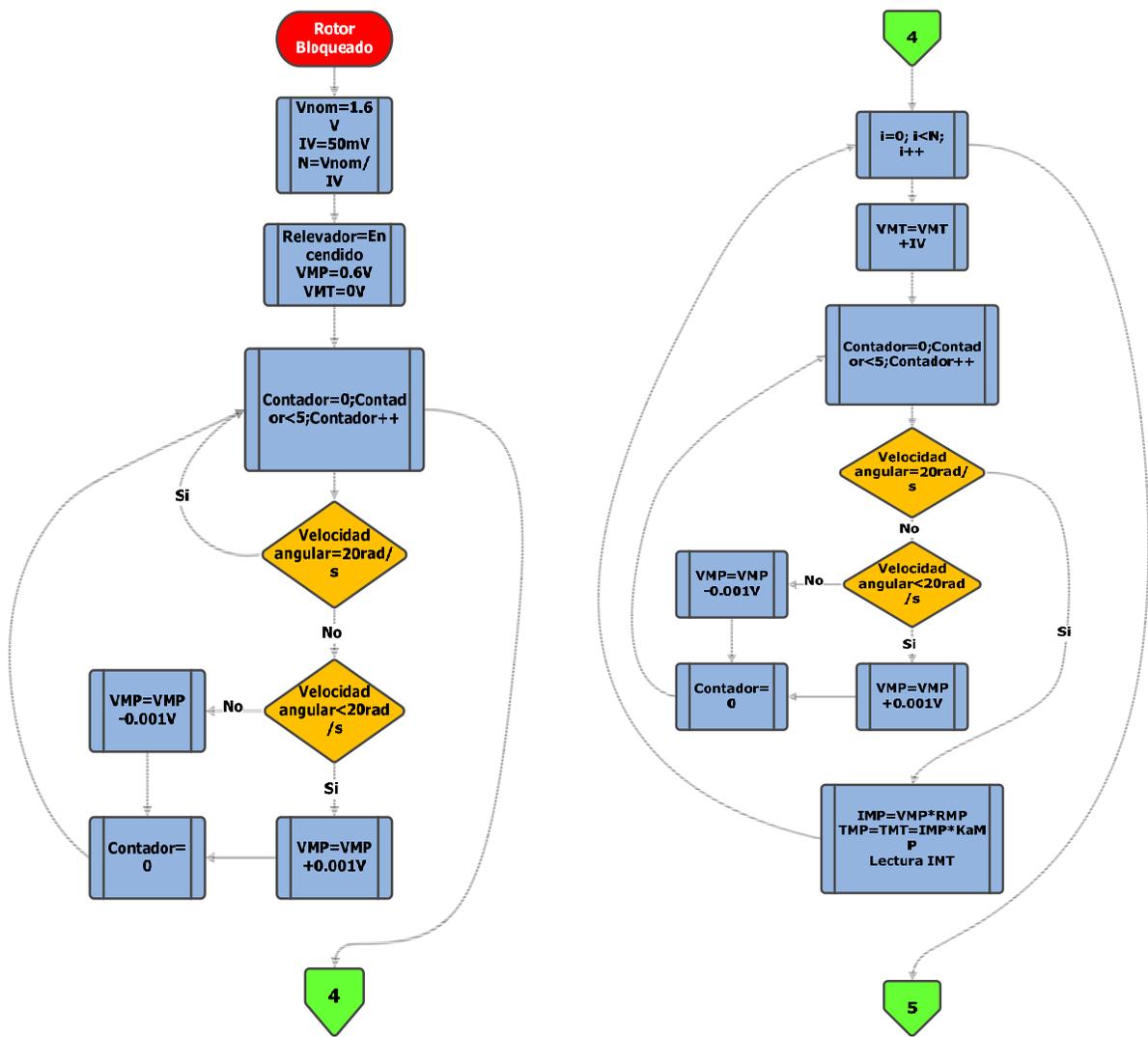


Figura 48. Diagrama de flujo de la rutina "Rotor Bloqueado"

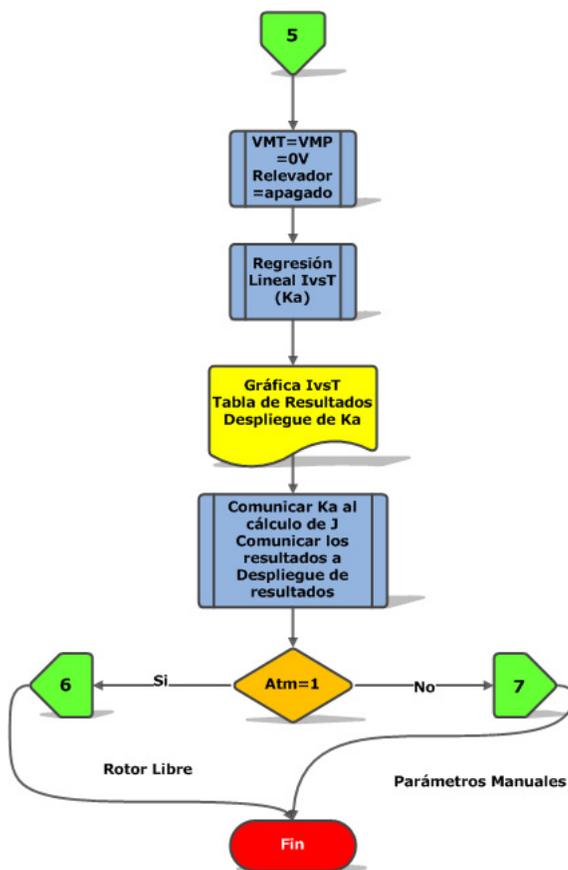


Figura 49. Diagrama de flujo de la rutina “Rotor Bloqueado”(Continuación).

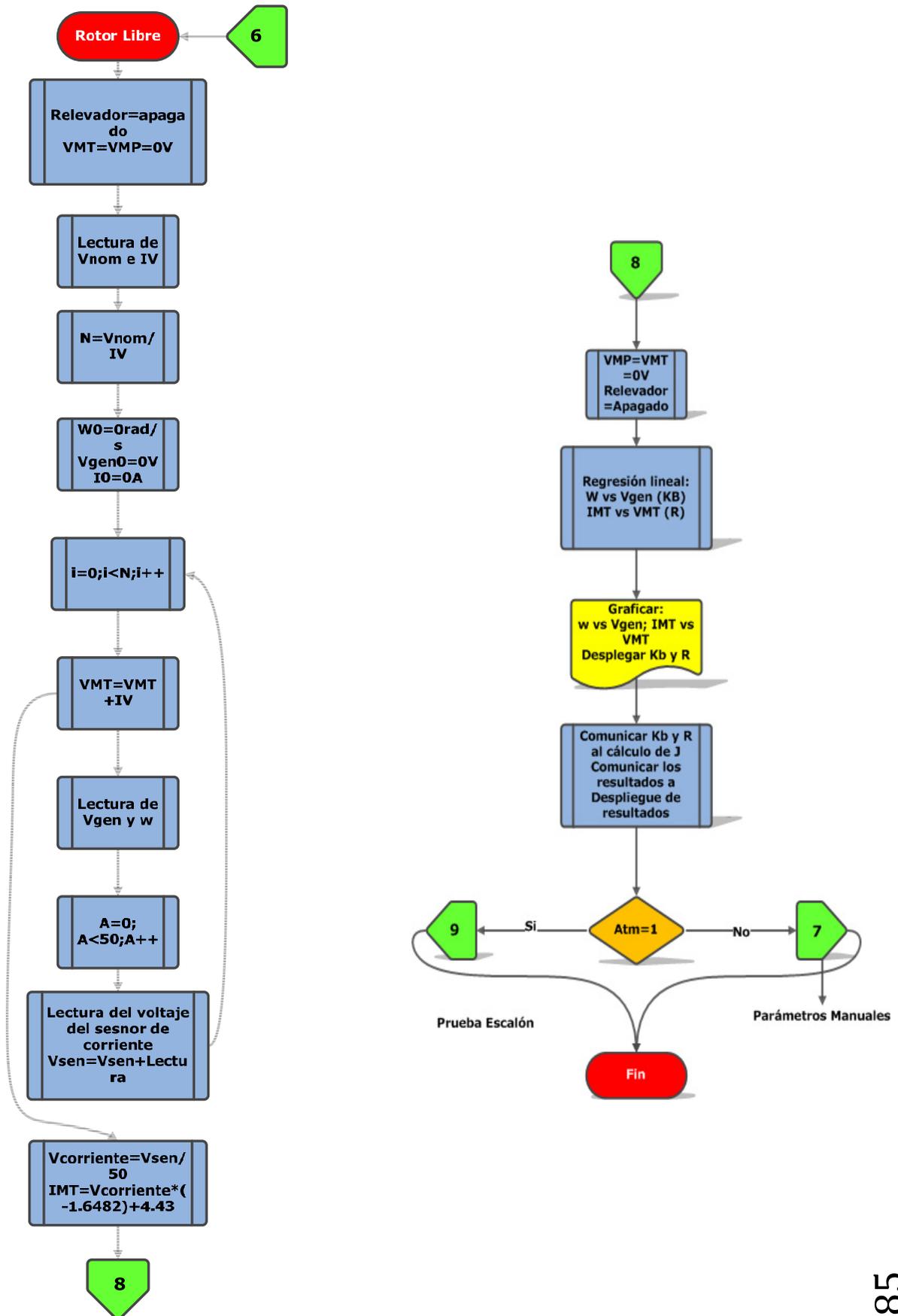


Figura 50. Diagrama de flujo de la rutina "Rotor Libre"

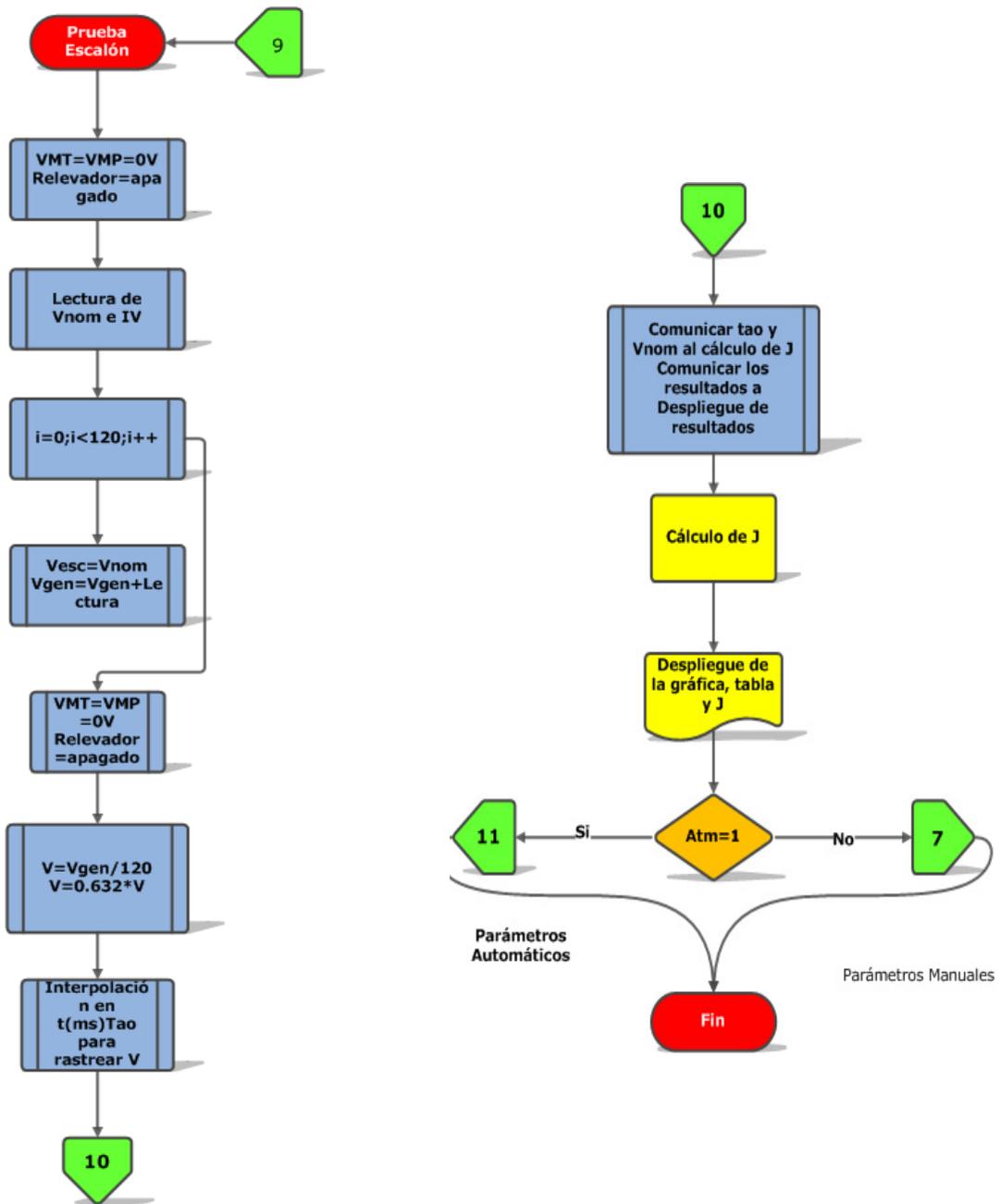


Figura 50. Diagrama de flujo de "Prueba Escalón"

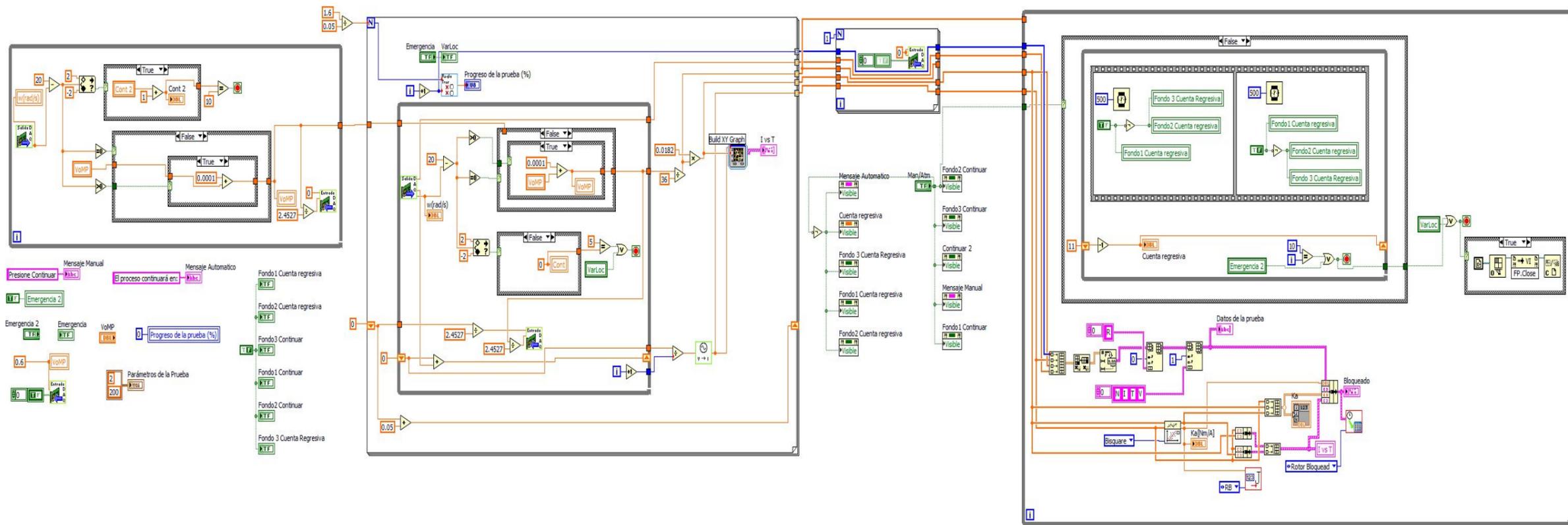


Figura 51. Diagrama de bloques de la rutina "Rotor Bloqueado".

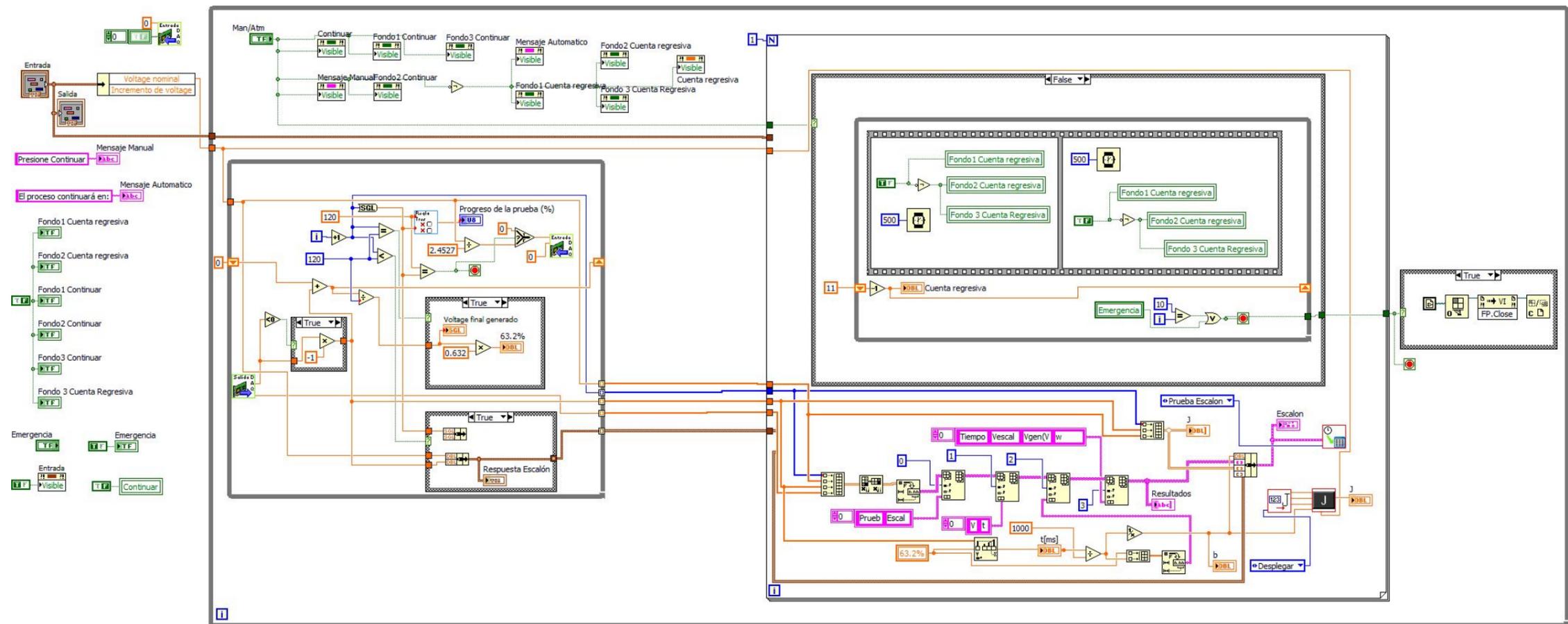


Figura 52. Diagrama de bloques de la rutina "Rotor Libre".

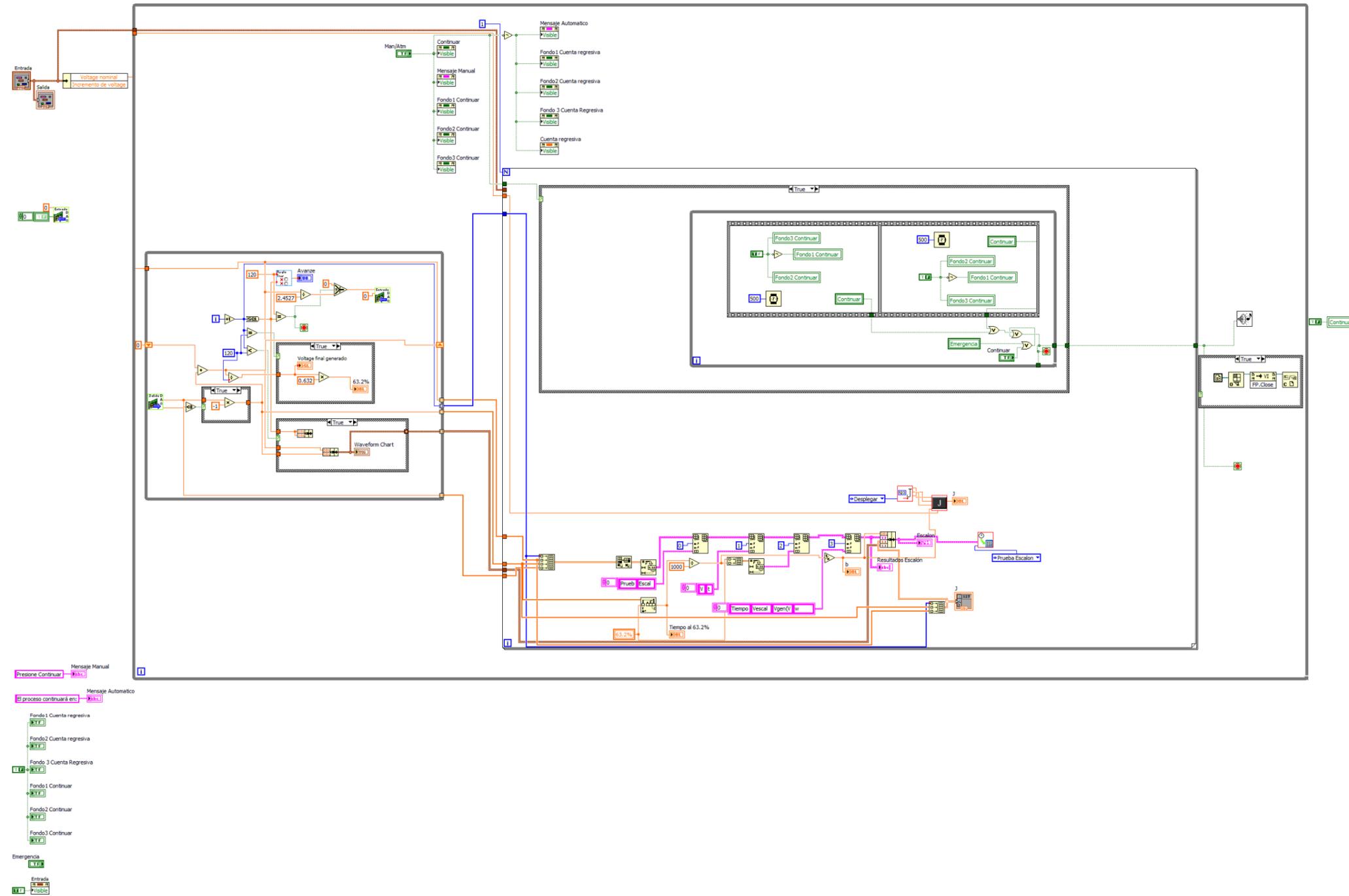


Figura 53. Diagrama de bloques de la rutina “Prueba Escalón”.

D

Apéndice

Archivo de Excel

Resultados Pruebas Banco (Reparado) - Microsoft Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Banco de pruebas para caracterizar motores de corriente directa													
2															
3		Universidad Nacional Autónoma de México					Facultad de Ingeniería								
4		Reporte de Pruebas													
5															
6															
7															
8	Hora y fecha	25/01/2011 04:37:35p.m.													
9															
10	Usuario	Luis Enrique Calvillo Zamorec													
11															
12	Datos del motor														
13	Marca	Pittman													
14	Modelo	9234													
15															
16	Vnom(V)	12													
17	IV(mV)	100													
18															
19	Comentarios	Prueba 5 del sistema completo, se esperan problemas en excel.													
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															



**Banco de pruebas para caracterizar motores
de corriente directa**



Universidad Nacional Autónoma de México		Facultad de Ingeniería	
Reporte de Pruebas			
Hora y fecha	25/01/2011 04:37:35p.m.		
Usuario	Luis Enrique Calvillo Zamorez		
Datos del motor			
Marca	Pittman		
Modelo	9234		
Vnom(V)	10		
IV(mV)	100		
Comentarios	Prueba 5 del sistema completo, se esperan problemas en excel.		

Tabla 17. Hoja 1 del archivo de resultados de la prueba.



**Banco de pruebas para caracterizar motores
de corriente directa**



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Reporte de Pruebas

Rotor Bloqueado

Ka: 0.016676

Rotor Bloqueado			
No. iteración	Ireal	Tteórico	VMTMP
1	0.519993	-1.2782	-0.023242
2	0.349399	-1.270402	-0.043335
3	0.29101	-1.262604	-0.072826
4	0.288877	-1.254807	-0.303892
5	0.31485	-1.247009	-0.10815
6	0.307726	-1.239211	-0.368707
7	0.305118	-1.231413	-0.307132
8	0.321693	-1.223615	-0.375188
9	0.316601	-1.215818	-0.364818
10	0.346066	-1.20802	-0.407596
11	0.329161	-1.200222	-0.455883
12	0.339052	-1.192424	-0.50255
13	0.384042	-1.184626	-0.58681
14	0.361098	-1.176829	-0.64482
15	0.348842	-1.169031	-0.768941
16	0.35765	-1.161233	-0.69894
17	0.359494	-1.153435	-0.776394
18	0.366959	-1.145637	-0.812043
19	0.384722	-1.13784	-0.865191
20	0.379319	-1.130042	-0.901164
21	0.390606	-1.122244	-0.947182
22	0.387911	-1.114446	-1.000655
23	0.397325	-1.106649	-1.046026
24	0.393624	-1.098851	-1.089776
25	0.41828	-1.091053	-1.135146
26	0.410285	-1.083255	-1.173387
27	0.415431	-1.075457	-1.229128
28	0.42933	-1.06766	-1.276119
29	0.421001	-1.059862	-1.321166

Tabla 18. Hoja 2 del archivo de resultados, tabla de resultados.

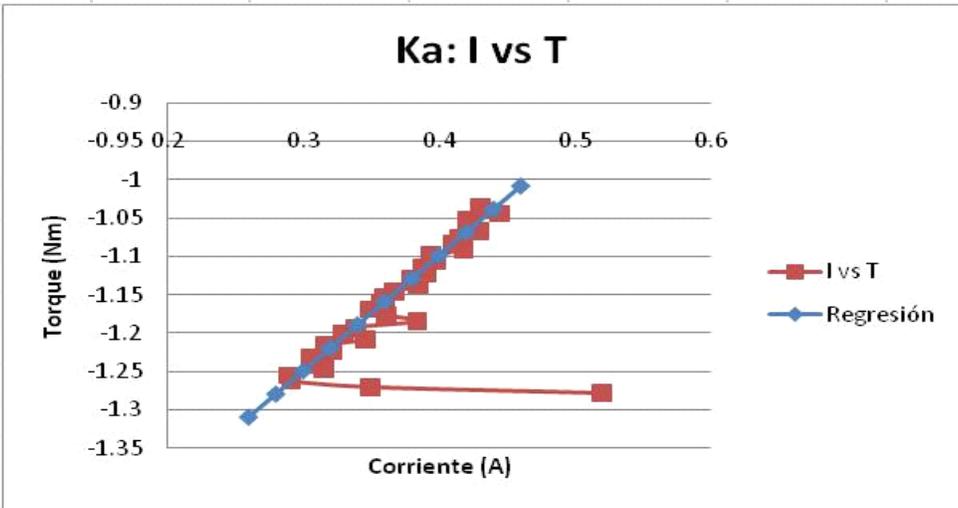


Tabla 19. Hoja 2 del archivo de resultados, grafica obtenida.



**Banco de pruebas para caracterizar motores
de corriente directa**



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Reporte de Pruebas

Rotor Libre

R=290.597156

Kb=0.0163

Rotor	Libre				
Iteración	Voltaje MT	Voltaje Real MT (V)	w(rad/s)	Vgen	Corriente
1	0	0.028934	0	10.675813	0.253679
2	0.1	0.089678	0	0.007545	0.245257
3	0.2	0.0469	0	0.026483	0.243098
4	0.3	0.103289	0	0.027962	0.249201
5	0.4	0.204076	0	0.015971	0.248721
6	0.5	0.563152	0	0.002177	0.253785
7	0.6	0.75695	0	0.000557	0.249894
8	0.7	0.857413	0.179415	0.021481	0.266258
9	0.8	0.778015	6.439422	0.090509	0.259384
10	0.9	0.786765	1.836876	0.06764	0.261112
11	1	0.940701	0	0.077363	0.270016
12	1.1	1.156211	0	0.009814	0.266525
13	1.2	1.223943	10.891644	0.147546	0.263932
14	1.3	1.154915	23.216777	0.404538	0.258066
15	1.4	1.512695	34.448468	0.508891	0.263251
16	1.5	1.564871	38.262528	0.568197	0.260716
17	1.6	1.653992	44.998418	0.680651	0.261748
18	1.7	1.818298	51.04131	0.76005	0.262851
19	1.8	1.773576	55.900225	0.954171	0.263516
20	1.9	1.788808	61.475549	1.027412	0.268405
21	2	1.882465	67.461391	1.162228	0.261716
22	2.1	1.992003	73.665249	1.121718	0.265719
23	2.2	2.046772	78.51528	1.286673	0.263252
24	2.3	2.217884	84.07708	1.36672	0.26036
25	2.4	2.281079	89.321159	1.428294	0.270599
26	2.5	2.600618	95.299047	1.493109	0.259346
27	2.6	2.460293	99.951248	1.642184	0.267542
28	2.7	2.768813	106.664154	1.731953	0.266689
29	2.8	2.677748	111.564715	1.767277	0.262618
30	2.9	2.925018	116.382224	1.976631	0.26201
31	3	2.873166	122.538963	1.894963	0.26622
32	3.1	3.018352	128.968525	2.084872	0.267089

Tabla 20. Hoja 3 del archivo de resultados, tabla de resultados parte 1.

35	3.4	3.412428	143.615664	2.455939	0.262554
36	3.5	3.474003	149.045167	2.470522	0.271763
37	3.6	3.465577	157.006036	2.497097	0.270732
38	3.7	3.742338	160.285339	2.617653	0.269307
39	3.8	3.658078	167.747313	2.814043	0.26899
40	3.9	3.980857	171.965386	2.912238	0.270336
41	4	3.910533	176.649033	2.837052	0.270767
42	4.1	4.135766	183.651744	3.016914	0.269665
43	4.2	4.061552	189.538018	3.24312	0.264779
44	4.3	4.181136	194.262734	3.33937	0.269082
45	4.4	4.268313	198.168667	3.473862	0.271806
46	4.5	4.349008	207.494252	3.423954	0.270905
47	4.6	4.459518	210.139977	3.537056	0.264597
48	4.7	4.669843	214.855663	3.566223	0.274553
49	4.8	4.653315	221.38508	3.750947	0.271903
50	4.9	4.759288	229.104296	3.605761	0.264631
51	5	4.886974	234.720908	3.957707	0.276022
52	5.1	4.96378	238.168597	3.91104	0.278137
53	5.2	5.122578	241.893563	4.029004	0.271572
54	5.3	5.312162	247.674218	4.20757	0.263749
55	5.4	5.411329	253.035401	4.20757	0.271839
56	5.5	5.382811	259.568719	4.162847	0.272841
57	5.6	5.445681	266.801924	4.483683	0.271257
58	5.7	5.696841	271.265421	4.552063	0.265848
59	5.8	5.682257	276.108116	4.625952	0.269056
60	5.9	5.880592	282.946707	4.429886	0.275192
61	6	5.987213	287.395554	4.782805	0.27838
62	6.1	6.012491	293.864265	4.91276	0.267482
63	6.2	6.054297	300.45118	5.019381	0.26791
64	6.3	6.2724	303.535522	4.615906	0.275372
65	6.4	6.354067	307.716452	4.75137	0.285293
66	6.5	6.333002	317.232455	5.271188	0.281181
67	6.6	6.574115	323.458703	4.952621	0.271634
68	6.7	6.640551	325.553643	5.329197	0.265482
69	6.8	6.646708	333.546665	5.565449	0.269691
70	6.9	6.737125	337.465475	5.748552	0.279375
71	7	6.97597	343.81315	5.608227	0.282511
72	7.1	6.93384	349.42984	5.859386	0.274361
73	7.2	7.144489	352.86404	6.007165	0.273411
74	7.3	7.211249	359.681449	5.760867	0.271569
75	7.4	7.383982	364.242627	5.915127	0.280492
76	7.5	7.446204	370.279797	6.186703	0.271496
77	7.6	7.450417	375.535917	6.276472	0.271885
78	7.7	7.676623	382.829265	6.295269	0.268761
79	7.8	7.773198	387.402562	6.560039	0.272131
80	7.9	7.823753	393.775812	5.692163	0.273508
81	8	7.876902	399.249265	6.751244	0.272563
82	8.1	7.928106	404.388435	6.127073	0.275535

Tabla 21. Hoja 3 del archivo de resultados, tabla de resultados parte 2.

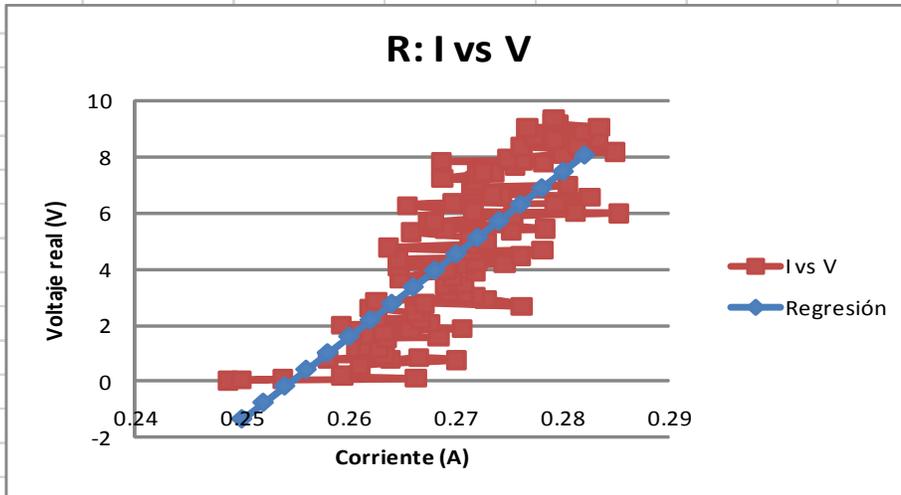
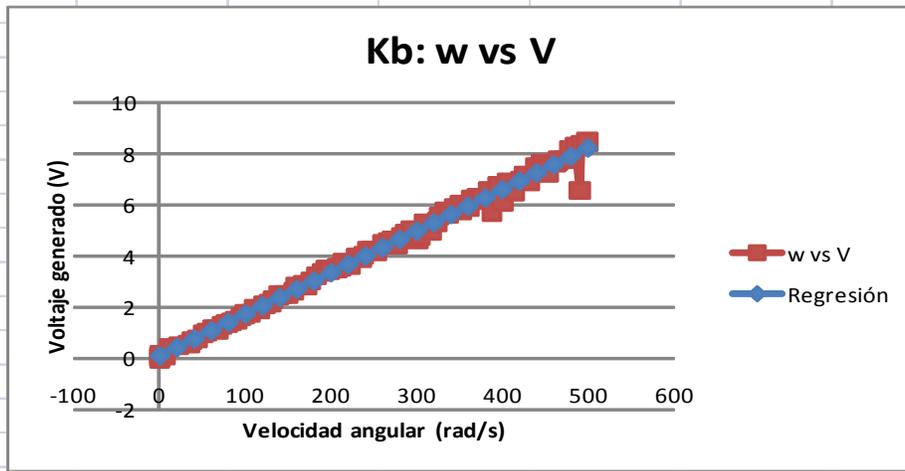


Tabla 23. Hoja 3 del archivo de resultados, gráfica obtenida.



**Banco de pruebas para caracterizar motores
de corriente directa**



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Reporte de Pruebas

Prueba Escalón

J: 1.5442E-06

Prueba	Escalón		
V@63.2%(V)	t@ 63.2% (5)		
5.210229	0.000906		
Tiempo (ms)	vescaíontv)	Vgen(V)	w (rad/s)
1	10	0.008517	14.807047
2	10	5.750497	306.403429
3	10	6.373695	384.439636
4	10	6.340963	406.843241
5	10	7.324211	427.609379
6	10	7.692362	452.842184
7	10	7.834956	468.675827
8	10	7.888753	484.486578
9	10	8.068615	49 5.470502
10	10	8.369682	499.408668
11	10	8.478572	500.901669
12	10	8.122412	503.157983
13	10	7.482361	507.732146
14	10	8.600749	506.964019
15	10	8.120467	507.475845
16	10	8.370654	510.050558
17	10	8.512276	509.533527
18	10	8.664592	509.275405
19	10	8.445192	510.050558
20	10	8.422831	511.087773
21	10	7.789585	510.828074
22	10	8.59848	510.568638
23	10	8.646444	510.568638
24	10	8.36709	510.568638
25	10	8.14931	511.868457
26	10	7.849863	510.828074
27	10	8.618573	510.050558
28	10	8.671722	512.651529
29	10	8.686629	510.050558
30	10	7.01245	512.390239

Tabla 24. Hoja 4 del archivo de resultados, tabla de resultados parte 1.

32	10	8.635101	513.17491			
33	10	7.817132	513.17491			
34	10	8.14218	510.568638			
35	10	7.962318	513.699361			
36	10	8.64774	510.828074			
37	10	8.747231	512.913086			
38	10	8.712231	511.868457			
39	10	8.627323	511.607964			
40	10	8.281533	513.961988			
41	10	8.786121	510.050558			
42	10	8.684685	512.913086			
43	10	8.384914	512.913086			
44	10	8.663296	513.17491			
45	10	8.183986	511.607964			
46	10	8.611119	512.651529			
47	10	8.15093	512.129215			
48	10	8.044633	513.17491			
49	10	8.094541	512.129215			
50	10	8.685009	511.868457			
51	10	7.852456	513.699361			
52	10	8.504822	512.913086			
53	10	8.552461	511.607964			
54	10	8.629592	511.087773			
55	10	8.483109	513.437002			
56	10	6.829671	512.651529			
57	10	8.415701	512.651529			
58	10	8.527832	512.913086			
59	10	8.465933	513.437002			
60	10	8.03718	511.868457			
61	10	8.579036	513.699361			
62	10	8.558295	513.17491			
63	10	8.700564	510.309467			
64	10	8.2757	512.390239			
65	10	8.674314	510.568638			
66	10	8.535934	512.913086			
67	10	8.666536	512.129215			
68	10	8.642231	513.437002			
69	10	8.611119	514.224884			
70	10	8.70575	511.347736			
71	10	8.516813	512.913086			
72	10	7.87741	511.347736			
73	10	8.626351	512.651529			
74	10	8.564776	513.17491			
75	10	7.667732	510.828074			
76	10	8.678527	511.868457			
77	10	8.806538	512.390239			
78	10	8.80751	509.275405			
79	10	8.678851	512.651529			

Tabla 25. Hoja 4 del archivo de resultados, tabla de resultados parte 2.

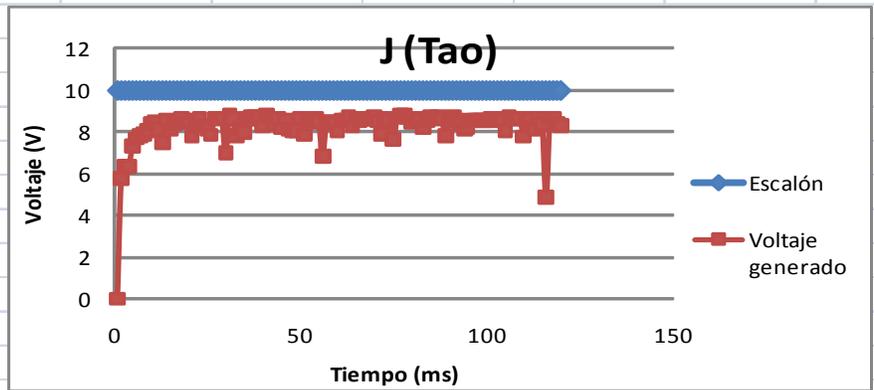


Tabla 27. Hoja 4 del archivo de resultados, gráfica obtenida.

Referencias bibliográficas

Alecop. Alecop. *Banco de ensayos modular BEM 199*. [En línea] Alecop.[Citado el: 21 de Enero de 2010.]

http://www.alecop.com/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=149&Itemid=2&lang=es.9EQMT332SE.

Arribas, Luisa Fernanda González. 2003. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. *CIDESI*. [En línea] 17 de Febrero de 2003. [Citado el: 20 de Enero de 2010.]

<http://www.conacyt.gob.mx/Centros/CIDESI/ANUARIO%20CIDESI%202002.pdf>.

Chapman, Stephen J. 2000. *Máquinas Eléctricas*. Tercera edición. Nueva York : Mac Graw Hill, 2000. págs. 551-584.

García, Eloy Rada. 2003. *A hombros de gigantes. Las grandes obras de la física y la astronomía*. Barcelona : Crítica, 2003.

Gómez, Yan. 2010. Un poco de ingeniería. Electrónica, electricidad, mecánica, sistemas control y automatización. *Un poco de ingeniería. Electrónica, electricidad, mecánica, sistemas control y automatización*. [En línea] Blog spot, 3 de Enero de 2010. [Citado el: 20 de Mayo de 2011.]

<http://unpocodeingenieria.blogspot.com/2010/01/motores.html>.

Instruments, National. Entrenadores de Ingeniería Quanser (QNET) para NI ELVIS. *Aprendizaje Práctico para Control y Mecatrónica*. [En línea] National Instruments.[Citado el: 21 de Enero de 2010.] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203545#>.

Juárez, Ing. Miguel Tlapa. National Instrumets. *Banco de Pruebas para la Caracterización de Motores Limpiaparabrisas aplicado en la Industria Automotriz*. [En línea] [Citado el: 20 de Enero de 2010.]

<http://digital.ni.com/worldwide/latam.nsf/web/all/182D5447A81A26C686256FA3007C5D58>.

Norton, Robert L. 2001. *Diseño de máquinas*. México : Prentice Hall, 2001. págs. 822-834. 970-17-0257-3.

Ogata, Katsuhiko. 2004. *System Dynamics*. New Jersey : Pearson Prentice Hall, 2004. pp. 275-277. 0-13-142462-9.

Products, Ametek Technical & Industrial. Direct Industry. [En línea] [Citado el: 1 de 12 de 2009.] <http://pdf.directindustry.es/pdf/ametek-technical-industrial-products-14270.html>.

Smith, Christopher M. 1999. Cross roads. <http://www.acm.org/crossroads/espanol/xrds3-3/haptic.html#8>. [En línea] 10 de Diciembre de 1999. [Citado el: 30 de Enero de 2010.]

<http://www.acm.org/crossroads/espanol/xrds3-3/haptic.html#8>.