



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE POSGRADO EN
INGENIERÍA**

**EQUIPO DE PRUEBA UNIVERSAL PARA MOTORES
FRACCIONALES DE DC Y AC**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
MECÁNICA**

PRESENTA:

JESÚS GABRIEL MARTÍNEZ VARGAS.

TUTOR:

DR. ANGEL LUIS RODRÍGUEZ MORALES
CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA
AVANZADA

MÉXICO, D.F. Octubre 2014.

COMITÉ DE EVALUACIÓN

PRESIDENTE : Dr. Marcelo López parra
SECRETARIO : Dr. Saúl Daniel Santillán Gutiérrez
VOCAL : Dr. Ángel Luis Rodríguez Morales
PRIMER SUPLENTE : Dr. Fernando Velázquez Villegas
SEGUNDO SUPLENTE : Dr. Jesús Manuel Dorador González

SAN LUIS POTOSÍ, SLP. MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

DR. ANGEL LUIS RODRÍGUEZ MORALES

FIRMA

Dedicatoria:

Que este trabajo ayude a motivar a mis hijos a seguir superándose, a Gabriel que pronto pueda empezar su Maestría, a Sam para siga con el mismo entusiasmo en su carrera universitaria y a Adrián que le encuentre la pasión al estudio técnico.

A mi querida esposa que estuvo conmigo codo a codo desvelándonos y a mis amados Padres.

Agradecimientos:

Por su impulso en los momentos difíciles, por ser mi compañera de estudios, amiga, esposa y madre de mis hijos. Aunque cuando hubo momentos en que nos vencía el cansancio y nos sentíamos derrotados supo sacar fuerzas para que siguiéramos adelante, GRACIAS Adriana del Pilar Montoya Castro.

Gracias también a mis hijos que supieron apoyarnos y aceptar los sacrificios que hubo.

Gracias a mi Tutor, por todo su esfuerzo y apoyo incondicional.

Gracias a mis Padres por darme la vida y a DIOS por permitirme vivirla para terminar ésta Maestría.

Resumen

En las últimas décadas se han utilizado de forma masiva los motores de corriente directa y corriente alterna con caja de reducción. Dentro del sector industrial, existen aplicaciones que requieren un amplio control tanto de velocidad como del torque de los motores. Debido a lo anterior, es muy importante que al salir los motores de la línea de producción, éstos hayan sido evaluados y analizados en sus variables críticas.

En la presente tesis se muestra el proceso de diseño, construcción, implementación y validación experimental de un sistema cuya función es mejorar los tiempos de prueba e incrementar la calidad del producto final al hacer pruebas de precisión en los motores y cajas reductoras. El sistema completo es llamado DIGILOAD.

1. Introducción.....	8
1.1 Generalidades.....	8
1.2 Motivación.....	8
1.3 Planteamiento del problema.....	9
1.4 Alcances.....	10
1.5 Objetivos.....	11
1.6 Aportaciones.....	11
1.7 Estructura de la tesis.....	12
2. Estado del arte de los sistemas de prueba.....	12
2.1 Proceso de prueba en la planta.....	13
2.2 Sistemas para la prueba de motores eléctricos.....	13
2.2.1 Sistema Elektra.....	17
2.2.2 Sistema Universidad de Oviedo.....	18
2.2.3 Sistema MTS 3800.....	18
2.3 Comparativo entre los sistemas.....	21
3. Marco teórico conceptual.....	22
3.1 Motores fraccionarios.....	22
3.2 Motores de AC.....	24
3.3 Motores de DC.....	25
3.3.1 Modelado matemático.....	28
3.3.2 Análisis transitorio.....	29
3.4 Validación experimental de la resp. de un motor de CD.....	40
3.5 Caja de engranes.....	41

4. Diseño del sistema DIGILOAD	
4.1 Parámetros de diseño.....	42
4.2 Características específicas del sistema.....	43
4.3 Modularidad del DIGILOAD.....	45
4.3.1 PLC.....	45
4.3.2 HMI.....	48
4.3.3 Tarjetas acondicionadoras de señal.....	52
4.3.4 Freno magnético.....	54
4.3.5 Acoplador mecánico del motor.....	62
5. Experimentos de validación	
5.1 Pruebas de Motores en CD.....	65
5.1.1 Motores de alto torque.....	65
5.1.2 Motores de Alta RPM.....	67
5.1.3 Motores de baja RPM.....	68
5.1.4 Motores de precisión.....	69
5.2 Pruebas de motores en CA	
5.2.1 Motores de alto torque.....	70
5.2.2 Motores de bajo torque.....	71
5.2.3 Motores de alta RPM.....	72
5.3 Resumen de resultados.....	73
6. Conclusiones	
6.1 Trabajos futuros.....	74
Bibliografía.....	75

1. Introducción

1.1 Generalidades

Las aplicaciones industriales actuales demandan el incremento en la calidad de sensores, actuadores y sistemas en general. Éste incremento en la calidad implica hacer pruebas más robustas y confiables en los productos terminales. Tales pruebas implican el desarrollo de nuevos sistemas de evaluación. Tales sistemas tienen un alto importe económico, que va desde la sustitución del sistema actual de pruebas, mantenimiento del mismo hasta la capacitación de personal especializado. Desde el punto de vista empresarial resulta una buena inversión, ya que los motores certificados tienen mayor aceptación en el mercado global. Sin embargo, la complejidad de los sistemas de pruebas y la cantidad de horas de operación ocasiona que éstos tengan recurrencia en fallas comunes tales como: desajuste de las cajas de acoplamiento mecánico, falla en los sensores de posición y falla en el sistema de frenado, entre otras. Cabe mencionar que al día en una línea de producción media, se evalúan hasta 15,000 motores. Tales motores tiene diferentes acoples mecánicos y por tanto diferentes parámetros de evaluación.

1.2 Motivación

Como se describió anteriormente, es relevante el diseño de un sistema capaz de evaluar cierto grupo de parámetros de motores fraccionales. Por tanto, se planteó un proyecto de mejora para disminuir los tiempos de prueba y agregar nuevas características a los equipos de prueba antiguos. Esto fue convirtiéndose en un nuevo sistema integral el cual reúne las características para adaptarse fielmente a las necesidades reales de los motores producidos.

La investigación se enfocó en los principios básicos de funcionamiento de un motor fraccional con caja de engranes y de ahí se fueron desarrollando los transductores y dispositivos electrónicos necesarios para el nuevo equipo de prueba. Conforme se fueron presentando los requerimientos de los diferentes departamentos de la planta se fueron añadiendo nuevas funciones al diseño del equipo.

Esto al paso de los meses fue generando un sistema bastante robusto y por consiguiente complejo, fue necesario hacer investigaciones en diferentes ámbitos a fin de poder lograr el objetivo, se consultó a proveedores de equipos similares en USA para lograr integrar el sistema de pruebas que sea competitivo a las exigencias actuales de calidad, que garanticen su buen funcionamiento y los requerimientos del cliente. Finalmente se concluyó un sistema de pruebas con las características mejoradas con respecto a sus competidores. Este sistema fue nombrado por el autor como DIGILOAD.

1.3 Planteamiento del problema

Dentro de la problemática en el desarrollo de sistemas de evaluación paramétrica para dispositivos electromecánicos, se encuentra el tratamiento de la instrumentación, tanto para medir las variables de interés como para generar señales de prueba. Además el diseño del acoplamiento mecánico para la reducción de tiempos del proceso de prueba. En esta tesis se ha planteado el desafío de diseñar, construir e implementar en una línea de producción el sistema de evaluación antes mencionado utilizando como procesador de la información obtenida un controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés) con una interfaz gráfica humano-máquina (Interfaz humano máquina, HMI por sus siglas en inglés). Todo esto debido a que recientemente se han desarrollado dispositivos digitales que integran una serie de elementos que permiten su uso en aplicaciones específicas de control, con una reducción en el número de componentes requeridos y con la consiguiente mejora en la confiabilidad y versatilidad de los controladores.

El planteamiento fundamental del trabajo de investigación se enfoca en la capacidad de acoplamiento rápido de 20 tipos de motores tanto de corriente directa como de corriente

alterna con parámetros de alimentación diferentes y por tanto rangos de cargas dinámicas disímiles. Otro reto es el implementar el sistema para que cualquier operador con conocimientos básicos en la construcción de los motores pueda operar con facilidad el sistema. Esto implica el uso de interfaces gráficas aunadas al control implementado en un controlador lógico programable. En otro orden de ideas, el sistema debe ser lo suficientemente robusto para que los componentes que lo integren sean de fácil acceso comercial y con esto evitar tiempos de espera en el refaccionamiento. Finalmente, las pruebas deben utilizar el mínimo de tiempo posible y los resultados deben ser coherentes y certeros en cuanto al objetivo de certificación.

1.4 Alcance de la tesis

En la presente tesis se aborda el problema de diseñar un sistema de pruebas para motores fraccionales. Este sistema está diseñado de manera robusta empleando estrictas normas de calidad y operación industriales. Por tal razón se implementaron componentes con tecnología industrialmente madura. Sin embargo, dadas las características del mismo fue necesaria la fabricación de tarjetas electrónicas que tienen la función de acondicionamiento y generación de señales. En este documento se ilustra el proceso de diseño y fabricación del sistema de pruebas. Sin embargo, dadas las características comerciales y el patrocinio de la empresa MERKLE KORFF Industrias de México, no se reportan diagramas esquemáticos de la construcción de los sistemas. Por otro lado, se reporta en forma gráfica el montaje en las líneas de producción de la empresa antes mencionada, el proceso de operación, los resultados de las pruebas, así como los certificados de operatividad.

1.5 Objetivos de la tesis

El objetivo general de la tesis es el diseño, construcción e implementación de un sistema de pruebas para motores fraccionales. Para reducir tiempos muertos producidos por la colocación de los motores, evaluación, análisis y diagnóstico de los mismos.

Los objetivos específicos son:

- Evaluar los sistemas existentes para encontrar los nichos de oportunidad en el nuevo diseño.
- Proponer un sistema robusto basado en la implementación de algoritmos en controladores lógicos programables para la prueba de motores fraccionales.
- Integrar un sistema con componentes comerciales de fácil acceso.
- Diseñar un modelo de acoplamiento mecánico rápido para el montaje de motores de DC y AC.
- Diseño de tarjetas electrónicas de acondicionamiento de señal.
- Diseñar el programa de evaluación multiparamétrico con rutinas base y capacidad de cambio de parámetros en línea.
- Certificar el equipo de pruebas con instrumentos de referencia trazable.

1.6 Aportaciones

El desarrollo de un sistema mecatrónico de la magnitud del presentado en esta tesis tiene diversos puntos de vista en cuanto a sus aportaciones. Desde el punto de vista comercial, el importe económico de una fracción de los que se encuentran en el mercado. Por otro lado a nivel empresarial tiene ventajas en cuanto al tiempo de recuperación de la inversión ya que el porcentaje de muestra de prueba en la línea de producción puede incrementarse significativamente ya que ésta no implica pérdida de tiempo extra. La visión técnica del equipo ilustra que dada la tecnología madura sobre la cual se implementó el sistema, éste es altamente confiable, comparado con los que se encuentran en el comercio por más de 10 años. Otro punto de relevancia es que todos los componentes que lo integran son de fácil acceso comercial. Técnicamente se mejoraron los tiempos de prueba y confiabilidad. Otra aportación importante es la portabilidad, ya que el sistema presentado en esta tesis, tiene la capacidad de ser montado con facilidad en diferentes líneas de producción.

1.7 Estructura de la tesis

La tesis está compuesta por 5 capítulos. En el capítulo 2, se comenta el estado del arte de los sistemas de pruebas. Se analiza un sistema de pruebas general y se comparan los sistemas comerciales, finalmente se resume en un comparativo entre sistemas, esto con el fin de encontrar falas recurrentes y por tanto proponer un diseño mejorado. El capítulo 3 está realizado en 3 partes. La primera se refiere al marco teórico conceptual sobre el cual se analizan los motores fraccionales. La segunda parte es con referencia a la propuesta del diseño, en ésta se encuentran las especificaciones y características específicas de construcción. La tercera parte enuncia la modularidad del sistema DIGILOAD. Se describen los módulos así como los componentes que lo integran. El capítulo 4 incluye las pruebas que se le hacen a los motores. El capítulo está seccionado en motores de AC y DC. Al final se resumen los resultados experimentales. El capítulo 5 ilustra los resultados del desarrollo del sistema. Cabe mencionar que por las características industriales con las que se fabricó el sistema se encontraron mejoras que pueden ser realizadas con relativa facilidad, esto último se comenta en la sección de trabajos futuros.

2. Estado del arte de los sistemas de prueba

2.1 Proceso de pruebas en la planta de producción

El producto a probar sale de la línea de ensamblaje por medio de una banda transportadora, llega a manos del técnico especializado en pruebas de motores eléctricos donde realiza una inspección visual para determinar el faltante de componentes o en su caso fallas en el ensamble. Posteriormente, coloca el motor en el acoplador mecánico y lo inserta en el banco de pruebas. Realiza las conexiones eléctricas para energizar el motor y finalmente ejecuta el programa de prueba. Durante la secuencia de prueba se aplican diferentes potenciales al motor y se miden los parámetros de cada prueba, como por ejemplo, revoluciones, voltaje, corriente y torque entre otros. Una vez ejecutada la prueba, el sistema determina si el dispositivo cumple con los requerimientos mínimos de la norma de calidad. En tal caso, le es colocado una marca indicadora de aceptación y es llevado a la estación de empaquetado. En caso contrario la información proveniente del sistema de pruebas determina la etapa en la línea de producción donde se generó la falla. El motor es llevado a una estación donde se corrigen las posibles fallas.

El procedimiento antes mencionado ha reflejado un incremento en la productividad de la línea de producción, debido a que fácilmente se detectan errores tanto humanos como de las herramientas y materias primas que conforman el proceso de fabricación de motores fraccionales.

2.2 Sistemas para las pruebas de motores eléctricos

Entre los fabricantes y proveedores principales de motores fraccionarios en México y América Latina encontramos a empresas como: Monterrey Eléctrico Industria, Tyco Electronics, Reeco Asset, Filcarbo, Equipump, TAC, Grupo TSK, EquipNet, Ancar Maquinaria, entre otros. Estas empresas se encargan de llevar a cabo las pruebas pertinentes para normalizar su producción y para ello utilizan bancos de prueba de laboratorio para cada tipo de motor. Estas pruebas incluyen una gran cantidad de parámetros y por tanto el tiempo que se toma por cada análisis hace que no sea rentable a nivel de línea de producción. Esta es una desventaja importante con respecto al prototipo que se propone en esta tesis. Sin embargo, los sistemas de prueba de las empresas antes mencionadas son precisos, sofisticados.

El DIGILOAD realiza menos pruebas que los equipos de laboratorio, no obstante, su ventaja radica en que las pruebas fundamentales las realiza en 8 segundos, haciendo viable su montaje en las líneas de producción.

En este capítulo se comentan características de los sistemas de pruebas para motores fraccionales. Sin embargo, dada su aplicación, es de considerarse que en su mayoría se manejan como secretos industriales, por tanto, es difícil mencionar características específicas de los equipos. Por otro lado, a nivel de laboratorio se encuentran sistemas en Centros educativos de nivel superior. Por ejemplo, el Departamento de Máquinas y Motores térmicos de la Universidad del País Vasco cuenta con un banco de ensayo de motores. Los investigadores hacen la consideración de que al llevar a cabo la construcción de un nuevo motor; se requiere someterlo a una larga serie de mediciones alternadas con severas pruebas de durabilidad y de carga, las principales pruebas les sirven para obtener los valores relativos al par motor, la potencia desarrollada, el consumo energético y los rendimientos. En Fig. 2.1 se presenta el banco de pruebas de la Universidad del País Vasco.



Fig. 2.1 Banco de pruebas de la Universidad del País Vasco.

La Universidad del Valle de México presenta un banco de pruebas para motores de inducción desarrollado para propósitos de investigación y docencia. Diseñaron y construyeron el sensor de par y el emulador de cargas; el sistema de prototipado rápido empleado para el desarrollo de las estrategias de simulación y control, esto permite asimilar de forma más eficiente los estudios que se abordan alrededor del control de los motores de inducción y su acondicionamientos. Cuenta también con un sistema de medición de par inalámbrico con características industriales de relativamente fácil reproducción para dotar otros bancos de pruebas de sistemas electromecánicos y sistemas industriales que lo requieran. En Fig. 2.2 se presentan los componentes electrónicos y la computadora utilizada, y en Fig.2.3 se muestra la estructura electromecánica de los bancos de pruebas para motores de inducción.

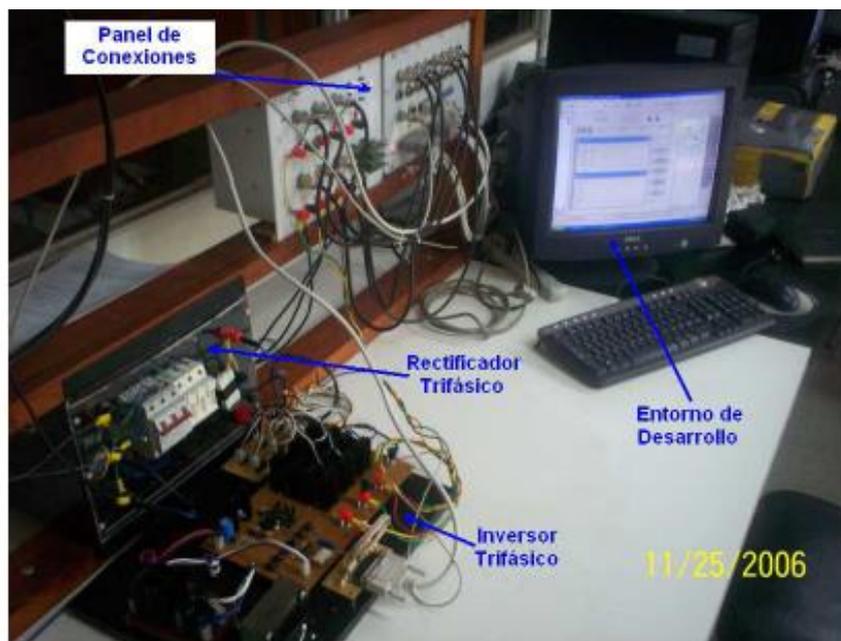


Fig. 2.2 Componentes electrónicos y PC del banco de pruebas



Fig. 2.3 Estructura electromecánica del banco de pruebas para motores de inducción.

La universidad de Guadalajara en su división de Ingeniería cuenta con un banco de pruebas con el sistema Ward Leonard, el cual es utilizado para la variación de velocidad en motores de corriente continua de excitación independiente.

Consiste en un motor asíncrono trifásico que lleva acoplado mecánicamente un generador de DC de excitación separada cuyo ajuste permite obtener diferentes tensiones de salida en escobillas. El generador alimenta posteriormente el inducido de un motor de c.c. con excitación independiente. Para motores eléctricos trifásicos de corriente alterna (AC). La parte motriz para pruebas consta de 4 motores; 2 de 3 hp trifásicos de marca Siemens, y 2 motores de 3 hp monofásicos marca Baldor, acoplados en pares.

En la siguiente sección, puesto que los bancos de pruebas utilizados en las fábricas son considerados de manera especial como se mencionó anteriormente, se realiza una comparativa entre los modelos más completos encontrados en laboratorios. Por otro lado se enuncian las características principales de los utilizados en las líneas de producción, para tener un modelo de referencia.

2.2 Sistemas para la prueba de motores eléctricos

2.2.1 Sistema Elektra

El banco de ensayo Elektra (ver Fig. 2.4) es un instrumento hardware/software innovador y completo para las pruebas de motores eléctricos síncronos, asíncronos, en DC.

Mediante una interfaz gráfica sencilla e intuitiva el banco puede funcionar en modo manual o automático, ejecutando ciclos predefinidos en memoria y monitoreando en tiempo real los parámetros eléctricos de tensión, corriente, potencia, ángulo de fase, además de todos los parámetros mecánicos. Las pruebas nominales que puede llevar a cabo son: pruebas de carga, determinación del diagrama par/potencia, de arranque, en vacío, con rotor bloqueado de servicio entre otras.

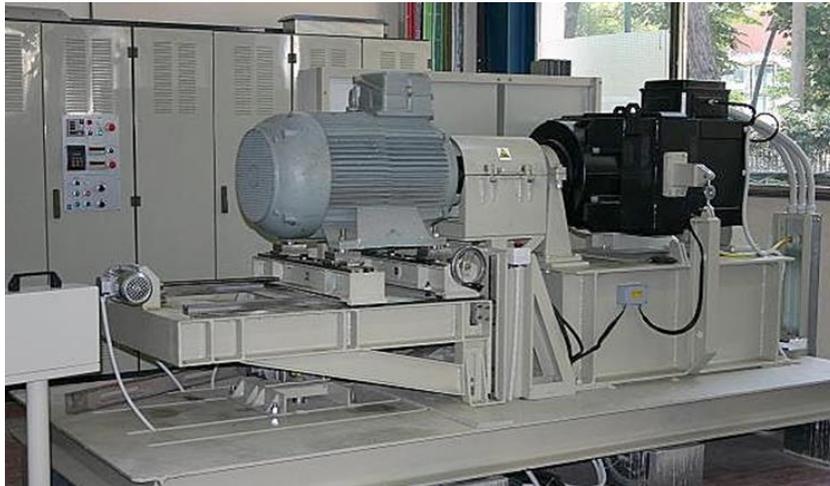


Figura 2.4 Banco de pruebas Elektra.

2.2.2 Banco de pruebas de la Universidad de Oviedo

El Grupo de Investigación en el Diagnóstico de Máquinas e Instalaciones Eléctricas de la Universidad de Oviedo, cuenta con un sistema de pruebas para motores eléctricos desarrollado por Vibrometer (Suiza) con capacidad de hasta 11 KW. La Instrumentación empleada es analógica y la técnica de frenado del motor emplea polvo magnético, con esto tiene la capacidad de generar cargas variables. Para la medición del par se utiliza una celda de carga y un encoder para la medición de velocidad. Como los otros modelos presentados anteriormente, éste sistema es desarrollado para aplicaciones de laboratorio. En Fig. 2.5 se muestra el sistema de pruebas de laboratorio.

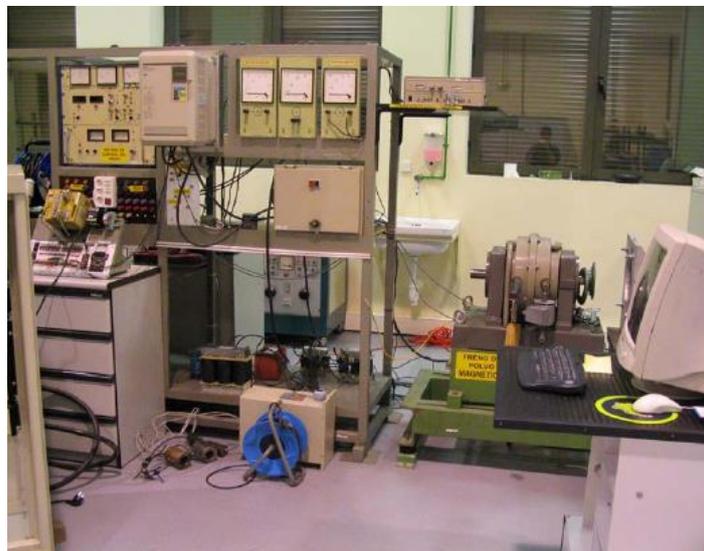


Figura 2.5 Banco de pruebas de la Universidad de Oviedo.

2.2.3 Sistema MTS 3800 de Automation Technologies

Uno de los sistemas más completos del mercado es el MTS 3800 de Automation Technologies, éste está diseñado para realizar pruebas muy completas en laboratorio. Esto implica que es casi imposible encontrarlo en las líneas de producción. Sin embargo, resulta importante analizar las funciones y aplicaciones que tiene el equipo.

El método de prueba de torque (DIGITORQUE) es catalogado como un principio básico de la Física: el torque aplicado a una masa rotativa de una inercia conocida puede

ser calculado por medio de la medición del cambio en la velocidad a través de un periodo fijo de tiempo.

$$\text{Torque} = \text{Carga inercial} \times \text{Aceleración}$$

O

$$\text{Torque} = \frac{\text{Carga inercial} \times \text{Cambio en velocidad}}{\text{Tiempo}}$$

Generalmente, esta fórmula es utilizada para determinar el torque requerido de un motor para acelerar una carga inercial desde velocidad cero a velocidad plena en un tiempo finito. El DIGITORQUE utiliza esto para estimar el torque aparente.

En un sistema de pruebas en donde se emplea el DIGITORQUE, el motor bajo prueba es mecánicamente conectado al sistema de pruebas a través de un acoplamiento mecánico consistiendo principalmente de una flecha rotatoria soportada sobre rodamientos de alta calidad (baja fricción) y un volante inercial de parámetros estándar como elemento de medición un encoder de alta resolución montado sobre la flecha. El volante inercial es usado como una carga. Este tiene un valor constante en la ecuación mencionada anteriormente. El intervalo de tiempo medido es también un valor fijo generado por un cristal oscilador. Este tiempo es el transcurrido en un ciclo de corriente alterna de línea. Por lo tanto, el único parámetro remanente requerido para calcular el torque es el cambio en la velocidad.

El cambio de velocidad es determinado a través del encoder industrial, junto con la electrónica de soporte es capaz de determinar cambios extremadamente pequeños de velocidad. El torque y la velocidad son calculados utilizando este método para cada ciclo de corriente alterna desde que la alimentación es aplicada al motor hasta que ésta alcanza su máxima velocidad sin carga. El tamaño del volante inercial es seleccionado de tal forma que toma cerca de 4 segundos para que el motor acelere hasta que su velocidad sea constante. Durante este periodo se realizan aproximadamente 480 mediciones de torque y velocidad. Esto es más que suficiente para obtener precisión en la estimación del torque contra la velocidad.

La potencia del motor y su corriente son también medidos continuamente durante la prueba y ambos son graficados en conjunto con el torque y la velocidad. El sistema de prueba emplea un algoritmo para calcular el pico instantáneo de cada variable de interés.

El sistema también permite colocar límites para torque o velocidad de hasta 5 puntos de inflexión. En Fig. 2.6 se muestra el sistema completo de prueba.

Cabe mencionar que dentro de las características del equipo MTS 3800, éste utiliza tarjetas de adquisición de la firma comercial National Instruments conectadas en una computadora y por medio de un instrumento virtual el operador observa las características del dispositivo bajo prueba. El empleo de tarjetas de adquisición de datos incrementa el costo de un equipo de tal magnitud. Sin embargo, el refaccionamiento es fácil de encontrar en por lo menos 10 años después de su fabricación.



Figura 2.6. Sistema MTS 3800 de Automation technologies.

2.3 Comparativo entre los sistemas

Considerando las necesidades de pruebas en las plantas de producción y comparando modelos utilizados en laboratorios de investigación, laboratorios de pruebas industriales del rubro de calidad y producción, se determinan las funciones y tipos de pruebas óptimos para la industria en producción. En la Tabla 2.1 se muestra un comparativo entre el sistema de pruebas DIGILOAD propuesto en esta tesis y el sistema de pruebas MTS 3800 de la marca Automation Technology. Cabe mencionar que las pruebas que realiza en DIGILOAD son las requeridas por las normas para el proceso de certificación, por tanto, como se aprecia en la tabla comparativa, no se hacen pruebas de aislamiento ni de medición del torque el personal del departamento de calidad hace la medición manual con un técnico calificado.

La Tabla 2.1 nos muestra un comparativo entre el sistema de pruebas DIGILOAD y el sistema de pruebas MTS 3800 de la marca Automation Technology.

Característica	DIGILOAD	MTS 3800
Prueba de corriente con carga programable	SI	SI
Prueba de RPM con carga y sin carga	SI	SI
Prueba de sentido de Giro	SI	NO
Prueba de Torque	NO	SI
Prueba de Watts	SI	SI
Conteo de piezas probadas	SI	SI
Medición de voltaje de prueba	SI	SI
Prueba de Aislamiento	NO	SI
Torque programable	SI	SI
Alineación final del eje de salida	SI	NO
Carga de recetas por modelo	SI	SI
Creación de nuevas recetas	SI	SI

Tabla 2.1 Comparativo entre sistemas de prueba DIGILOAD y MTS3800

3. Marco teórico conceptual

En este capítulo se hace una breve descripción de las partes que integran un motor fraccional y la caja de engranes que conforma el módulo de transmisión. Se analiza la respuesta en el tiempo de un modelo representativo y se hace mención de la topología, construcción y rangos de operación de los motores antes mencionados. Se lleva a cabo el análisis de la respuesta transitoria en los motores ante una entrada escalón y una señal de rampa, esto en conjunto con la presentación del modelo matemático del motor de corriente continua y un breve experimento para un motor de corriente directa con transmisión.

También se presenta una descripción de las características de los periféricos, funcionamiento y ventajas del PLC; se describen los lenguajes de programación con los que se puede desarrollar la secuencia de trabajo en el PLC, y con éste el estudio de los diferentes tipos de programación. Se hacen los comentarios para la elección de la programación que cumplan con el mejor desempeño del sistema de pruebas de los motores fraccionarios. Y finalmente se hacen las consideraciones de los diferentes tipos de paneles de visualización, abordando las características de dichos paneles, así como el análisis, programación y esquemas de comunicación utilizados para llevar a cabo el desarrollo del proyecto.

3.1. Motores fraccionarios

Un motor eléctrico es esencialmente una máquina que convierte energía eléctrica en movimiento o trabajo mecánico, a través de medios electromagnéticos. De acuerdo con el tipo de corriente utilizada para su alimentación, se clasifican en: motores de corriente alterna y de corriente continua o directa. Atendiendo esto, los motores de corriente directa se subdividen en: de excitación independiente, serie, derivación (shunt en inglés) y compuesta. Por otro lado, los motores de corriente alterna se dividen en síncronos y asíncronos, dentro estos últimos encontramos los monofásicos y trifásicos.

En cuanto a los motores fraccionales también llamado motores universales, estos pueden definirse como “un motor de devanado del tipo serie que opera con aproximadamente la misma velocidad y potencia de salida, ya sea con corriente alterna o con corriente continua y aproximadamente el mismo voltaje.” Los motores fraccionarios se utilizan para aplicaciones en las cuales se pueda operar indistintamente con AC y DC, se construye para operar satisfactoriamente en AC a 60Hz y 220V o bien en DC. Su construcción es sencilla y con menor importe económico que el tipo serie. Dentro de las aplicaciones, se usa para pequeñas potencias, altas velocidades y son aquellos que entregan menos de 1 HP, prácticamente todos los motores usados en los electrodomésticos son de este tipo y van de un rango entre 1/20 HP a 3/4 de HP.

Los motores fraccionales con caja de engrane en CD y CA del caso de estudio de esta tesis, adoptan geometrías y dimensiones muy variadas los cuales se basan principalmente en familias que se clasifican por el modelo de la caja de engranes.

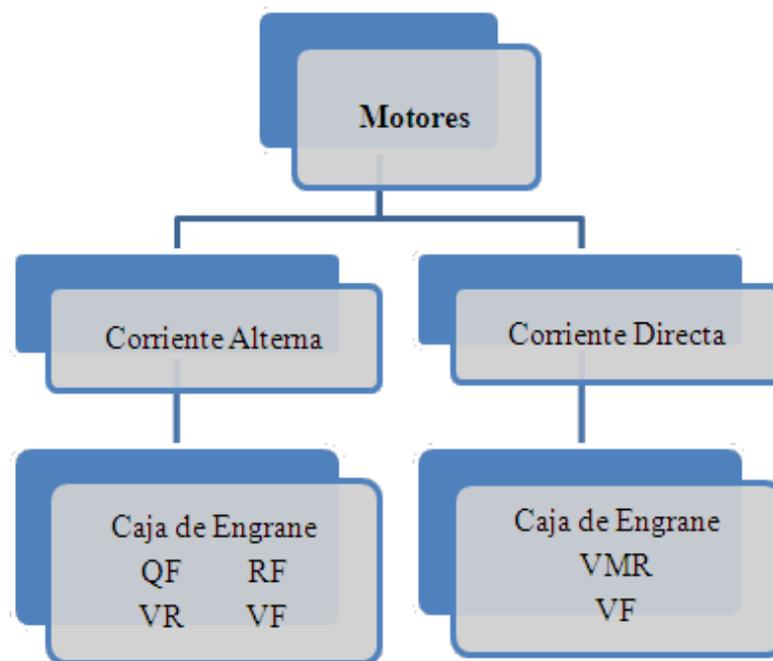


Figura. 3.1. Clasificación de motores.

Debido a que son muchos y variados los tipos de motores eléctricos que se fabrican en la planta patrocinadora sólo se presenta la información general con las características más usuales para cada una de las familias, ver fig. 3.1.

3.2 Motores de Corriente Alterna

Se diseñan dos tipos básicos de motores para funcionar con corriente alterna polifásica: los motores síncronos y los motores de inducción. El motor síncrono (ver Fig. 3.2) es en esencia un alternador trifásico que funciona a la inversa. Los imanes del campo se montan sobre un rotor y se excitan mediante corriente continua, y las bobinas de la armadura están divididas en tres partes y alimentadas con corriente alterna trifásica. La variación de las tres ondas de corriente en la armadura provoca una reacción magnética variable con los polos de los imanes del campo, y hace que el campo gire a una velocidad constante, que se determina por la frecuencia de la corriente en la línea de potencia de corriente alterna.

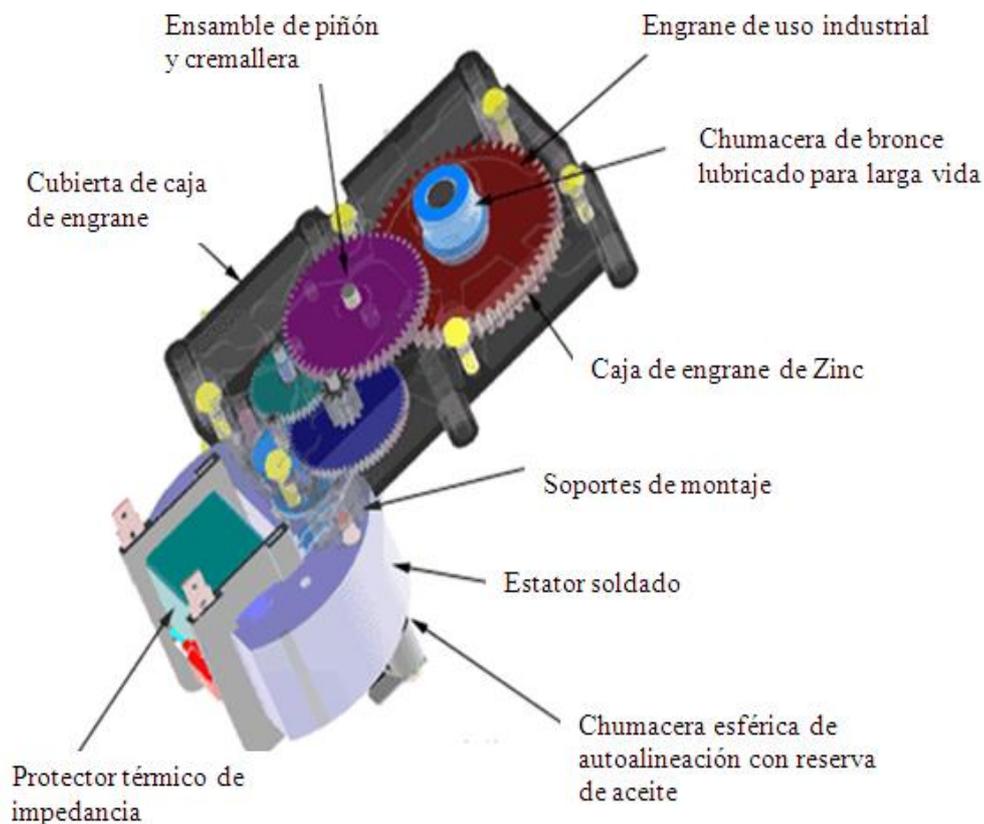


Figura 3.2. Construcción típica de un motor de AC con caja de engranes.

La velocidad constante de un motor síncrono es ventajosa en ciertos aparatos. Sin embargo, no pueden utilizarse este tipo de motores en aplicaciones en

las que la carga mecánica sobre el motor llega a ser muy grande, ya que si el motor reduce su velocidad cuando está bajo carga puede quedar fuera de fase con la frecuencia de la corriente y llegar a pararse. Los motores síncronos pueden funcionar con una fuente de potencia monofásica mediante la inclusión de los elementos de circuito adecuados para conseguir un campo magnético rotatorio

Entre los motores de corriente alterna hay una gran variedad, entre ellos tres tipos básicos: el universal, el síncrono y el de jaula de ardilla. Nosotros nos enfocaremos en los motores universales, estos se distinguen por su conmutador devanado y las escobillas. Los componentes de este motor son: Los campos (estator), la masa (rotor), las escobillas (los excitadores) y las tapas (las cubiertas laterales del motor). El circuito eléctrico es muy simple, tiene solamente una vía para el paso de la corriente, porque el circuito está conectado en serie. Su potencial es mayor por tener mayor flexibilidad en vencer la inercia cuando está en reposo, o sea, tiene un par de arranque excelente, pero tiene una dificultad, y es que no está construido para uso continuo o permanente.

Otra dificultad de los motores universales son las emisiones electromagnéticas. Las chispas del colector (chisporroteos) junto con su propio campo magnético generan interferencias o ruido en el espacio radioeléctrico. Esto se puede reducir por medio de los condensadores de paso, de 0,001 μF a 0,01 μF , conectados de las escobillas a la carcasa del motor y conectando ésta a masa. Estos motores tienen la ventaja de que alcanzan grandes velocidades pero con poca fuerza. Existen también motores de corriente alterna trifásica que funcionan a 380 V y a otras tensiones.

3.3 Motores de corriente directa

En un motor de corriente continua tenemos que si una armadura gira entre dos polos de campo fijos, la corriente en la armadura se mueve en una dirección durante la mitad de cada revolución, y en la otra dirección durante la otra mitad. Para producir un flujo constante de corriente en una dirección, o continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. Los generadores modernos de corriente continua utilizan armaduras de tambor, que suelen estar formadas por un gran número de bobinas

agrupadas en hendiduras longitudinales dentro del núcleo de la armadura y conectadas a los segmentos adecuados de un conmutador múltiple. Si una armadura tiene un solo circuito de cable, la corriente que se produce aumentará y disminuirá dependiendo de la parte del campo magnético a través del cual se esté moviendo el circuito. Un conmutador de varios segmentos usado con una armadura de tambor conecta siempre el circuito externo a uno de cable que se mueve a través de un área de alta intensidad del campo, y como resultado la corriente que suministran las bobinas de la armadura es prácticamente constante. Los campos de los generadores modernos se equipan con cuatro o más polos electromagnéticos que aumentan el tamaño y la resistencia del campo magnético. En algunos casos, se añaden interpolos más pequeños para compensar las distorsiones que causa el efecto magnético de la armadura en el flujo eléctrico del campo.

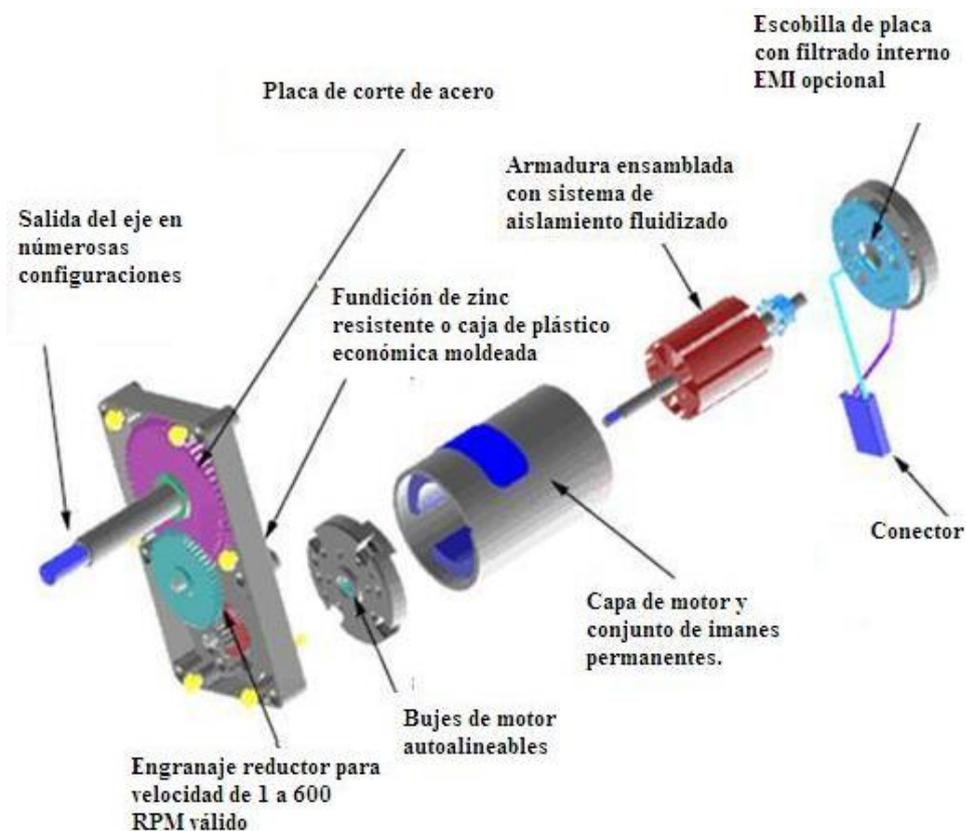


Figura 3.3. Construcción típica de un motor de CD con caja de engranes.

En general, los motores de corriente continua son similares en su construcción a los generadores. De hecho podrían describirse como generadores que funcionan al revés. Cuando la corriente pasa a través de la armadura de un motor de corriente continua, se

genera un par de fuerzas por la reacción magnética, y la armadura gira. La acción del conmutador y de las conexiones de las bobinas del campo de los motores son exactamente las mismas que usan los generadores. La revolución de la armadura induce un voltaje en las bobinas de ésta. Este voltaje es opuesto en la dirección al voltaje exterior que se aplica a la armadura, y de ahí que se conozca como voltaje inducido o fuerza contraelectromotriz. Cuando el motor gira más rápido, el voltaje inducido aumenta hasta que es casi igual al aplicado. La corriente entonces es pequeña, y la velocidad del motor permanecerá constante siempre que el motor no esté bajo carga y tenga que realizar otro trabajo mecánico que no sea el requerido para mover la armadura. Bajo carga, la armadura gira más lentamente, reduciendo el voltaje inducido y permitiendo que fluya una corriente mayor en la armadura. El motor puede así recibir más potencia eléctrica de la fuente, suministrándola y haciendo más trabajo mecánico.

Debido a que la velocidad de rotación controla el flujo de la corriente en la armadura, deben usarse aparatos especiales para arrancar los motores de corriente continua. Cuando la armadura está parada, ésta no tiene realmente resistencia, y si se aplica el voltaje de funcionamiento normal, se producirá una gran corriente, que podría dañar el conmutador y las bobinas de la armadura. El medio normal de prevenir estos daños es el uso de una resistencia de encendido conectada en serie a la armadura, para disminuir la corriente antes de que el motor consiga desarrollar el voltaje inducido adecuado. Cuando el motor acelera, la resistencia se reduce gradualmente, tanto de forma manual como automática.

La velocidad a la que funciona un motor depende de la intensidad del campo magnético que actúa sobre la armadura, así como de la corriente de ésta. Cuanto más fuerte es el campo, más bajo es el grado de rotación necesario para generar un voltaje inducido lo bastante grande como para contrarrestar el voltaje aplicado. Por esta razón, la velocidad de los motores de corriente continua puede controlarse mediante la variación de la corriente del campo.

3.3.1 Modelado matemático del motor de CD

Una vez descrito el motor de CD se realiza el modelado matemático del mismo para obtener la función de transferencia con la cual se calcula el torque aplicado a los motores de pruebas.

El motor se divide en dos partes principales: la parte eléctrica de la armadura y la parte mecánica. Tal como se ve en Fig. 3.4, la armadura se modela como un circuito con resistencia R conectada en serie a un inductor L ; una fuente de voltaje V , y constante K_b de fuerza contra electromotriz ($K = K_i = K_b$) en la armadura, donde K_i es la constante del par. La parte mecánica del motor es el rotor, el cual al estar en movimiento presenta momento de inercia J , un par torque T , un coeficiente de fricción viscosa b , una posición θ y una velocidad angular $b\dot{\theta} = \omega$.

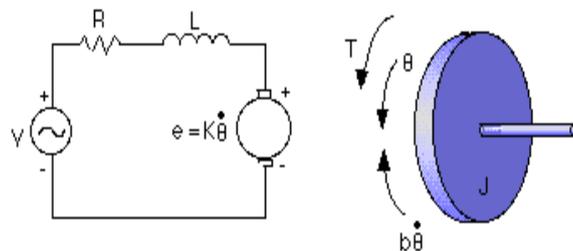


Figura 3.4. Modelo de un motor de cd.

La dinámica de la armadura se modela matemáticamente por la siguiente ecuación diferencial:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R i = V - K \frac{d\theta}{dt} \quad (3.1)$$

De manera análoga, se modela la dinámica del rotor.

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = K i \quad (3.2)$$

La función de transferencia del motor se encuentra dada en términos de la transformada de Laplace y se obtiene relacionando las ecuaciones anteriores como un sistema de ecuaciones diferenciales.

$$s(Js+b)\theta(s) = KI(s) \quad (3.3)$$

$$(Ls+R)I(s) = V - Ks\theta(s) \quad (3.4)$$

La función de transferencia del motor obtenida es la siguiente:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{JLs^2 + (Lb+RJ)s + Rb + K^2} \quad (3.5)$$

La función de transferencia se representa como un diagrama de bloques tal y como se muestra en Fig. 3.5.

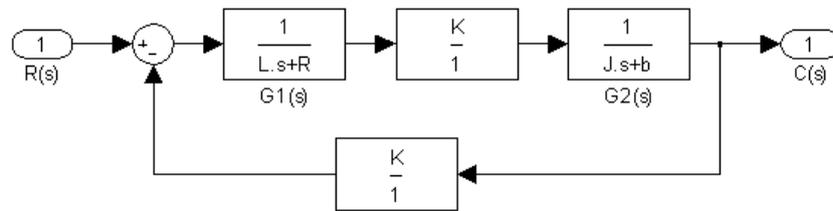


Figura 3.5. Diagrama de bloques de un motor de cd.

3.3.2 Análisis transitorio de la respuesta del motor de cd

Como se apreció en la sección anterior, el motor se representa por un sistema de segundo orden. Sin embargo, el siguiente análisis para el motor de C.D. se considera como un sistema de primer orden. Esto debido al incremento del coeficiente de fricción del sistema por la caja de transmisión. Este punto de vista es validado experimentalmente en la sección 5.

Se dice que un sistema se somete a una señal de entrada en escalón en el instante inicial $t=0$, si en dicho instante se somete el sistema a una variación brusca de la señal de entrada permaneciendo ésta en un valor $u(t) = \text{constante}$. En la Fig. 3.6 se representa una señal de entrada de esta forma. Si se supone que $y(0) = \xi$, $u = 1$, y teniendo en cuenta la ecuación diferencial de primer orden ante una señal de entrada $u(t)$, se tendrá,

$$y(t) = e^{-at} \left[\xi + \frac{a}{b} (e^{at} - 1) \right] = e^{-at} \xi + \frac{b}{a} (1 - e^{at}) \quad (3.6)$$

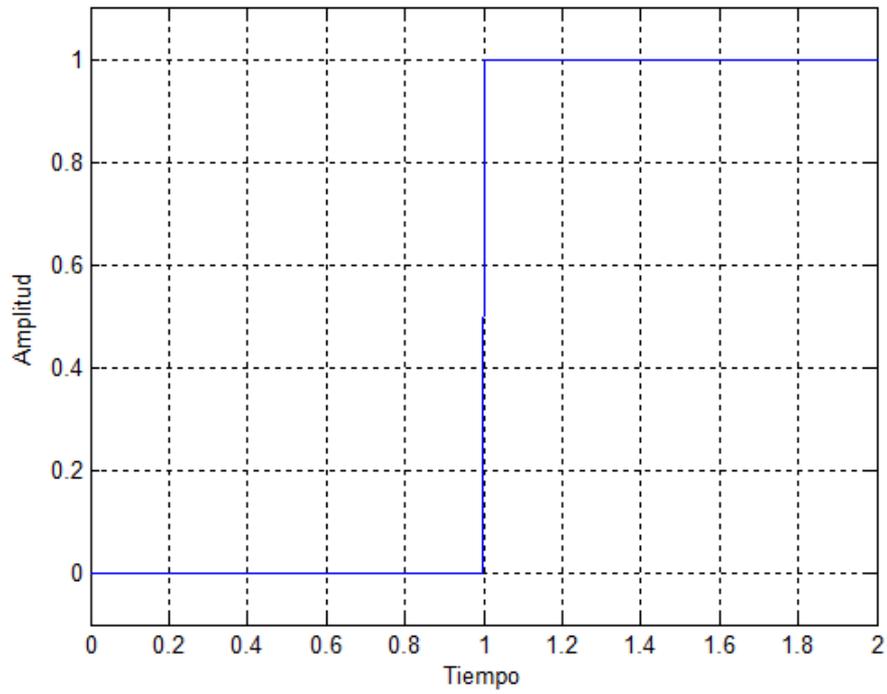


Figura 3.6. Entrada en escalón

En la Fig. 3.7 se representa la respuesta de un sistema lineal de primer orden a una entrada en escalón.

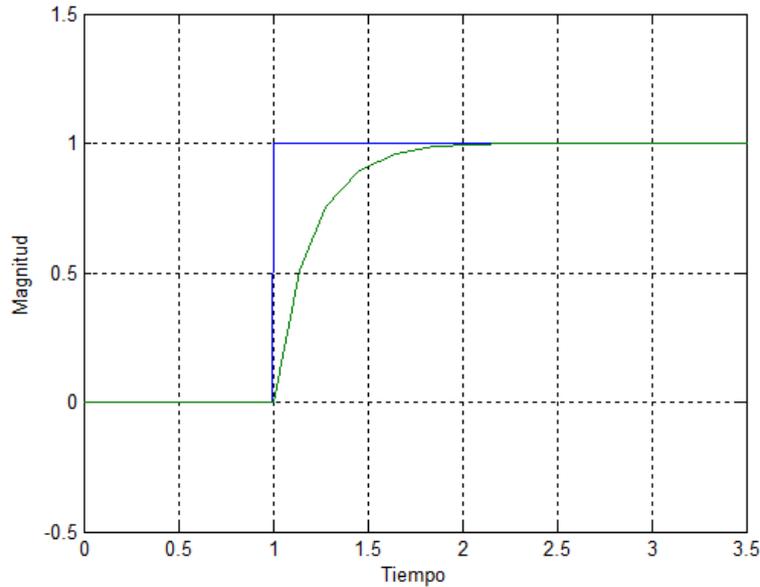


Figura 3.7: Respuesta al escalón

Para estudiar la respuesta en el tiempo de un sistema lineal de primer orden a una entrada en escalón, es interesante escribir la ecuación diferencial de primer orden de la forma siguiente:

$$\tau \frac{dy}{dx} + y = Ku \quad (3.7)$$

En donde $\tau=1/a$ y $K = b/a$. Si se supone además, para simplificar, que $\xi = 0$ se tendrá que la expresión (3.7) se puede escribir,

$$y(t) = K(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.8)$$

La constante K recibe la denominación de ganancia estática del sistema, puesto que representa la relación entre la señal de salida $y(t)$ y la señal de entrada $u(t)$ para $t \rightarrow \infty$. La constante τ que tiene una dimensión de tiempo, se llama constante de tiempo del sistema. Para el caso del motor, la entrada $u(t)$ es el voltaje aplicado a la armadura y la salida $y(t)$ son las revoluciones por minuto medidas en la flecha de la caja de engranes.

La solución de la ecuación (3.8) puede obtenerse de una forma más sencilla empleando la transformada de Laplace. En efecto, la ecuación diferencial de un sistema de primer

orden viene dada por la expresión (3.7), y puesto que la transformada de Laplace de una señal escalón es:

$$U(s) = \frac{1}{s} \quad (3.9)$$

Se tiene que la de la señal de salida será,

$$Y(s) = \frac{K}{s(1+\tau s)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{1+\tau s} \quad (3.10)$$

Las constantes A y B resultan ser:

$$A = \frac{K}{(1+\tau s)} \Big|_{s=0} = K \text{ y } B = \frac{K}{s} = -K\tau \quad (3.11)$$

Con lo que se tiene Y(s), cuya transformada inversa de Laplace resulta ser:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1} [Y(s)] = K(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.12)$$

En la figura 3.8 se representa la respuesta a una entrada en escalón de un sistema de primer orden de ganancia K y constante de tiempo τ .

La constante de tiempo τ caracteriza la velocidad de respuesta del sistema, es decir, la duración del régimen transitorio. Ello se pone en evidencia por las dos consideraciones siguientes.

1. Existe una relación entre la constante de tiempo y la tangente $y(t)$ en el origen. En efecto, de la expresión (3.8) se tiene,

$$\frac{dy}{dt} = \frac{K}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (3.13)$$

Haciendo $t=0$ se tiene,

$$\frac{dy}{dt}(0) = \frac{K}{\tau} \quad (3.14)$$

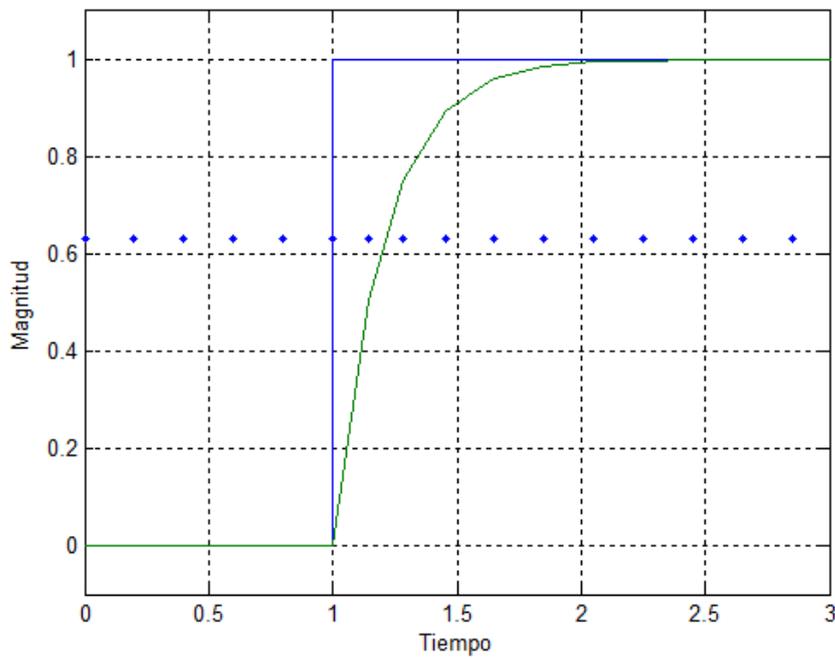


Figura 3.8: Respuesta a un escalón unitario de un sistema de primer orden de ganancia K y de constante de tiempo τ .

Lo cual puede interpretarse tal como se hace en la figura 3.9. Recuérdese que se ha hecho $u=1$.

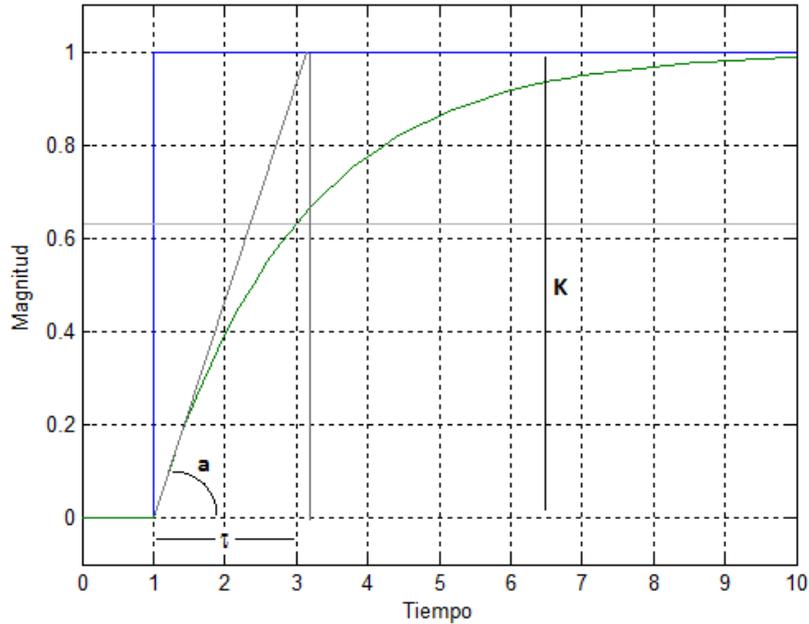


Figura 3.9: Relación constante amplificación y tangente.

- Haciendo $t = \tau$ se tiene que la constante de tiempo es el tiempo al cabo del cual la señal de respuesta alcanza la fracción

$$1 - \frac{1}{e} \approx 0.632 \approx \frac{2}{3} \quad (3.15)$$

Del valor final (figura 3.10).

Observando la figura 3.8 se tiene que la respuesta de un sistema de primer orden en una entrada en escalón, alcanza su valor final con un error menor del 5% para un tiempo 3τ .

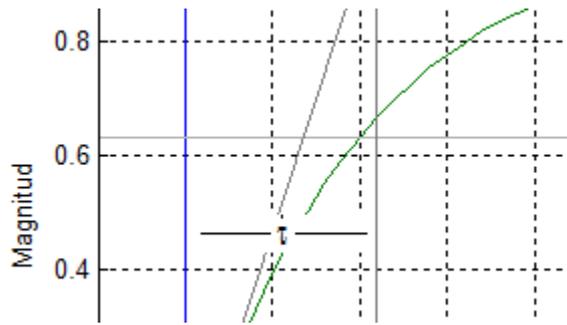


Figura 3.10: Relación constante de tiempo y amplificación.

En la figura 3.11 se representan las señales de respuesta a una entrada en escalón para distintos sistemas lineales con diferentes constantes de tiempo.

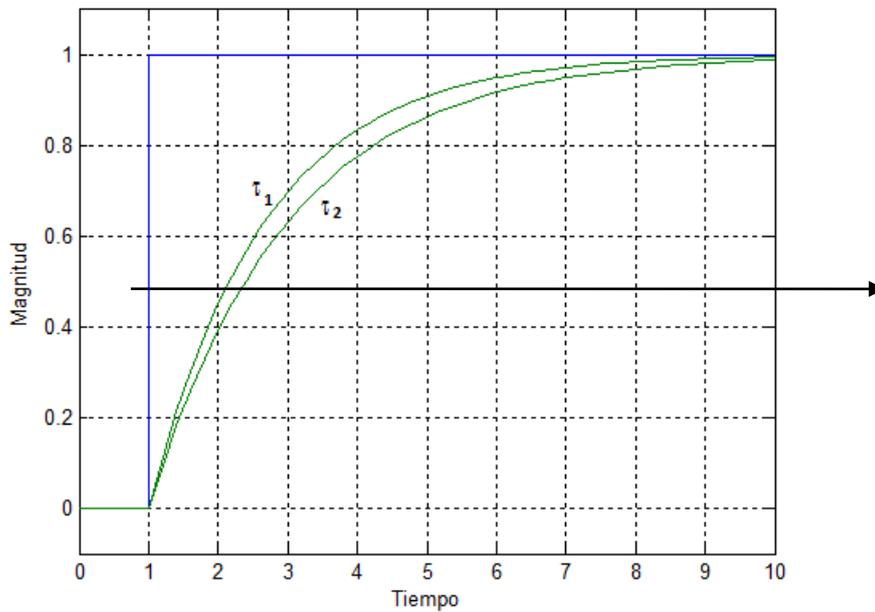


Figura 3.11: Diferentes constantes de tiempo.

En la práctica se presenta el problema de determinar el modelo matemático de un sistema a partir del conocimiento de la respuesta del sistema a una entrada en escalón. En el caso de un sistema de primer orden, la determinación de los parámetros K y τ que aparecen en la ecuación diferencial (3.8), resulta extremadamente sencilla a partir de la respuesta del sistema a una entrada en escalón. En efecto de acuerdo con la figura 3.9 el valor de la constante de tiempo τ se determina midiendo la abscisa correspondiente a la ordenada

que sea el 63.2% del valor alcanzado por la respuesta en régimen estacionario y la amplitud de la entrada escalón.

Señal de entrada en rampa.

Supóngase una señal de entrada en rampa, es decir, una señal de entrada cuyos valores crecen lineal con el tiempo, $u=\omega t$, tal como se representa en la figura 3.9. Se supondrá además para simplificar, que $\xi = 0$. De acuerdo con la expresión de una ecuación diferencial se tiene que,

$$y(t) = wbe^{-at} \int_0^t e^{a\tau} \tau d\tau = \frac{wb}{a} \left(t - \frac{1}{a} + \frac{e^{-at}}{a} \right) \quad (3.16)$$

Esta última expresión introduciendo la ganancia K y la constante de tiempo τ , puede escribirse,

$$y(t) = wK \left(t - \tau + \tau e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3.17)$$

Este mismo resultado se puede obtener con ayuda de la transformada de Laplace. En efecto, para el caso de una entrada en rampa, se tiene

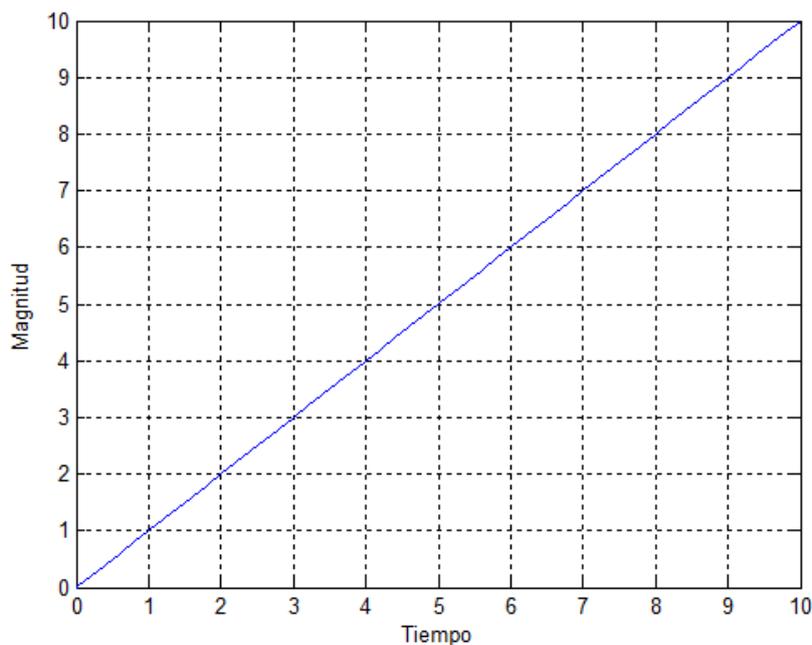


Figura 3.12. Entrada en rampa.

$$U(s) \frac{\omega}{s^2} \quad (3.18)$$

Con lo que,

$$Y(s) = \frac{\omega K}{s^2(1+\tau s)} = \frac{A_1}{s^2} + \frac{A_2}{s} + \frac{B}{1+\tau s} \quad (3.19)$$

Siendo,

$$A_1 = \frac{1}{0!} \left[\frac{\omega K}{(1+\tau s)} \right] = \omega K \quad (3.20)$$

$$A_2 = \frac{1}{1!} \left[\frac{d}{ds} \frac{\omega K}{(1+\tau s)} \right] = -\tau \omega K \quad (3.21)$$

$$B = \left[\frac{\omega K}{s^2} \right] = \omega K \tau^2 \quad (3.22)$$

De donde se desprende que $y(t)$ tendrá la forma (3.23).

En la expresión (3.21) se observa que el tercer término del paréntesis del segundo miembro tiende a cero cuando el tiempo tiende a infinito. Este término constituye el régimen transitorio de la respuesta total. Una vez desaparecido el régimen transitorio, la respuesta en régimen permanente será,

$$y_{rp}(t) = \omega K(t - \tau) \quad (3.23)$$

Para interpretar esta respuesta cabe distinguir dos casos:

1. $K = 1$. En tal caso se tiene que la respuesta viene dada por

$$y_{rp}(t) = \omega(t - \tau) \quad (3.24)$$

Es decir, en el instante t la salida es igual a la entrada en el instante $t - \tau$. La salida se encuentra retardada τ segundos con respecto a la entrada. En la figura 3.13 se representa la expresión (3.24) para $K = 1$. Se observa en esta figura cómo la señal de salida se encuentra retardada con respecto a la señal de entrada. El error en régimen permanente es igual a $\omega\tau$. Este error recibe la denominación de error de arrastre.

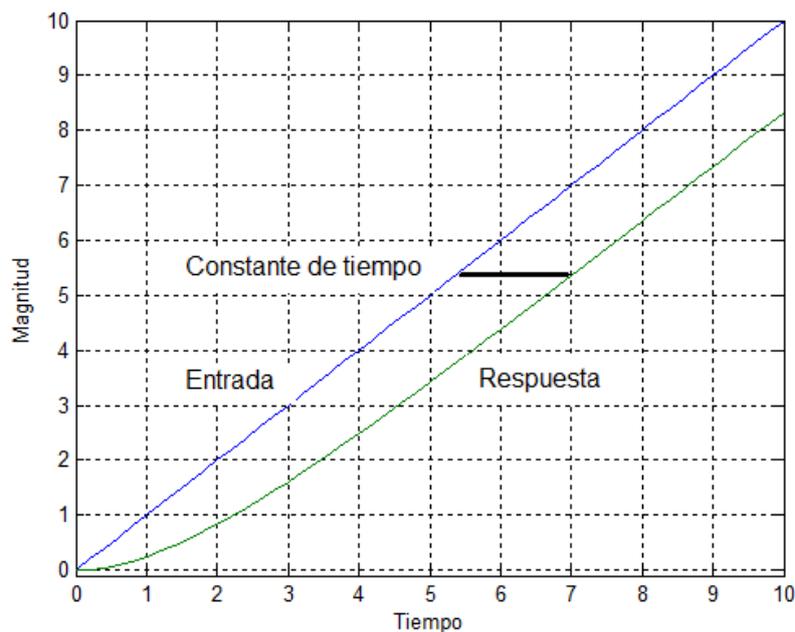


Figura 3.13: Respuesta a rampa.

Respecto al régimen transitorio se tiene que para $t = \tau$

$$y(\tau) = \frac{K\omega\tau}{e} \approx \frac{K\omega\tau}{3} \quad (3.25)$$

Es decir, que el sistema ha respondido sólo en un tercio del valor alcanzado por la señal de entrada. En la figura 3.13 se interpreta este resultado.

La consideración del error de arrastre en la respuesta de un sistema de primer orden, es sumamente importante en ciertos casos como por ejemplo cuando el sistema en cuestión es un aparato de medida. Supóngase un globo en el que se encuentra un termómetro de mercurio. Se supone que la temperatura varía linealmente con la altura; se tiene entonces que el termómetro se encuentra sometido a una señal de entrada en rampa. Las lecturas del termómetro, según las consideraciones anteriores, presentan un error de arrastre.

2. $K \neq 1$. La salida y entrada divergen, por lo que el error de arrastre se hace infinito.

3.4 Validación experimental de la respuesta del motor de CD.

Las ecuaciones antes descritas para modelar los motores, son representativas de los sistemas de segundo orden donde el valor la constante de amortiguamiento que se encuentra hace que el sistema se comporte como sobre amortiguado. Cabe mencionar que los resultados experimentales indican que el motor con la transmisión tiene un comportamiento similar al de un sistema de primer orden. En Fig. 3.14, se muestran las gráficas de respuesta de dos tipos motores representativos a evaluar. En la gráfica se aprecia el efecto de histéresis provocado por los efectos de inercia en el sistema.

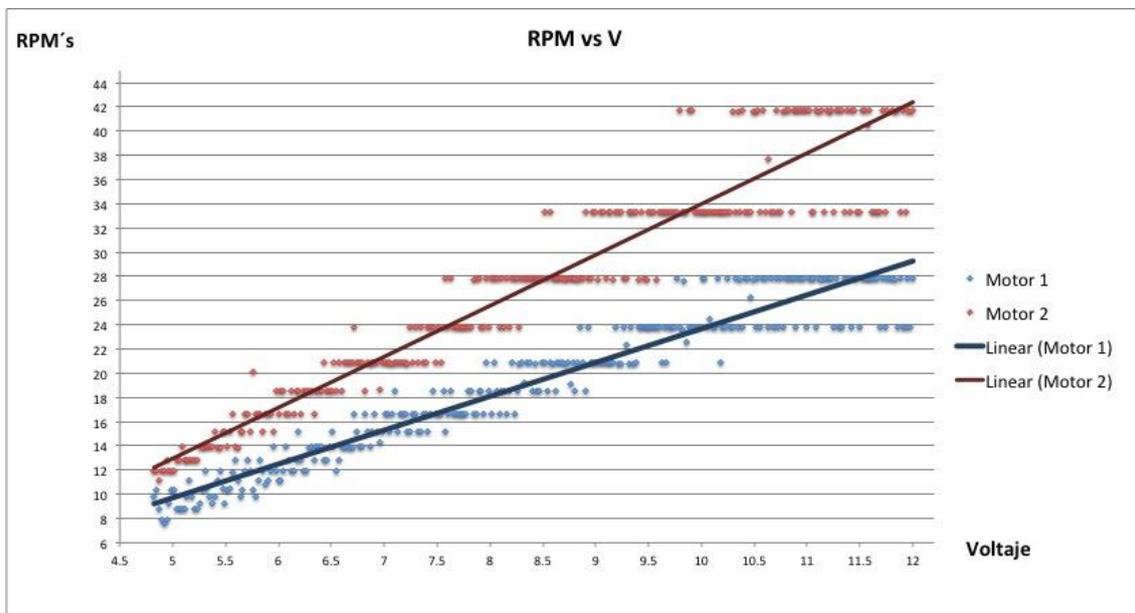


Figura 3.14. Grafica de respuesta de motores de CD con transmisión.

Posterior a obtener las respuestas del motor, se procedió a generar un modelo representativo en el ámbito de Laplace. Para esto, se implementó el algoritmo de mínimos cuadrados para estimar los parámetros del sistema. El resultado experimental dio como resultado la siguiente función de transferencia.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{u(s)} = \frac{743}{s^2 + 65s + 750} \quad (3.26)$$

El resultado de la simulación puede apreciarse en Fig. 3.15. Tal como se comentó, la respuesta aparente es de un sistema de primer orden. Esto debido a las condiciones antes mencionadas.

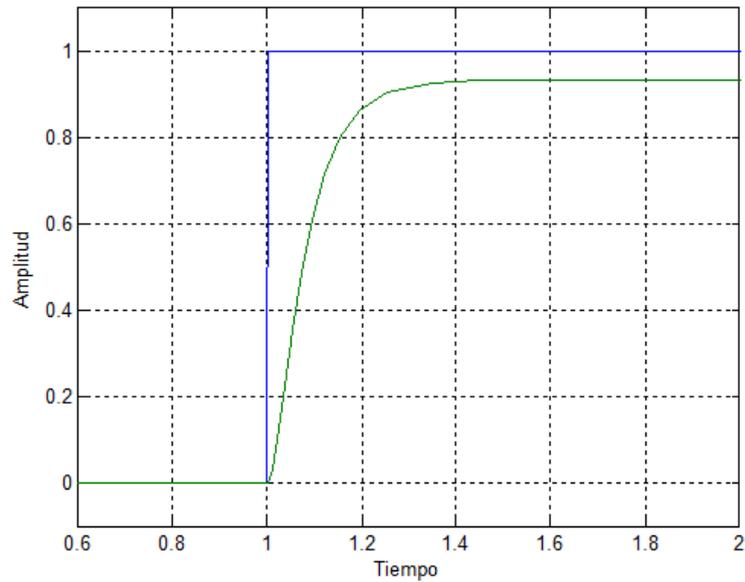


Figura 3.15. Simulación de la respuesta del motor con transmisión.

3.5 Caja de engranes

La elaboración del prototipo con material de bajo costo, en relación a los que encontramos en el mercado fue uno de los puntos clave para continuar con el desarrollo del sistema; la mejora del proceso de producción en cuanto a la reducción de tiempos de trabajo hace de éste, un proyecto prometedor para industria encargada de la fabricación de motores fraccionarios.

4. Diseño del Sistema DIGILOAD

4.1 Parámetros de Diseño

Para obtener productos y equipos de calidad, debemos asegurar su calidad desde el momento de su diseño. Un producto o equipo de calidad es el que satisface las necesidades del cliente, por esto, para desarrollar y fabricar un producto de calidad es necesario conocer las necesidades del cliente, en las Tablas 4.1 y 4.2 se muestran los requerimientos para cada tipo de motor.

Motores de CA								
Voltaje CA		RPM		Corriente Amps		Torque lbs-ft		Giro
Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	
24.0	230.0	0.80	260.0	0.15	3.80	0	100	CW / CCW

Tabla 4.1 Requerimientos para Motores de Corriente Alterna

Motores de CD								
Voltaje CD		RPM		Corriente Amps		Torque lbs-ft		Giro
Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	
12.0	90.0	2.0	300.0	0.10	3.00	0	120	CW / CCW

Tabla 4.2 Requerimientos para Motores de Corriente Directa

4.2 Características específicas del sistema

Una vez obtenidos los requerimientos del cliente para la prueba de los motores en la sección anterior, es posible implementar un plan de acción para el diseño y fabricación del sistema de pruebas con las características específicas que cubran dichos objetivos.

En la Fig. 4.1 se representa un diagrama general del sistema mencionado.

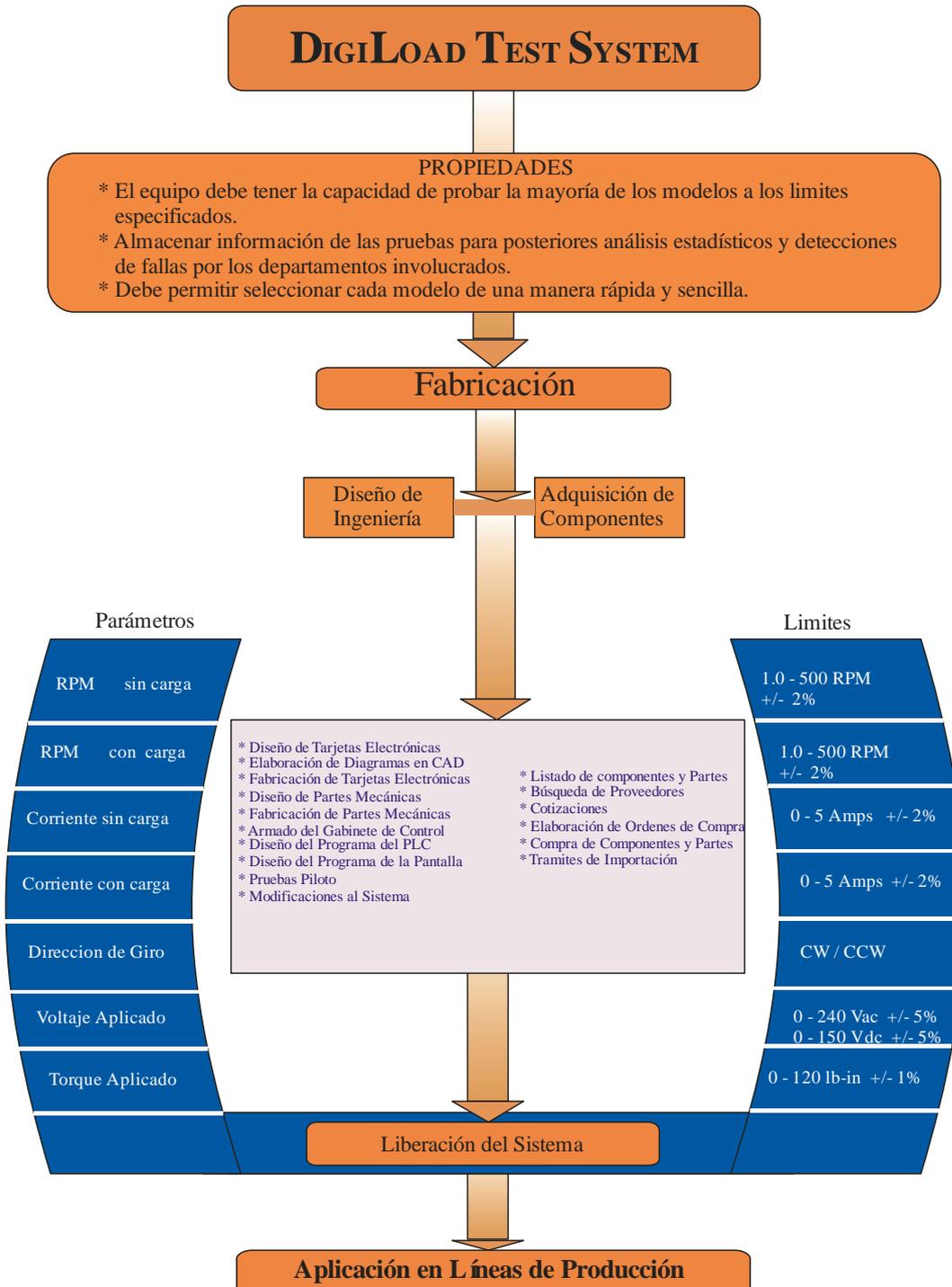


Fig. 4.1 Plan de acción general para la fabricación del sistema de pruebas.

En la Fig. 4.2 se muestra la estructura en bloques del sistema de pruebas de motores en donde se puede ver que los acondicionadores de señal juegan un papel relevante en el funcionamiento del equipo.

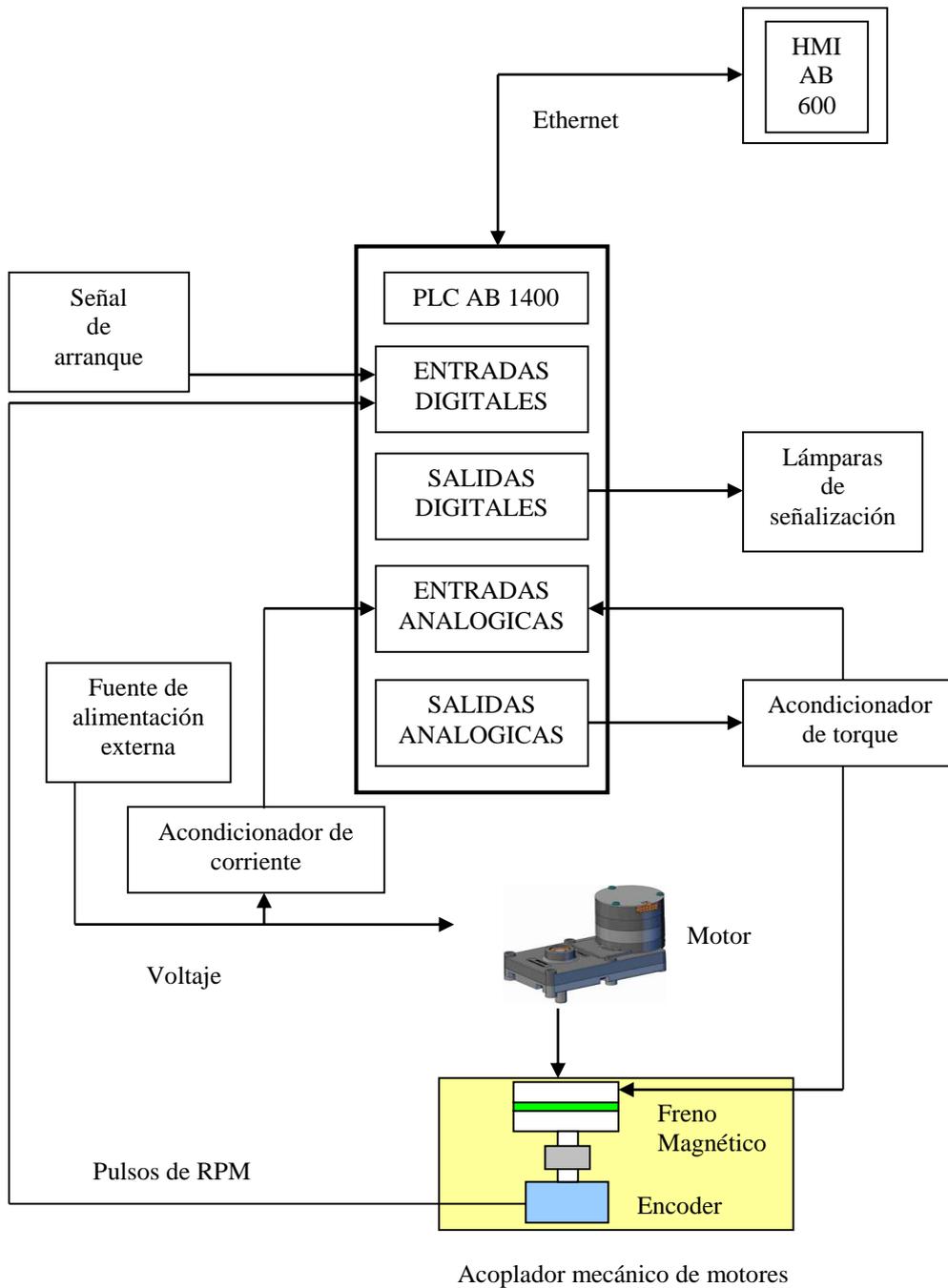


Fig. 4.2 Estructura general del sistema de pruebas.

4.3 Modularidad de DIGILOAD

4.3.1 PLC

Un controlador de lógica programable (PLC, por sus siglas en inglés) se describe como un mecanismo con capacidad de realizar las principales funciones lógicas necesarias para llevar a cabo un proceso, en base al programa memorizado y con un alto grado de flexibilidad. Es un computador diseñado para el entorno industrial. Fueron inventados para reemplazar a los circuitos de relevadores (relés) electromecánicos, interruptores y otros componentes comúnmente utilizados para el control de los sistemas de lógica combinatorial, es decir que cualquier situación que requiera dispositivos eléctricos y electrónicos de operación coordinada es una aplicación de control potencial para un PLC, ya que dentro de los dispositivos que pueden ser controlados se incluyen válvulas solenoides, luces, relés y motores entre otros.

Un controlador se considera como una de las primeras máquinas con lenguaje, es decir, que cuenta con un conjunto de instrucciones que se orientan hacia los sistemas de evolución secuencial. En los sistemas de lógica combinatorial el estado de una salida queda determinado por el estado de cierta combinación de entradas.

Las innovaciones tecnológicas en microprocesadores y memorias han hecho tan versátiles y populares a los PLC's, pues estos equipos pueden por lo tanto realizar operaciones aritméticas, manipulaciones complejas de datos, tienen mayores capacidades de almacenamiento y pueden comunicarse más eficientemente con el programador y con otros controladores y computadoras en redes de área local.

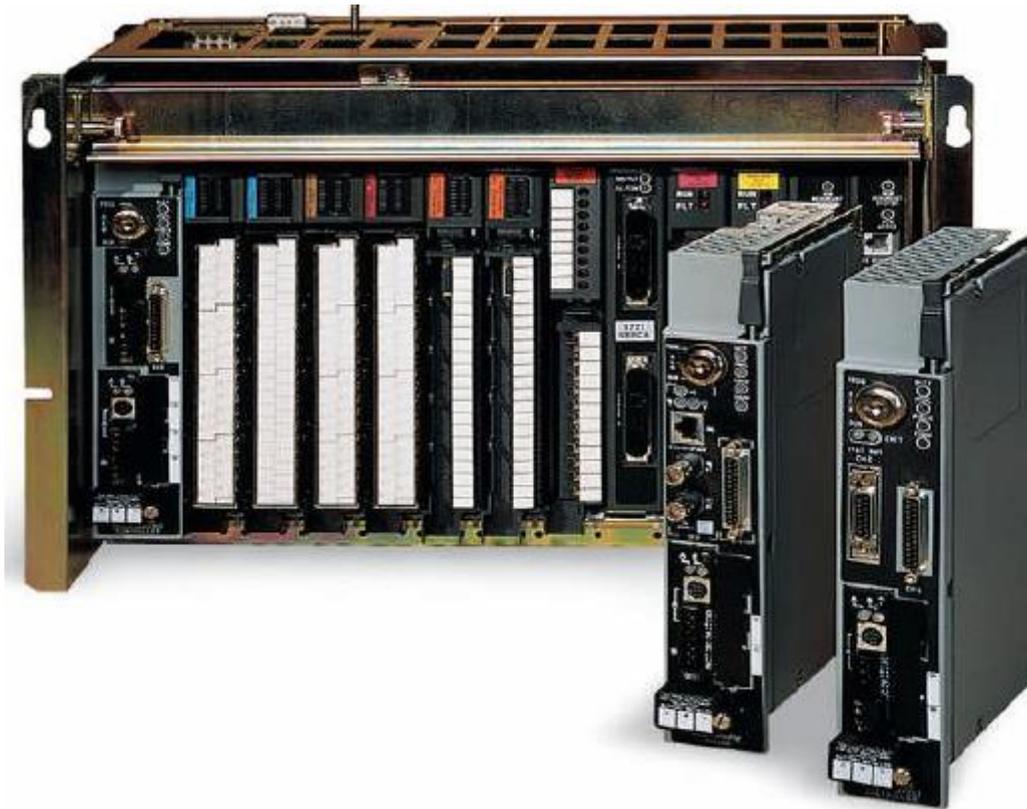


Fig. 4.3 PLC Allen-Bradley familia 5

Debido a la gran variedad de tipos distintos de PLC, tanto en sus funciones, en su capacidad, en su aspecto físico y otros, es que es posible clasificar los distintos tipos en varias categorías.

Podemos encontrar aquellos en los que generalmente se puede manejar un conjunto reducido de entradas y salidas, los llamados PLC tipo nano generalmente contienen un número inferior a 100 I/O, los de tipo compacto permiten manejar desde unas pocas I/O hasta varios cientos (alrededor de 500 I/O), su tamaño es superior a los Nano PLC y soportan una gran variedad de módulos especiales y los PLC tipo modular dentro de los cuales existen desde los denominados Micro PLC que soportan gran cantidad de I/O, hasta los PLC de grandes prestaciones que permiten manejar miles de I/O.

En un principio el sistema de pruebas se pensó para desarrollarse en base a un PLC OMRON, esto tuvo que cambiar debido a que por cuestiones de estandarización no era viable, por lo que se optó por usar un PLC ALLEN BRADLEY que cuenta con una amplia variedad en el mercado y posicionamiento en la industria, desde la familia MicroLogix, Compactos, y PLC modulares más complejos como uno de los más actuales modelos el MicroLogix 1400 que cuenta con salidas de contador a alta velocidad, con suficientes entradas y salidas con opción a expansión por módulos pensando en futuras implementaciones o mejoras, y que cumple con las necesidades del proyecto.



Una de las características importantes del PLC MicroLogix 1400 son sus periféricos, cuenta con una pantalla de LCD de Display, un panel de led donde se visualiza el estado del proceso, si está encendido o apagado, modo de error (default) o si se está forzando, también cuenta con un conjunto de botones seleccionadores que permiten la interacción en el display, conector de batería conexión de puerto RS-232, además de conexión inalámbrica de Ethernet el cual proporciona una capacidad de servidor Web, capacidad de correo electrónico y soporte para el protocolo DNP3. Fig. 4.4 PLC controladore MicroLogix 1400

Los primeros programadores utilizaban sistemas de programación propietario o terminales de programación especializados, que a menudo tenían teclas de funciones dedicadas que representaban los elementos lógicos de los programas de PLC. Anteriormente los programas eran almacenados en cintas, recientemente se guardaban en aplicaciones especiales en un ordenador, actualmente se descargan directamente en el PLC.

Para la configuración del MicroLogix se utilizan los paquetes de software de Rockwell Software RSLogix 500 y RSLogixMicro. En este caso nos apoyamos en el primero.

La forma de diagrama de escalera se realiza bajo la lógica de los esquemas eléctricos, el cual incluye contactos, bobinas y bloques de funciones. Actualmente es un lenguaje gráfico muy popular en la programación. Está basado en el establecimiento de circuitos de relevadores, este lenguaje está basado en renglones en los que se establecen las condiciones necesarias para tener una salida. Este tipo de programación se utiliza en gran manera en el control secuencial de un proceso u operación de manufactura.

La programación lógica de escalera permite maximizar el rendimiento, ahorrar tiempo de desarrollo y mejora la productividad. Se lleva a cabo mediante el programa estándar usado por la familia de los Allen Bradley el RSlogix500 mediante un tipo de programación escalera.

4.3.2 Panel de visualización HMI

La función de los paneles es la de facilitar la visualización del operario al sistema automatizado, realizando la interfaz Humano-Máquina. Lo que permite la operación y/o control de algunos elementos, de tal forma que se puedan ejecutar subrutinas o habilitar y deshabilitar equipos sin necesidad de abrir celdas o detener un proceso.

Algunas de las características con las que deben contar los equipos de operación son las de acceso rápido y sencillo a los datos del sistema, supervisión y control del proceso, la visualización del proceso, la modificación de parámetros y órdenes.

Los panel View de Allen Bradley proporcionan un poderoso procesamiento de datos compatibles tales como gráficas y manejo de expresiones, que permiten operar una aplicación bajo cualquier protocolo, y dependiendo de la aplicación se

debe considerar el tipo de alimentación que se suministrará (120Vac o 24Vdc); el tamaño y tipo de pantalla ya que generalmente los panel view pequeños son monocromáticos, mientras que los de mayor tamaño son a color; el tipo de comunicación que se desea, o el tipo de red con el que se va interactuar DH-485, RS-232, DH+, Control Net, Ethernet, DF1. Y el modo de operación, puede ser sensible al tacto o por medio de teclado.

Una de las grandes ventajas del panel View es que poseen una protección contra el ambiente sucio grado 2. Pueden ser montados en gabinetes para protección contra corto circuito y los rangos de temperatura son de 0 a 55°C.

La última generación de terminales panel view “e”, como las terminales 1200 y 1400, proporcionan una interface de operación rápida, fácil flexible y de bajo costo, para el sistema PLC. Este tipo de paneles están ensamblados y listos para instalarse en un recorte dentro de un gabinete o en un rack de 19”, puede conectarse a cualquier red de Allen Bradley, proporcionan una alta funcionalidad de desarrollo como HMI para grandes y complejas aplicaciones.

Podemos dividirlos en los de pantallas táctiles o de teclado, los cuales son configurados de la misma forma excepto por: diferentes configuraciones de botón y ciertos objetos de pantalla son especificados para terminales de teclado y otros para terminales táctiles.

Algunas de las características comunes en los Panes View son:

- Todos cuentan con una memoria independiente del PLC que es donde se guardan la aplicación, se ejecuta y puede guardarse ciertos parámetros, así como un procesador para ejecutar las operaciones básicas.
- La pantalla puede ser táctil o se puede contar con un teclado, desde sólo numérico al alfanumérico con abecedario y teclas de funciones.
- Puerto de comunicación, uno normalmente RS-232 para comunicación con la PC, para carga y descarga de aplicaciones, y uno más para el protocolo de comunicación que se desee emplear. (DH+, Ethernet, RIO, Profibus, etc.).

Con respecto a las terminales con teclado, cuenta con: 21 teclas de función determinada por el usuario, un teclado para introducir valores numéricos, teclas de cursor, de inicio, entrada, selección, cancelar, subir, bajar y espacio de retroceso.

Por otra parte las terminales táctiles panel view 600 plus usan pantallas táctiles resistivas analógicas. Esto permite que los objetos de entrada sean de cualquier tamaño (mínimo 40x40 pixeles), que equivale aproximadamente a un cuadro de 5x 5mm, y que sean puestos en cualquier lugar de la pantalla.



Fig. 4.5 Pantalla táctil HMI Panel View 600 Plus

Este tipo de equipo proporciona gran flexibilidad de diseño si se compara con otros equipos ya que no utilizan matriz táctil que requiere que los objetos sean alineados con la cuadrícula que poseen. Sin embargo como características específicas de estos panel view se puede decir:

- Tienen una expansión de mensajes incluidos 200 alarmas, 100 mensajes locales y 200 mensajes de información para proporcionar la información al operador.
- Tarjeta de memoria PCMCIA que puede ser usada para subir datos y salvar aplicaciones en archivos para usarse en una computadora personal. Ésta también permite almacenar y correr aplicaciones de hasta 64MB

- La sobre posición de objetos que permite el control de dispositivos tales como botones de pulso e indicadores mismos que están direccionados de manera directa a objetos a través de un mapa de bits de una máquina, haciendo un control de operación más intuitivo.

- Expresiones y operaciones que permiten manipular y evaluar datos, reduciendo al PLC direcciones y lógica.

- Las tendencias o graficas en las terminales panel view permiten el seguimiento de los datos de proceso específico durante tiempo y lo exhiba gráficamente en la pantalla como una línea o gráfico.

- Fácil migración de las terminales y no se requieren cambios en el programa del PLC ni en las redes de comunicación de entradas y salidas remotas.

- Un archivo de alarmas durante condiciones de avería se maneja a través de una ventana de alarmas, de la pantalla del estado de alarmas, y de la pantalla de la historia de alarmas. También se puede configurar un indicador audible. Un relé en la parte posterior del panel view se puede utilizar para activar el dispositivo.

- El puerto RS-232 permite imprimir el listado de alarmas o informes de pantalla.

4.3.3 Tarjetas electrónicas acondicionadoras de señal

Un acondicionamiento de señal se utiliza principalmente cuando se requiere tener una señal específica de salida dependiendo de una señal de entrada, es decir, cuando se tiene un rango de voltaje de entrada y se requiere tener un rango de voltaje de salida, para esto se realiza un arreglo con uno o varios amplificadores operacionales.

En muchas ocasiones, las señales que envían los sensores no son aptas para ser leídas por el controlador y en estos casos es necesario que un dispositivo entre ambos elementos que interprete las señales de entrada y las modifique de tal manera que el controlador las pueda usar. Estos dispositivos son los acondicionadores de señal.

Es posible que el problema esté entre el controlador y los actuadores, y la solución es exactamente la misma, pero en este caso se coloca el acondicionador de tal modo que transforme las señales de salida.

Hay una variedad de acondicionadores, puesto que no todas las señales requieren el mismo tratamiento; a veces se ha de amplificar o atenuar la señal, filtrarla, convertirla de corriente alterna a continua, de analógica a digital, etc.

En la figura 4.6 se muestra un esquemático a bloques de un acondicionador de señales donde el sistema central consta de amplificadores operacionales y éste cuenta con un ajuste donde se normaliza la salida al valor que deseamos, también se tiene una retroalimentación de la señal de salida para que sistema realice las correcciones necesarias.

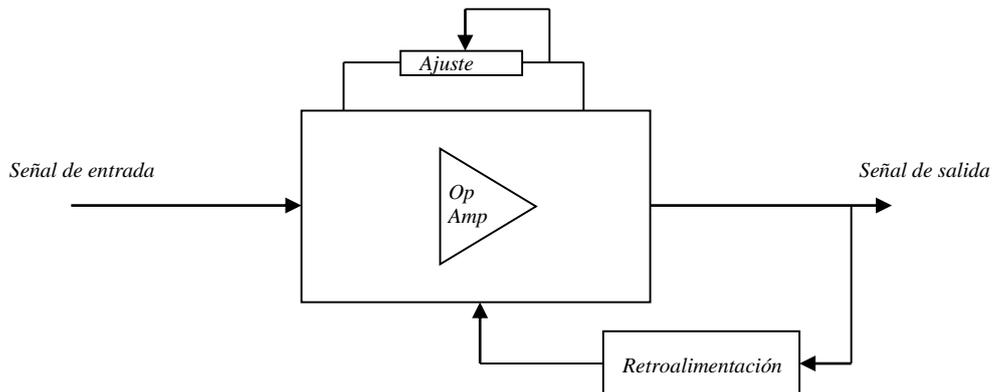


Fig. 4.6 Tarjeta acondicionadora de señal

Como en el sistema de pruebas DIGILOAD se tiene que medir la corriente que circula a través del motor al momento de la prueba, es necesario diseñar una tarjeta acondicionadora que nos entregue un voltaje de salida proporcional a esta corriente, también se requiere controlar el torque de simulación por medio del freno magnético por lo que se hace uso de otra tarjeta acondicionadora que nos proporcione un voltaje de salida de acuerdo al valor de torque programado desde la pantalla HMI.

4.3.4 Freno Magnético

Los frenos y los embragues son en esencia un mismo dispositivo. Cualquiera de ellos permite una conexión por fricción, magnética, hidráulica o mecánica entre dos elementos de máquina. Si ambos elementos conectados giran, entonces el dispositivo se conoce como *embrague*. Si uno de los elementos gira y el otro queda fijo, se conoce como *freno*.



Fig. 4.7 Freno magnético

TIPOS DE FRENOS Y EMBRAGUES.

Los frenos y embragues se clasifican de diversas maneras, según su *forma de accionamiento*, y su *forma de transferencia de energía* entre los elementos, y *el carácter del acoplamiento*.

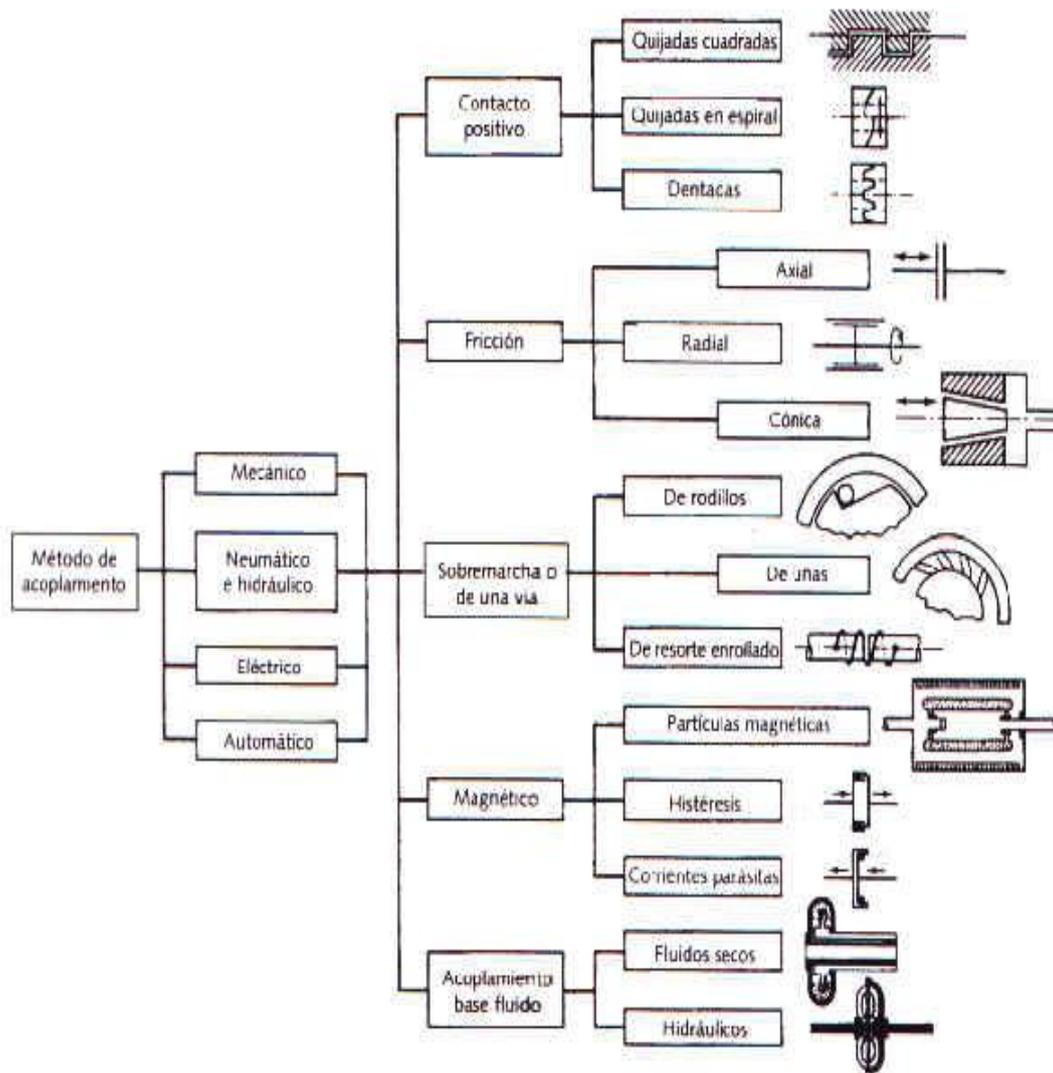


Fig. 4.8 Clasificación de acoplamientos.

Los medios de accionamiento son:

Mecánico
Neumático o Hidráulico
Eléctrico
Automático

EMBRAGUES DE CONTACTO POSITIVO.

Un medio para la transferencia de energía podría ser un contacto mecánico positivo. El acoplamiento es una interferencia mecánica que se obtiene con quijadas de forma cuadrada o de diente de sierra, o con dientes de formas diversas.

Estos dispositivos no son útiles como frenos, porque no es capaz de disipar grandes cantidades de energía.

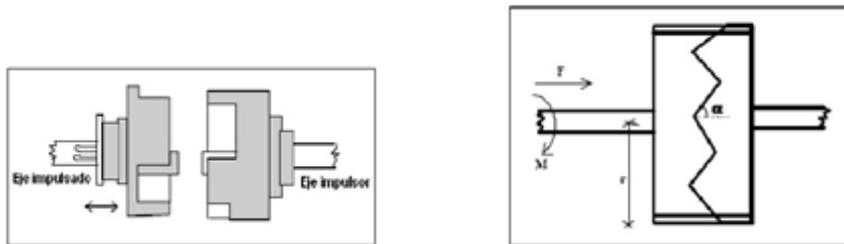


Fig. 4.9 Embrague de contacto positivo

EMBRAGUES Y FRENOS DE FRICCIÓN.

Son los de uso más común. Dos o más superficies son oprimidas entre sí mediante una fuerza perpendicular o normal, para crear un par de torsión por fricción.

Las superficies de fricción suelen ser planas y perpendiculares al eje de rotación, en cuyo caso la fuerza normal es axial (*freno o embrague de disco*), o cilíndricas, con la fuerza normal en dirección radial (*freno o embrague de tambor*), o cónicas (*freno o embrague cónico*).



Fig. 4.10 Embragues de disco, tambor y cónico.

EMBRAGUES DE SOBREMARCHA.

También conocidos como embragues de una vía.

Operan automáticamente con base en la velocidad relativa entre los dos elementos, permiten la rotación relativa solo en una dirección. Si se intenta invertir el giro, la composición interna del mecanismo del embrague lo bloquea.

En este tipo de embragues se utilizan en varios mecanismos distintos como son los *embragues de uñas*, los *embragues de rodillos* y los *embragues de resorte*.

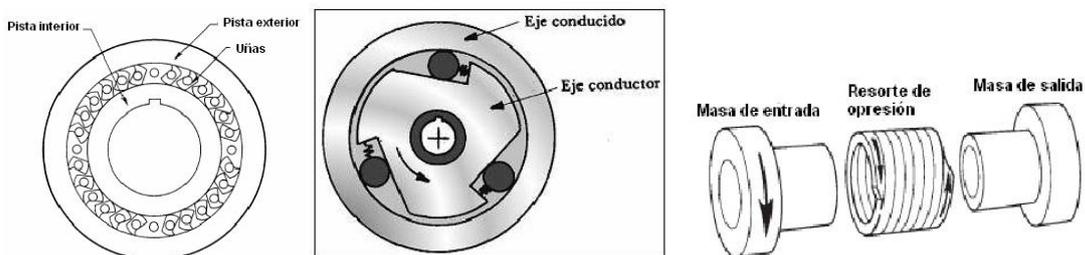


Fig. 4.11 Embragues de uñas, rodillos y resorte

EMBRAGUES CENTRÍFUGOS.

Se acoplan automáticamente cuando la velocidad a la que están sometidos excede cierta magnitud. Para acoplar el embrague los elementos de fricción son impulsados radialmente hacia fuera, contra el interior de un tambor cilíndrico.



Fig. 4.12 Embrague centrífugo.

EMBRAGUES Y FRENOS MAGNÉTICOS.

Son de varios tipos.

No tienen un contacto de fricción directo entre disco y carcasa. El espacio entre superficies está lleno de un fino polvo ferroso. Al energizarse la bobina, las partículas de polvo forman cadenas a lo largo de las líneas de flujo del campo magnético, acoplando el disco a la carcasa.

No tiene un contacto mecánico entre los elementos en rotación. El rotor que también se conoce como taza de arrastre, es arrastrado por el campo magnético establecido por la bobina de campo (o imán permanente).

Son similares en construcción a los dispositivos de histéresis, en el hecho que no tienen un contacto mecánico entre rotor y polos. La bobina establece corrientes parásitas, que acoplan de manera magnética el embrague.

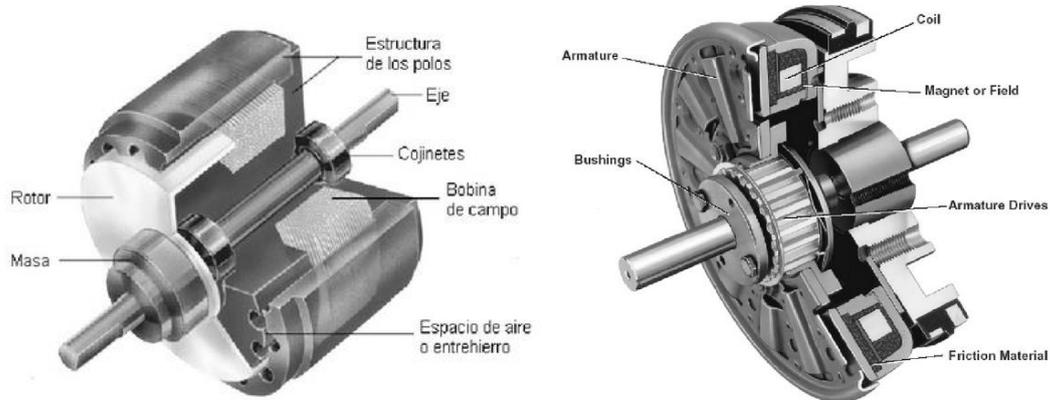


Fig. 4.13 Frenos magnéticos.

ACOPLAMIENTO DE FLUIDOS.

Transmiten par de torsión a través de un fluido (casi siempre aceite). Un impulsor con un juego de aspas se hace girar, e imparte un momento angular al aceite que lo rodea. Una turbina (o rodete), con aspas similares se hace girar por el aceite en movimiento que lo golpea.

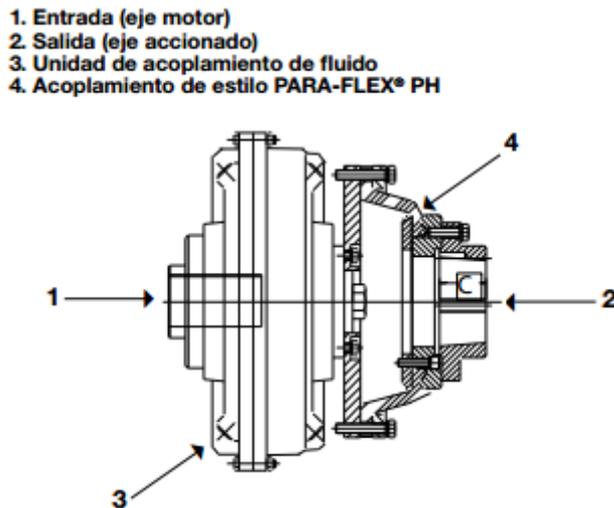


Fig. 4.14 Acoplamiento de fluidos.

El dispositivo de frenado seleccionado para el DIGILOAD es un freno de partículas magnéticas modelo B115 de la marca Placid Industries el cual cumple con las especificaciones requeridas por el sistema.

Los frenos de partículas magnéticas (polvo magnético) proporcionan un control de tensión preciso y con alta velocidad de respuesta generalmente recomendados para aplicaciones de baja tensión.

El freno de polvo magnético es una alternativa silenciosa para los frenos de fricción, que es ideal para ambientes limpios.

Su operación es de bajo voltaje (24V DC) por lo cual no presentan riesgos y facilitan su uso e instalación al no requerir transformadores de corriente.

La figura 4.15 muestra físicamente el modelo en cuestión.

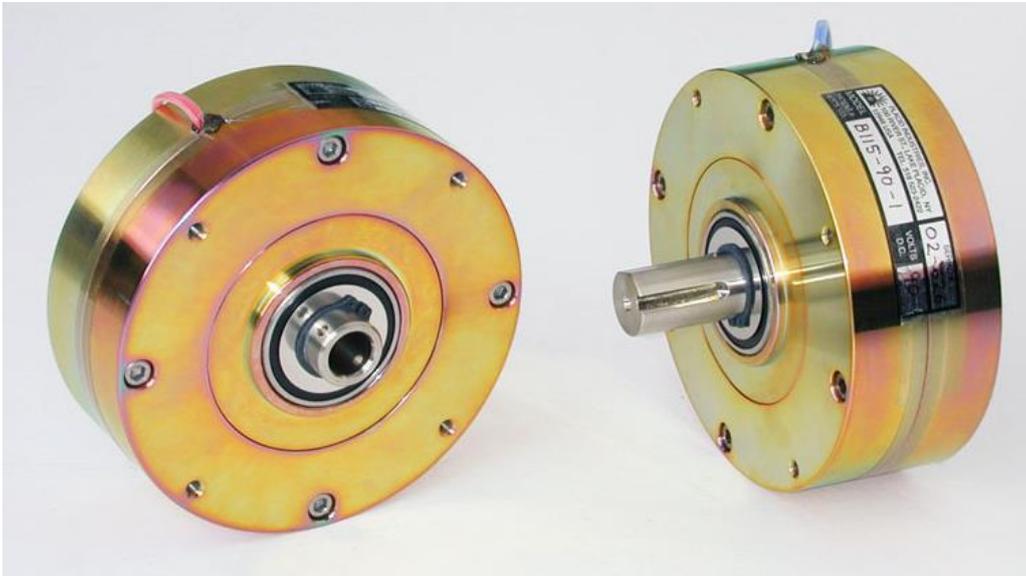
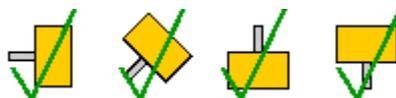


Fig. 4.15 Freno de partículas magnéticas mod. B115

Características:

- Sin excitación eléctrica, la flecha gira libremente.
- Con excitación eléctrica, la flecha se acopla a la carcasa.
- Mientras el torque de carga es menor que el torque de salida, la flecha no gira.
- Cuando el torque de carga es incrementado, el freno se acercará suavemente al nivel del torque establecido por la corriente de entrada de la bobina.
- El torque es proporcional a la entrada de corriente.
- El torque es independiente de las RPM.
- Su montaje mecánico puede ser en cualquier dirección.

Fig. 4.16 Montaje mecánico



La fig. 4.17 nos muestra el comportamiento del torque con respecto a la corriente de entrada.

Fig. 4.3 % Torque contra Corriente de Entrada.

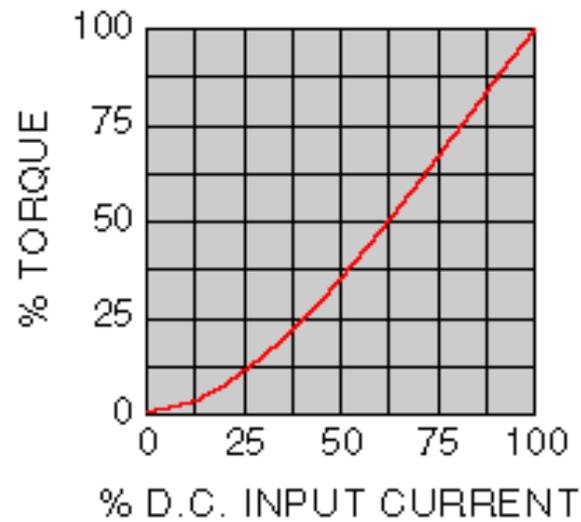


Fig. 4.17 Funcionamiento de un freno de partículas magnéticas

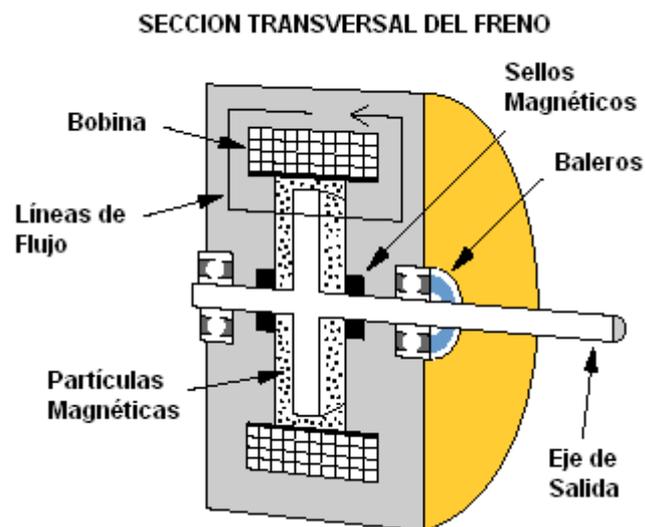


Fig. 4.18 Sección transversal del freno magnético.

El disco/flecha de salida no toca el cuerpo. El espacio intermedio es llenado con polvo fino de acero inoxidable.

El polvo está flotando libremente, hasta que un campo magnético es aplicado a través de la bobina. Las partículas de polvo forman cadenas a lo largo de las líneas del campo magnético, acoplando el disco al cuerpo del freno.

El torque es proporcional a la fuerza del campo magnético, y por consiguiente a la corriente de entrada aplicada.

4.3.5 Acoplador Mecánico del Motor

Un acoplamiento o cople es un dispositivo que se utiliza para unir dos o más componentes que pueden ser móviles o fijos. En los móviles (caso de la flecha de transmisión y la carga dinámica en esta tesis) el fin es transmitir movimiento, ya sea rotacional o traslacional. Dependiendo de la aplicación se puede argumentar que son para transmitir potencia mecánica.

Los acoplamientos utilizados en esta tesis, son sistemas de transmisión de movimiento entre dos ejes o árboles, cuyas misiones son asegurar la transferencia del movimiento y absorber las vibraciones en la unión entre los dos elementos. De manea estándar, para una relación ideal de 1:1, la relación de transmisión es 1, pero por lo general, un eje puede tener más velocidad en un intervalo del ciclo que en otro o simplemente se presentan efectos de fricción no-lineal que hacen que las relaciones presenten pequeñas variaciones con respecto a los cálculos relacionales.

Algunos tipos de acoplamientos pueden funcionar como "fusible mecánico", permitiendo su rotura cuando se sobrepase cierto valor de par, salvaguardando así partes delicadas de la instalación que pueden ser críticas en el funcionamiento del sistema o tienen un importe económico elevado. Esto se consigue fabricando el acoplamiento o parte de él con materiales menos resistentes o con secciones calculadas para romper con un determinado esfuerzo.

Una clasificación de los acoplamientos o cople es: rígidos y flexibles. Los acoplamientos rígidos se diseñan para unir dos ejes en forma apretada de manera que no sea posible que se genere movimiento relativo entre ellos. Este diseño es deseable para ciertos tipos de equipos para los cuales se busca que exista una alineación precisa de dos ejes. En tales casos, el cople debe diseñarse de manera que sea capaz de transmitir el torque en los ejes.

En Fig. 4.19 se muestra un cople rígido común, en el cual los rebordes o pestañes se montan en los extremos de cada eje y se unen por medio de una serie de tornillos.

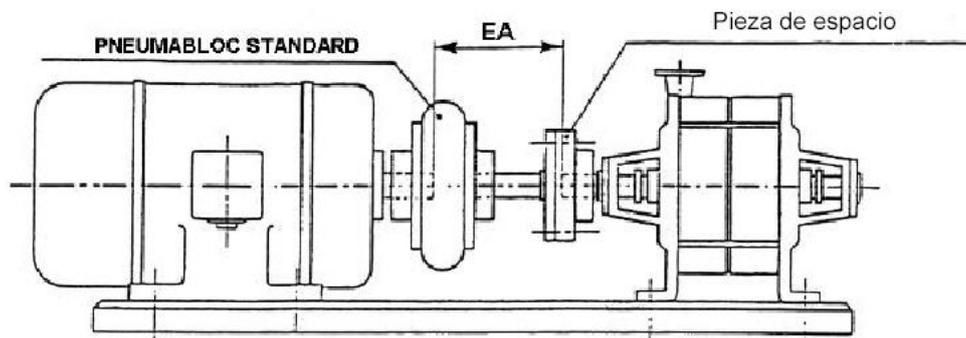


Figura 4.19. Cople rígido.

En la categoría de los modelos flexibles, se encuentran ciertas ventajas. Una de las principales es que el modelo flexible admite desalineaciones. De manera general, se pueden clasificar en dos grupos: Rígidos a torsión, estos no amortiguan vibraciones a torsión. Acoplamientos elásticos, su principal ventaja es que absorben vibraciones a torsión. Sin embargo, la transmisión del par no es instantánea.

Para el sistema DIGILOAD se diseñó una base de acoplamiento donde se pudiera colocar el motor o familia de motores, sobre un soporte deslizante y que el eje del motor quedara alineado con el freno magnético y el sensor de posición (encoder).

Al mover hacia adelante el soporte deslizante, el eje del motor se inserta en el cople del freno magnético para que al momento de energizar el motor se transmita el movimiento hacia los demás elementos.

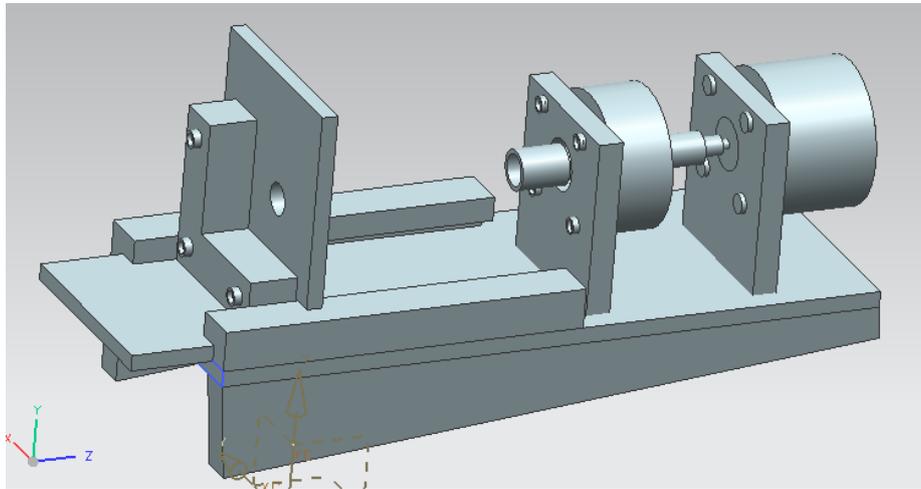


Figura 4.20. Soporte para el posicionamiento de los motores en el DIGILOAD.

Esta sección está dedicada a los acopladores que se diseñaron para el sistema DIGILOAD. Como se ha mencionado, los motores a probar son variados tanto eléctrica como geoméricamente. Por tanto, es importante conocer la forma en que éstos se acoplan a la carga y el sistema de sensado. En principio se fabricaron 15 tipos diferentes de acopladores, los cuales funcionan para la mayoría de los grupos a probar. Estos acopladores, se fijan por medio de un tornillo opresor, quedando el orificio donde se inserta el eje del motor o caja de engranes. En los motores donde no se requiere estimar el torque, el acoplador tiene una goma en la parte de inserción, esta puede considerarse una parte flexible de la transmisión, sin embargo, es la fricción entre la flecha y la goma es suficiente para mantener el freno y el sensor de posición rotacional en movimiento. Por otro lado, los motores de alto torque requieren un acoplamiento rígido, en el cual, la flecha tiene maquinado un plano que al insertarse en el acoplador evita flexiones o pérdidas de movilidad. Los detalles técnicos sobre el montaje y diseño de los acopladores rápidos utilizados en el prototipo están fuera del alcance de este documento, debido a la confidencialidad contraída con el patrocinador.

5 Experimentos de validación

5.1 Pruebas en motores de CD

Es importante tener en cuenta que la experimentación es una parte esencial del proceso de aprendizaje, en la que se formulan hipótesis tentativas fundamentadas en el conocimiento técnico del proceso estudiado, se planean y ejecutan experimentos para comprobar dichas hipótesis y se formulan nuevas hipótesis para reiniciar el proceso; es justamente un proceso sistémico y es muy poco probable planear el gran y único experimento que solucione todos nuestros problemas en corto plazo, la experiencia nos indica que es más eficiente apostar a la experimentación secuencial, es decir, varios experimentos donde los resultados del anterior son la base para la planeación de uno nuevo. En las siguientes pruebas podemos observar cuales son los comportamientos de los diferentes modelos de motores bajo diferentes circunstancias de prueba.

5.1.1 Motores de alto torque

La Tabla 5.1 muestra los parámetros nominales en motores de alto torque

Parámetro	Voltaje	RPM		Corriente		Giro	Torque
		S/C	C/C	S/C	C/C		
Valor	16	117-143	99-121	0.5	3.0	CW	13.3

Las gráficas 5.1, 5.2 y 5.3 nos muestran el comportamiento de los parámetros de voltaje, RPM y corriente medidos durante la prueba de 19 motores de alto torque.

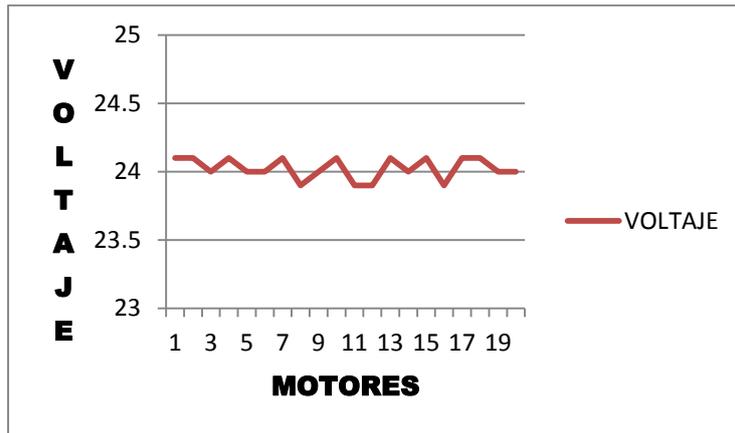


Fig. 5.1 Valores de voltaje

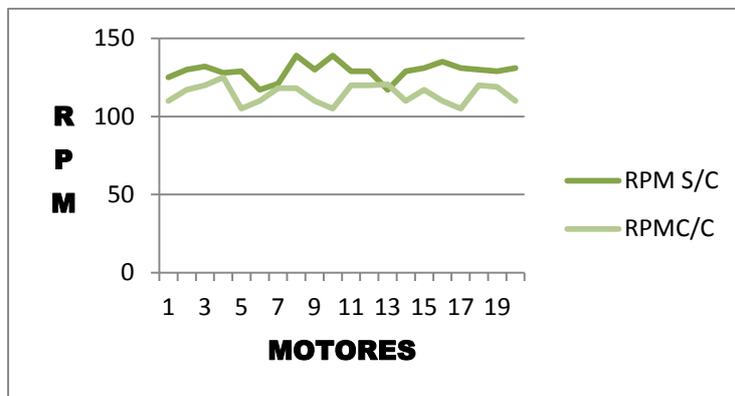


Fig. 5.2 Valores de RPM con carga y sin carga

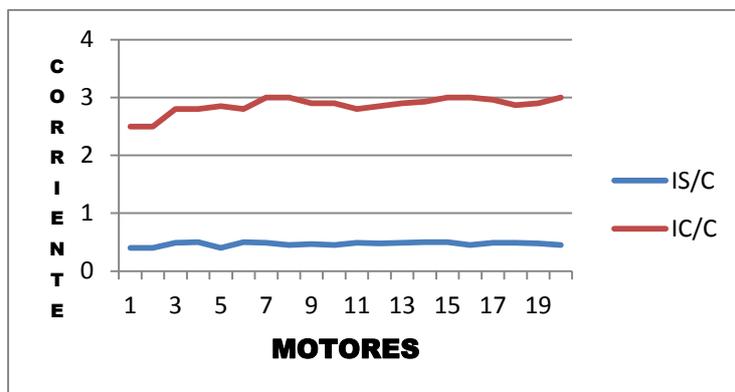


Fig. 5.3 Valores de corriente con carga y sin carga

5.1.2 Motores de alta RPM

La Tabla 5.2 muestra los parámetros nominales en motores de alta RPM

Parámetro	Voltaje	RPM		Corriente		Giro	Torque
		S/C	C/C	S/C	C/C		
Valor	15	170-220	137-185	0.90	2.1	CW	6.25

Las gráficas 5.4, 5.5 y 5.6 nos muestran el comportamiento de los parámetros de voltaje, RPM y corriente medidos durante la prueba de 19 motores de alta RPM.

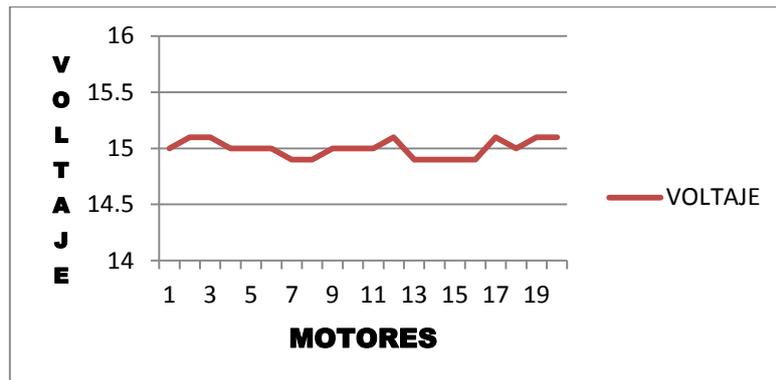


Fig. 5.4 Valores de voltaje

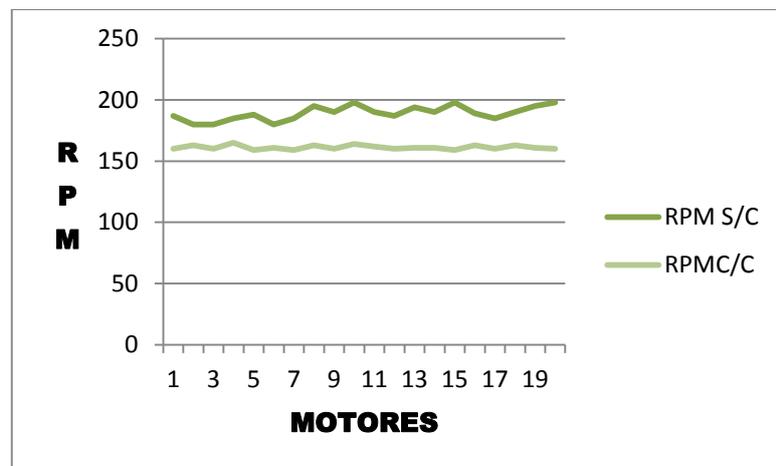


Fig. 5.5 Valores de RPM con carga y sin carga

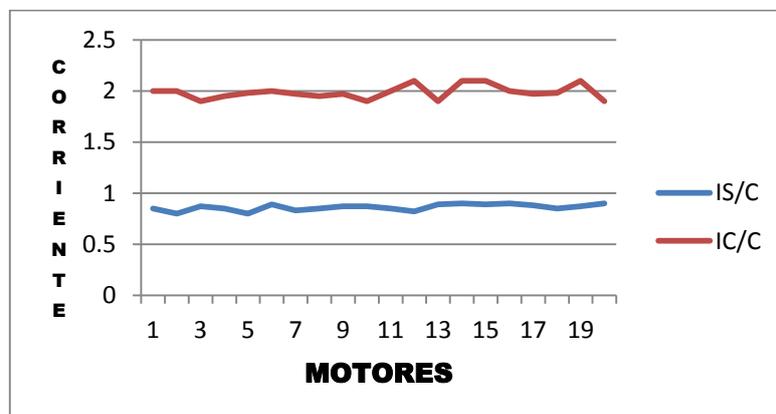


Fig. 5.6 Valores de corriente con carga y sin carga

5.1.3 Motores de baja RPM

La Tabla 5.3 muestra los parámetros nominales en motores de baja RPM

Parámetro	Voltaje	RPM		Corriente		Giro
		S/C	C/C	S/C	C/C	
Valor	24	8.5-10.5	5.6-6.8	0.15	0.55	CCW

Las gráficas 5.7, 5.8 y 5.9 nos muestran el comportamiento de los parámetros de voltaje, RPM y corriente medidos durante la prueba de 19 motores de bajo RPM.

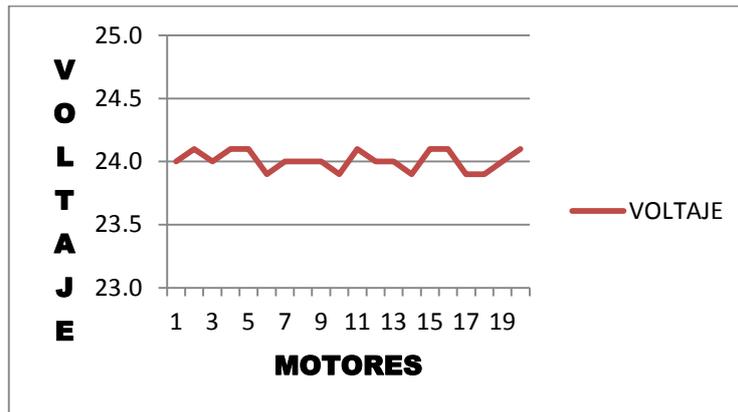


Fig. 5.7 Valores de voltaje

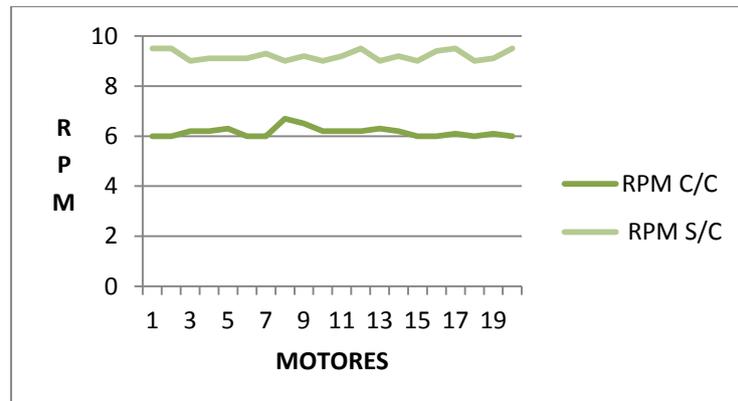


Fig. 5.8 Valores de RPM sin carga y con carga



Fig. 5.9 Valores de corriente con carga y sin carga

5.1.4 Motores de precisión

La Tabla 5.4 muestra los parámetros nominales en motores de precisión

Parámetro	Voltaje	RPM		Corriente	Giro
		S/C	C/C		
Valor	24	6.48-7.92	4.27-5.75	0.14	CW

Las gráficas 5.10, 5.11 y 5.12 nos muestran el comportamiento de los parámetros de voltaje, RPM y corriente medidos durante la prueba de 19 motores de precisión.

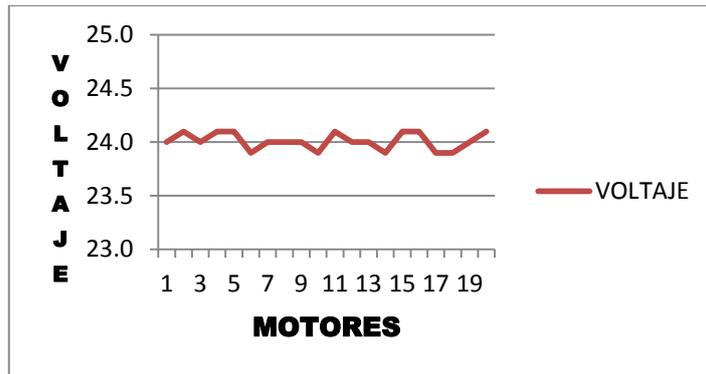


Fig. 5.10 Valores de voltaje

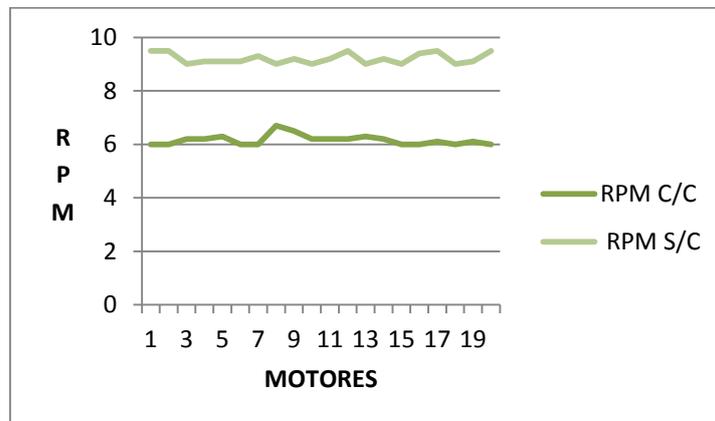


Fig. 5.11 Valores de RPM con carga y sin carga

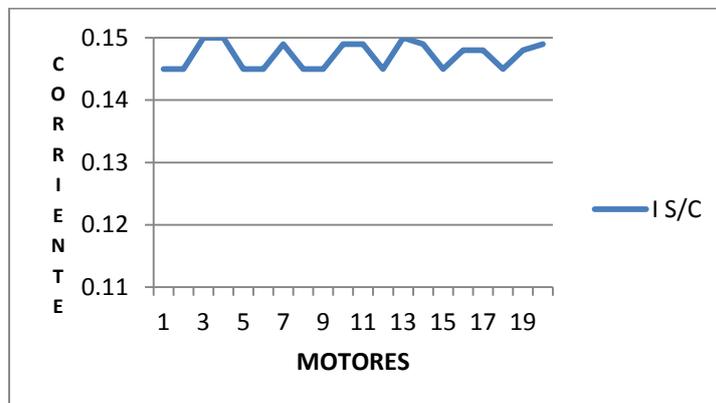


Fig. 5.12 Valores de corriente con carga y sin carga

5.2 Pruebas de motores en CA

5.2.1 Motores de alto torque

La Tabla 5.5 muestra los parámetros nominales en motores de alto torque

Parámetro	Voltaje	RPM	Corriente	Giro
Valor	115	1.33-1.47	3.2 A	CW(FCS)

Las gráficas 5.13, 5.14 y 5.15 nos muestran el comportamiento de los parámetros de voltaje, RPM y corriente medidos durante la prueba de 19 motores de alto torque.

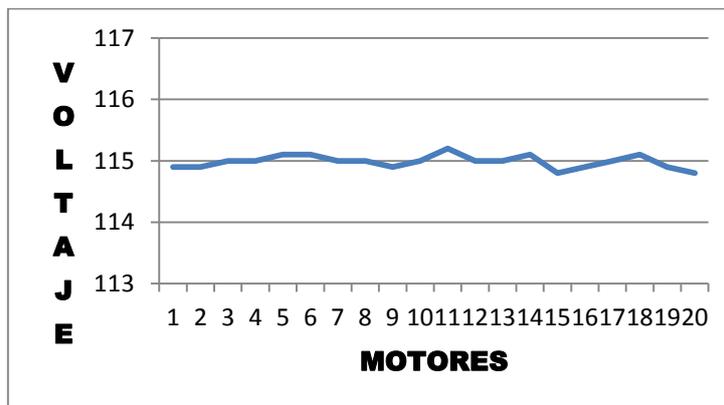


Fig. 5.13 Valores de voltaje

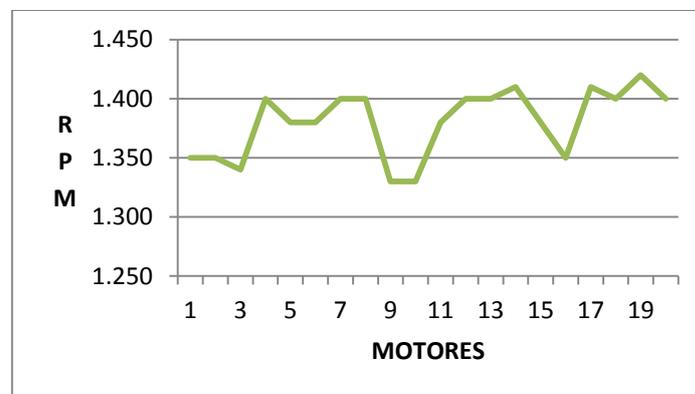


Fig. 5.14 Valores de RPM con carga y sin carga

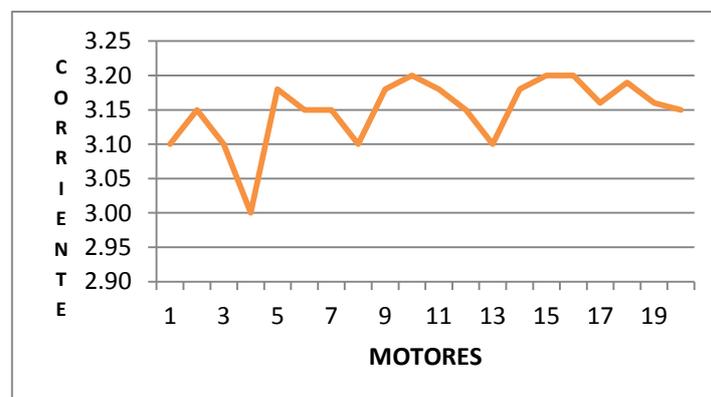


Fig. 5.15 Valores de corriente con carga y sin carga

5.2.2 Motores de bajo torque.

La Tabla 5.6 muestra los parámetros nominales en motores de bajo torque

Parámetro	Voltaje	RPM	Corriente
Valor	230	1-1.5	0.12 - 0.16

Las gráficas 5.16, 5.17 y 5.18 nos muestran el comportamiento de los parámetros de voltaje, RPM y corriente medidos durante la prueba de 19 motores de bajo torque.

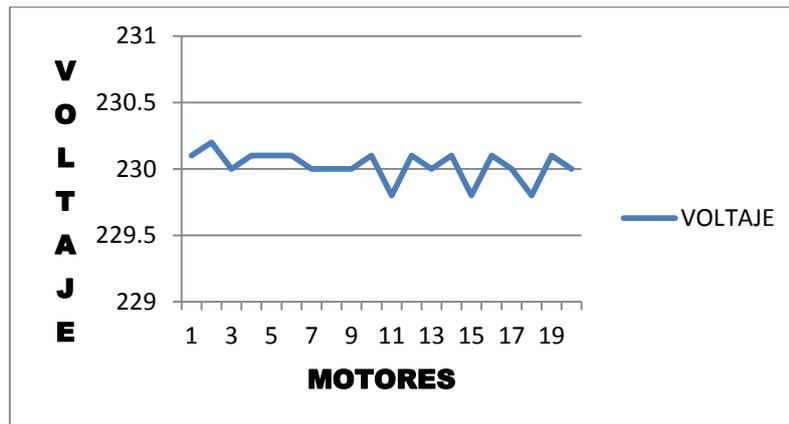


Fig. 5.16 Valores de voltaje

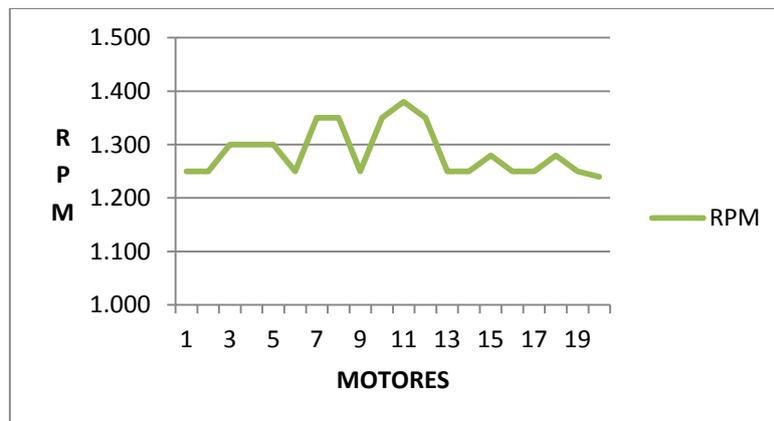


Fig. 5.17 Valores de RPM con carga y sin carga

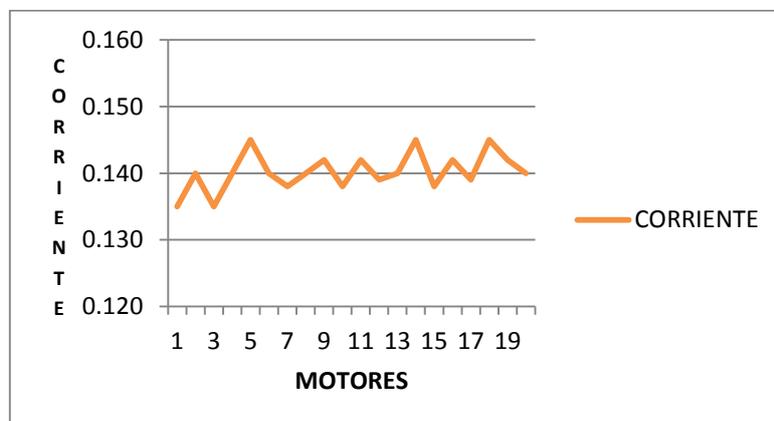


Fig. 5.18 Valores de corriente con carga y sin carga

5.2.3 Motores de alta RPM

La Tabla 5.7 muestra los parámetros nominales en motores de alta velocidad

Parámetro	Voltaje	RPM	Corriente
Valor	115	25.2-30.8	0.38-0.51

Las gráficas 5.19, 5.20 y 5.21 nos muestran el comportamiento de los parámetros de voltaje, RPM y corriente medidos durante la prueba de 19 motores de alta velocidad.

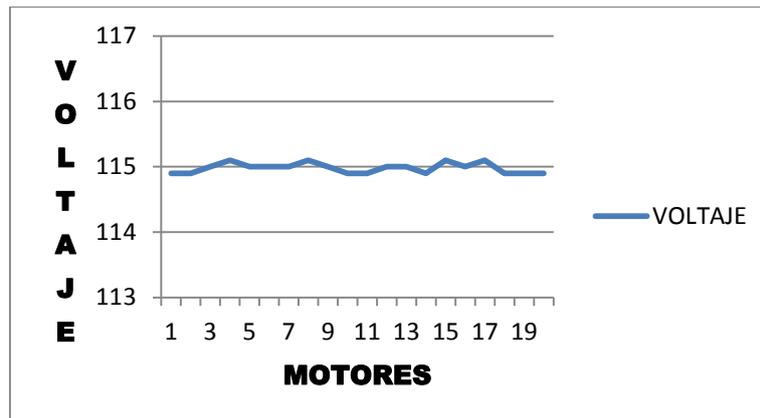


Fig. 5.19 Valores de voltaje

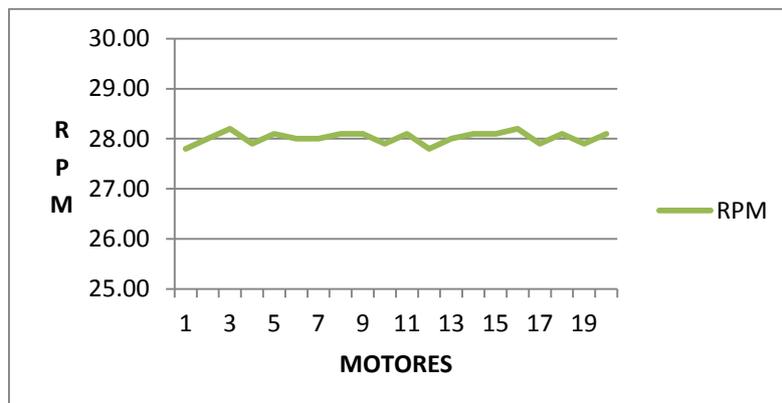


Fig. 5.21 Valores de RPM con carga y sin carga

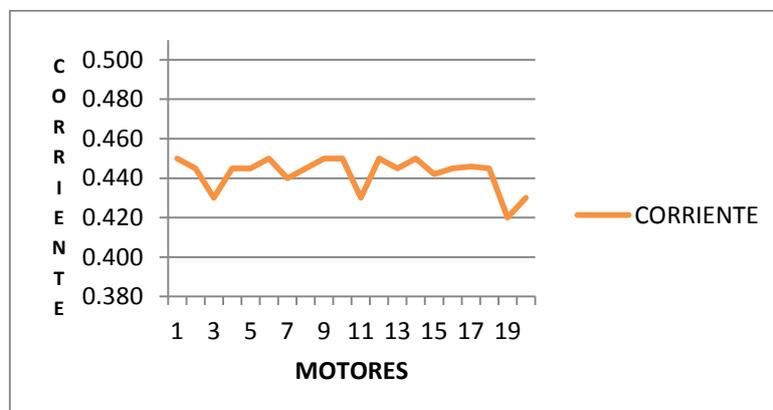


Fig. 5.21 Valores de corriente con carga y sin carga

5.3.1 Resumen de resultados



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Gaxtel, SA de CV

No. Certif. : **GSC-0172**
Descripción: **Equipo de prueba para motores fraccionales DC**
Modelo: **Digiload T-DC01** Unidad de Cal. : **Volt, Amp, RPM**
No. De Serie: **2-07-TEST-0281**
Fecha de Cal. : **09 Enero 2012**
Próxima Cal. : **10 Enero 2013**
Cliente : **Merkle Korff Industries de México, SA de CV**

No.	Voltaje Aplicado	Voltaje Medido	Amps. Aplicado	Amps. Medido	RPM Aplicado	RPM Medido
1	1.00	1.01	0.10	0.098	2.0	2.0
2	2.00	2.00	0.15	0.152	4.0	4.1
3	4.00	4.01	0.25	0.254	8.0	8.1
4	8.00	7.99	0.40	0.389	16.0	16.4
5	12.00	12.08	0.60	0.61	32.0	32.2
6	14.00	14.09	1.20	1.22	64.0	64.1
7	16.00	16.09	1.80	1.81	128.0	128.5
8	18.00	18.05	2.25	2.24	150.0	149
9	20.00	20.02	2.80	2.80	300.0	302
10	24.00	23.98	3.50	3.48	500.0	503

Equipo utilizado para calibración:

Multímetro Digital Marca Metra No. Serie: 1VY-54387N

Tacómetro digital Mitutoyo No. Serie: 290768-33R

Ing. Jesús Gabriel Martínez Vargas
San Luis Potosí, SLP a 13 Enero 2012

La incertidumbre de calibración corresponde a un nivel de confianza aproximadamente del 95%.
Es responsabilidad del usuario mantener este equipo en estado de calibración.

Fig. 5.22 Certificado de calibración del DIGILOAD

6. Conclusiones

El equipo cumple con los requisitos para la prueba de motores de acuerdo a las necesidades de la empresa, se han fabricado 10 equipos los cuales actualmente están en operación en las líneas de producción.

6.1 Trabajos futuros

La revolución constante de tecnología en el diseño de motores fraccionales nos lleva día a día a contar con nuevos modelos más eficientes y con materiales más económicos y resistentes.

Éste equipo de prueba se diseñó versátil con el objetivo de poder adaptarse a los nuevos modelos de motores en la mejor medida posible.

Otra de las opciones que se pueden implementar a futuro es la de desarrollar una base de datos para almacenar los resultados de la prueba y tener un respaldo con fines estadísticos.

BIBLIOGRAFÍA

1. T. KENJO, “*Permanent magnet and brushless dc motors*”, Oxford, 1985
2. REGHENZANI A., “*A motor controller for the solar car project*”. The university of Queensland, Octubre 1998
3. PITTMAN EXPRESS N2311A011 Brushless DC motor Datasheet. 2001
4. R. ERICKSON, “*Fundamental of Power Electronics*”, Kluwer Academic, Publishing, 2001, ISBN 0-7923-7270-0
5. GUI-JIA SU, ADAMS D. PENG F. HUI LI. “*A Soft-Switched DC/DC Converter for fuel cell vehicle applications*”, Oak Ridge national Laboratory, 2001.
6. MARC FREYRE, Proyecto final de Carrera, “*Estudio de la evolución de la curva Par/ Velocidad de motores eléctricos de inducción desde el régimen dinámico al estático mediante la validación del modelo teórico con ensayos prácticos en el laboratorio*”. UPC Terrassa 2002
7. JC Sala, Proyecto final de Carrera, “*Estudio de la relación entre las pérdidas en el hierro y el incremento de temperatura en motores de inducción alimentados con convertidor de frecuencia para altas velocidades*”, UPC Terrassa 2002
8. EN60034-1. Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento. CENELEC. AENOR 1998
9. IEEE Std 112-1996 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1997
10. ANNETTE MUTZE, “*Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors*”, Darmstädter Dissertation D17, Shaker Verlag, Aachen 2004
11. M. KAUFHOLD, G. BORNER, M.EBERHARDT, J. SPECK, “*Failure Mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse-controlled inverters*”, IEEE Electrical Insulation Magazine, September/October 1996 Vol, 12 No.5, ISBN 0883-7554/96/\$5.00
12. IEC 60072-1:1991. Dimensions and output series for rotating electrical machines
13. C.N.GLEW, “*Stray load losses in induction motors: a challenge to academia*”, Power Engineering Journal, February 1998

14. JAUME PLANAS CANO, “Estudio comparativo de normas IEC34-2 con IEEE 112-B”, Director del proyecto Jaime Saura Perisé. EUETIT UPC, Junio 2000. Apartado 1.6.
15. <http://www.directindustry.es/prod/assing/bancos-de-prueba-para-motores-electricos-21181-48379.html>
16. ENRIQUEZ HARPER GILBERTO. “*El ABC de las máquinas eléctricas*”, Volumen 2. Ed. Limusa 2004. Pág. 300
17. R. CARLSON, M. LAJOIE-MAZENC, J. FAGUNDES (1992) “*Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless DC Machines*”, IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 28, No.3, pp.632-638, Mayo 1992.
18. E. CARROLL (1998) “*Power Electronics for Very High Power Applications*”, ABB Semiconductors AG, Londres, Septiembre 1998, Página Internet. <http://www.upsci.com/semiconductors.pdf>
19. CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD (2002) “*Zero Emission Vehicle Incentive Programs*”. Página Internet. <http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zip/zip.htm>
20. C. CHAN, K. CHAU (1997) “*An Overview of power Electronics in Electric Vehicles*”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.44, No1, Febrero 1997.
21. R. DHAOUADI, N. MOHAN, L. NORUM (1991) “*Design and Implementation of an Extended Kalman Filter for the State Estimation of a Permanent Magnet Synchronous Motor*”. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.6, No.3, pp.491-497, Julio 1991.
22. J. DIXON, I.LEAL (2002) “*Current Control Strategy for Brushless DC Motors, Based on a Common DC Signal*”, IEEE Transactions on Industry Electronics, Marzo 2002.
23. DIXON (2001) Apuntes del Curso Generación Eléctrica, Depto. de Ingeniería Eléctrica de la P. Universidad Católica de Chile.
24. J. DIXON (1994) “*Introducción a los Motores de Imanes Permanentes y sus Características*”, V Seminario de Electrónica de potencia, EPO-94. Universidad de Concepción, 12-15 Abril, Concepción Chile.

25. T. FURUHASI, S. SANGWONGWANICH Y S. OKUMA (1992) “A Positionand- Velocity Sensorless Control for Brushless DC Motors Using Adaptive Sliding Mode Observer” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.39, No.2, pp.89-95, Abril 1992.
26. M. GODOY, N.FRANCESCHETTI, J. ADAMOWSKI (1998) “Drive System Control and Energy Management of a Solar Powered Electric Vehicle”, IEEE-APEC Applied Power Electronics Conference. Vol.1, pp.49-55, Anaheim CA, 15-19 Febrero 1998.
27. F. A. GRAYBILL (1961) An Introduction to linear Statistical Models. Volume I. McGraw-Hill, United States of America, pp.106-148.
28. N. HEMATI, M.C. LEU (1992) A Complete Model Characterization of Brushless DC Motors. IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 28, No.1, pp.172-180, Enero 1992.
29. P. A. HUGHES. (1996) A History of Early Electric Cars, Página Internet. <http://www.geocities.com/Athens/Crete/6111/electcar.htm>
30. L.A. JONESSAND, J.H. LANG (1989) “A State Observer for the Permanent Magnet Synchronous Motor”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.36, No.3, pp.374-382, Agosto 1989.
31. S.J. KANG, S.K. SUL (1995) “Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Nonideal Trapezoidal Back EMF”, IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 10, No.6, pp.796-802, Noviembre 1995.
32. I. LEAL (1999) “Control de Motor BLDC”. Memoria de Título P. Universidad Católica de Chile.
33. A.L. LILEIN (1996) Digital Signal Procesors vs. Universal Microprocessors. Texas Instruments Literature Number: SPRA344, Paris, Septiembre 1996.
34. T. LOW, M.A. JABBAR (1990) Permanen-Magnet Motors for Brushless Operation. IEEE Transactions on Industrial Applications. Vol. 26, No.1, pp.124-129, Enero 1990.
35. M. MARZ, M. BILLMANN, A. KNAPP (1998) High-Speed 600V IGBT in NPT Technology, Página Internet. <http://www.upsci.com/IGBT.pdf>

36. N. MATSUI (1996) Sensorless PM Brushless DC Motor Drives, IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 43, No.2, pp.300-308, Abril 1996.
37. F. OVALLE (1996) “Control de una Máquina Síncrona de Imanes Permanentes para Tracción Eléctrica, en Base a un Procesador Digital de Señales” Memoria de título P. Universidad Católica de Chile.
38. P. PILLAY Y R. KRISHNAN (1991) “Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors for Servo Drives”. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.27, No5, Sept/Oct. 1991.
39. H. ROTELLA (1998) Diseño y Construcción de un Inversor de Potencia. Memoria de título P. Universidad Católica de Chile.
40. TI (2000) TMS320F243/F241/C242 DSP Controllers Reference Guide System and Peripherals. Texas Instruments Literature Number: SPRU276C, Enero 2000.
41. TI (1999) TMS320F/C24x DSP Controllers Reference Guide CPU and Instruction Set. Texas instruments Literature Number: SPRU160C, Junio 1999.
42. TI (1999) Printed-Circuit-Board Layout for Improved Electromagnetic Compability. Texas Instruments Literature Number: SDYA011, Octubre 1999.
43. TI (1999) Design Guidelines for Reduced EMI. Texas Instruments Literature Number: SZZA009, Noviembre 1999.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE POSGRADO EN
INGENIERÍA**

**EQUIPO DE PRUEBA UNIVERSAL PARA MOTORES
FRACCIONALES DE DC Y AC**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
MECÁNICA**

PRESENTA:

JESÚS GABRIEL MARTÍNEZ VARGAS.

TUTOR:

DR. ANGEL LUIS RODRÍGUEZ MORALES
CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y
TECNOLOGÍA AVANZADA

MÉXICO, D.F. Octubre 2014.