



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

Diseño y construcción de un banco de pruebas para la
caracterización de mecanismos de compresión

T E S I S

Que para obtener el título de:
Ingeniero Mecatrónico

Presenta:
Martín Jurado Pedroza

Director de Tesis:
Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich



México, D. F.

2015

Índice

Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Objetivo	v
Justiciación de estudio	vi
Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes	2
1.1. Banco de Pruebas	2
1.2. Compresores	4
1.2.1. Cómo funciona un compresor	4
1.2.2. Métodos de Compresión	5
1.2.3. Tipos de Compresores	6
1.2.4. Compresor Reciprocante	7
1.3. Trabajo	9
1.3.1. Trabajo de Flecha	10
1.3.2. Trabajo de Frontera Móvil	10
1.4. Adquisición de Señales	12
1.4.1. Transductores y Sensores	12
1.4.2. Instrumentación	13
1.4.3. Procesamiento de Señales	15
1.4.4. Muestreo y Cuantización	16
Capítulo 2. Metodología de Diseño	17
Capítulo 3. Diseño del Banco de Pruebas	19
3.1. Proceso de Desarrollo para el Banco de Pruebas de Mecanismos de Compresión	19
3.1.1. Planeación	19
3.1.2. Desarrollo del Concepto	20
I. Necesidades del Cliente	20
II. Especificaciones para el Banco de Pruebas	21
III. Generación de Concepto	23
i. Aclarar el Problema	24
ii. Buscar Internamente	27
iii. Buscar Externamente	27
iv. Reflexión de Resultados	30

IV. Selección de Concepto	34
3.1.3. Ciclo Iterativo (Diseño, Fabricación y Pruebas)	37
I. Bancada	37
II. Instrumentación	38
i. Sensor de Par de Torsión	38
ii. Sensor de Presión	41
iii. Sensor de Posición-Potenciometro	42
III. Adquisición de las Señales	46
i. Muestreo	46
ii. Procesamiento de Señales	47
iii. Programación	49
a) Configuración de la Tarjeta de Adquisición NI9201	49
b) Primera Iteración de la Programación	52
c) Segunda Iteración de la Programación	55
d) Tercera Iteración de la Programación	58
IV. Configuración Final del Banco de Pruebas	62
Capítulo 4. Pruebas	64
Capítulo 5. Resultados	67
5.1. Resultados Obtenidos por el Banco de Pruebas	67
5.2. Resultados analíticos de los mecanismos de compresión	75
5.3. Análisis de resultados	81
5.3.1. Análisis de resultados de las especificaciones	81
5.3.2. Análisis de resultados de los datos obtenidos	83
Capítulo 6. Conclusiones	84
Bibliografía	85

Dedicatorias

A mis padres, que gracias a su paciencia, constancia y apoyo lograron que esta y muchas metas más en mi vida se hayan cumplido. Y por su incontrolable deseo de estar junto a mí en cada momento.

A mis hermanos, motivo de inspiración y ganas de seguir adelante.

A mis tías, por el apoyo que impartieron en mí desde siempre.

Martín Jurado Pedroza

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que me enseñó el camino para encontrar mis ideales y más entrañables deseos, así como su apoyo brindado en mi carrera universitaria.

Agradezco también a la Facultad de Ingeniería por otorgarme el espacio y conocimientos para lograr mi desarrollo académico y profesional.

Así como el apoyo del Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich quien fue el principal detonante por mi gusto por el diseño y quien brindo su tiempo y conocimiento a lo largo de todo este proyecto.

Objetivo

Desarrollar un banco de pruebas que brinde la caracterización del funcionamiento de distintos mecanismos de compresión de un electrodoméstico que transformen un movimiento rotatorio a lineal. Con el fin de impulsar la investigación y desarrollo de tecnología que conlleve a la innovación en compresores.

Justificación de estudio

El desarrollo y diseño de tecnología es importante para la evolución empresarial debido a que se genera conocimiento para competir en el mercado y seguir creciendo en este, realizando importantes mejoras, en sus productos, procesos o servicios. Es por ello que este documento brinda información que permite la valoración de tecnologías en compresión para generar conocimiento en el área de compresores utilizados en refrigeración y la información pueda ser recabada y procesada con el fin de impulsar a las latentes mejoras.

Introducción

Hoy en día es de vital importancia ir a la par con los avances de la tecnología para satisfacer las necesidades de la sociedad cuando se brinda un servicio o producto, debido a que se compite contra potenciales empresas que van a la vanguardia al desarrollan productos más eficientes, con un impacto ambiental y social positivo. Para llegar a tal punto de vanguardia es necesario apostar a la creatividad de nuevas ideas y seguir inculcando la investigación en la academia universitaria para desarrollar nuevas tecnologías e innovaciones.

Es por ello que el presente trabajo genera conocimiento para ayudar a desarrollar tecnología e innovación en el área de compresión de los electrodomésticos. Lo cual se logra con el diseño y desarrollo de un banco de pruebas para caracterizar mecanismos de compresión, mediante el par de torsión que existe en la flecha del compresor al realizar el ciclo de compresión. Donde la idea surge por la necesidad que tiene la empresa Mabe por conocer su mecanismo de compresión y sus debilidades, para así implementar mejoras en un futuro cercano.

El diseño y la elaboración del banco de pruebas se realizó por un equipo de alumnos de licenciatura en disciplinas de ingeniería, asesorados por académicos de la UNAM siguiendo un proceso de desarrollo de diseño para su desarrollo. Donde en este escrito se explica detalladamente la forma de elaboración, así como los elementos claves para su funcionamiento, incluyendo la parte creativa para resolver problemas latentes en el diseño del banco de pruebas.

Para tener un panorama claro en el desarrollo del banco de pruebas se muestran algunos antecedentes que forman parte fundamental de su construcción, así como su funcionamiento abordando los temas de instrumentación, procesamiento de señales y conceptos básicos de los compresores.

1.1. Banco de pruebas

Un banco de pruebas o banco de ensayo es un conjunto de equipos en uso con el objetivo de evaluar la capacidad funcional y la efectividad de una máquina, dispositivo eléctrico o programa informático en lo que concierne a la ingeniería, lo cual se realiza con un conjunto integrado de herramientas para soportar un proceso de pruebas.

Estos bancos de pruebas son usados en varias aplicaciones; entre las más destacadas se encuentra la de verificar el comportamiento en términos de calidad de un dispositivo, determinar la funcionalidad de algún sistema por la falta de información que se tiene del mismo o para el desarrollo de nuevos productos con diferentes materiales y formas.

Los bancos de pruebas se han vuelto una pieza clave para el desarrollo de tecnología e innovación debido a la confiabilidad que puede llegar a tener; ayudando a las industrias y a la academia en la investigación.

La definición aplicable para banco de pruebas que se utilizara en este trabajo será la siguiente:

Sistema provisto de dispositivos eléctricos, electrónicos, mecánicos y de computación que se ven involucrados para brindar una comprobación rigurosa y repetible de todas o algunas de las características de una máquina o nueva tecnología simulando sus condiciones reales o implementadas, mediante una serie de pruebas.

A continuación se presenta de forma gráfica la descripción de un banco de pruebas.

La información que habla del banco de pruebas fue escrita con apoyo de las siguientes referencias:

Ing. (grad.) Peter Berg (2000) Conceptos, Sistemas y Esquemas (p.16).

Ian Sommerville (2005) Ingeniería de Software (p. 513).

David González Calleja (2012) Motores Térmicos y sus Sistemas Auxiliares (pp. 40-41).

Mario León (2000) Diccionario de Tecnología Ferroviaria (p. 62).

Descripción

BANCO DE PRUEBAS



Fig. 1.1 Infografía banco de pruebas. Realizado por el autor.

1.2. Compresores

El compresor es un dispositivo usado para incrementar la presión de un fluido y moverlo de un lugar a otro, entre gas o vapor, reduciendo el volumen específico del fluido, esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido. A este dispositivo el trabajo se le suministra desde una fuente externa a través de un eje giratorio en la mayoría de los casos.

1.2.1. Cómo funciona un compresor

El comportamiento del fluido es sumamente importante para el funcionamiento del compresor es por ello que Heinz P. Bloch y John J. Hoefner (1996) en su libro *Reciprocating Compressors* explican que los gases consisten de moléculas individuales separadas entre sí, esas moléculas están siempre viajando a altas velocidades golpeándose repetidas veces en un recipiente cerrado y produciendo lo que nosotros conocemos como presión.

La temperatura afecta la velocidad promedio de la molécula. Cuando es suministrado calor a un volumen de gas fijo las moléculas viajan rápidamente golpeando las paredes del recipiente que las contiene en mayores ocasiones con mayor fuerza produciendo mayor presión, lo cual está establecido en la **Ley de Amonton**.

Si el recipiente cerrado está equipado con un pistón, de modo que el gas pueda ser comprimido en un espacio más pequeño lo cual restringe el recorrido de la molécula haciendo que ésta golpee las paredes con mayor frecuencia incrementado la presión como es mencionado en la **Ley de Boyle**.

Sin embargo al mover el pistón también se le suministra energía a las moléculas haciendo que se muevan con mayor velocidad.



Fig. 1.2 Gas antes de ser calentado.
Realizado por el autor.



Fig. 1.3 Volumen constante de gas experimentado aumento de presión cuando se calienta.
Realizado por el autor.

Mediante estos dos fenómenos se incrementa el número de colisiones de las moléculas en un espacio forzadamente más pequeño logrando incrementar la velocidad, generando con ello un incremento de presión, que es lo que se busca en el caso de los compresores.

La compresión de gas a presiones muy altas tiene como consecuencia un incremento de temperatura, lo cual crea problemas en el diseño del compresor. Todos los elementos básicos del compresor, no importando el tipo, tienen ciertas condiciones de operación limitadas (pp. 3-5).



Fig. 1.4 Gas sometido a compresión experimentando aumento de presión.
Realizado por el autor.

1.2.2. Métodos de compresión

Heinz P. Bloch y John J. Hoefner (1996) establecen que se utilizan cuatro métodos de compresión para gases, dos son de flujo intermitente y los otros dos de flujo continuo:

1. Concentrar consecutivamente cantidades de gas en un recipiente cerrado, reduciendo su volumen (lo cual incrementa la presión), después expulsar el gas comprimido fuera del recipiente.
2. Concentrar consecutivamente cantidades de gas en un recipiente cerrado, llevándolo sin cambiar el volumen a la abertura de descarga, utilizando el retorno del gas para que esto haga la compresión, después expulsar el gas comprimido fuera del recipiente.
3. Se realiza la compresión de gas mediante la acción mecánica de impulsores rotatorios a altas velocidades que aceleran el gas convirtiéndolo en presión.
4. Se lleva el gas dentro de un flujo o chorro de otro gas o el mismo (usualmente vapor) a través de una boquilla y se convierte la alta velocidad de la mezcla en presión mediante difusores.

Los métodos de compresión uno y dos son usados en la clasificación llamada de flujo intermitente también conocidos como compresores de desplazamiento positivo. Los que utilizan el método tres se les conoce como compresores dinámicos. Los compresores que utilizan el método cuatro son nombrados Eyectores.

Los compresores cambian la energía mecánica en energía de gas, lo cual está establecido en **La Primera Ley de la Termodinámica**, donde se ve que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma durante un proceso, como lo es en el caso de la compresión de gas, aunque en el proceso de cambio de energía mecánica en energía de gas pueden existir energía perdida que no se pueden utilizar, como puede ser el calor.

La energía mecánica puede ser convertida en energía de gas en dos formas.

1. Por desplazamiento positivo dentro de un volumen reducido. El flujo de descarga es directamente proporcional a la velocidad del compresor, pero la relación de presión es determinada por la presión en el sistema en donde se hace el bombeo.
2. Por acción dinámica impartándole velocidad al gas. Esta velocidad es convertida en presión. El flujo de descarga y la relación de presión varían en función de la velocidad, pero únicamente con un rango limitado y sólo con un sistema de control bien diseñado. (pp. 6-7).

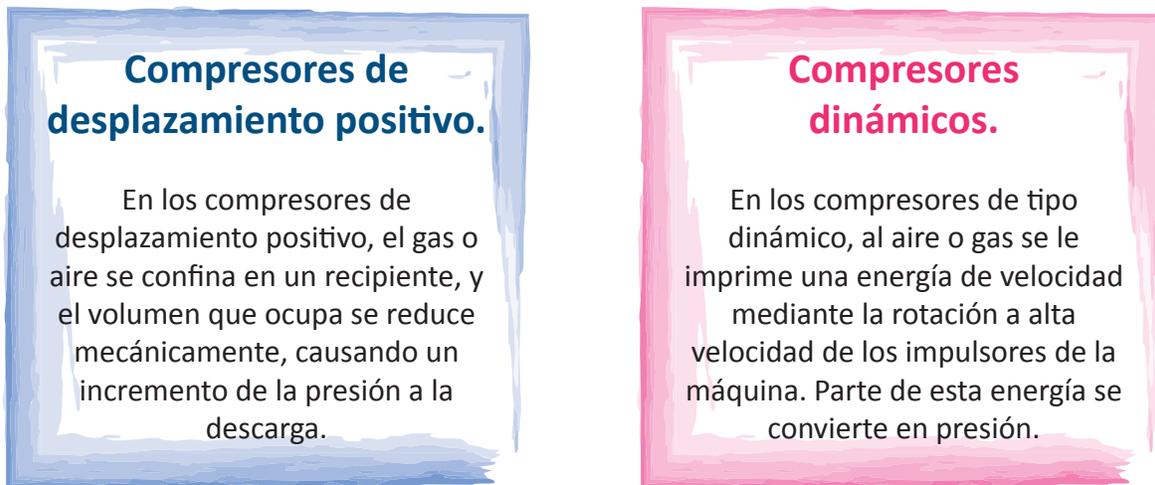


Fig. 1.5 Tipos de energía de gas.
Realizado por el autor.

1.2.3. Tipos de compresores

Los compresores generalmente son clasificados en dos tipos de categorías: Dinámicos y de desplazamiento positivo, debido a su forma de convertir energía. Enseguida se muestran los tipos de compresores según su clasificación.

La clasificación de los compresores se realiza con ayuda de la tabla de *Types of Compressors* de Heinz P. Bloch y John J. Hoefner (1996) en su libro *Reciprocating Compressor* (p. 8).

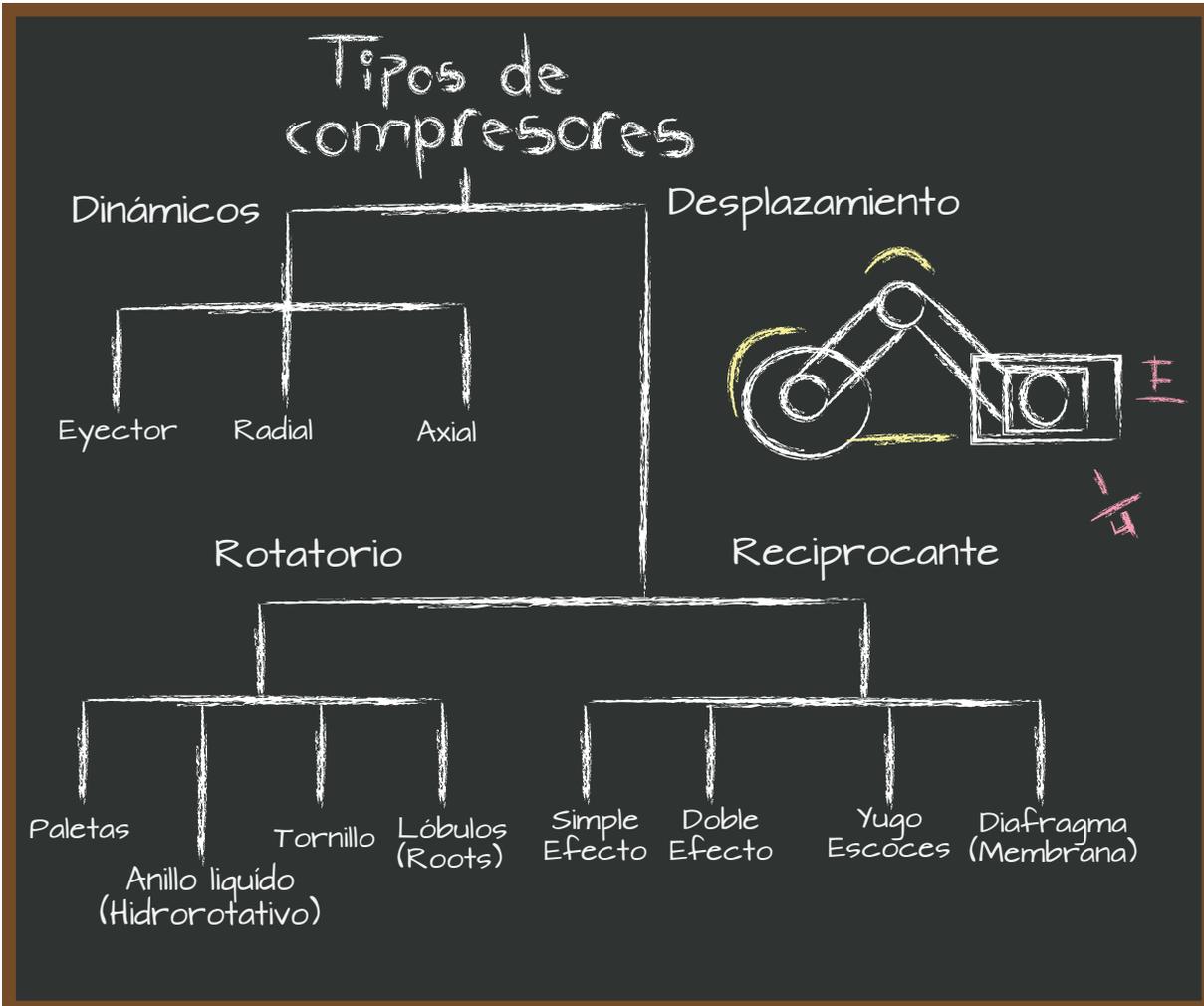


Fig. 1.6 Tipos de compresores.
Realizado por el autor.

1.2.4. Compresor reciprocante

El compresor reciprocante también conocido como de pistón, es una máquina de desplazamiento positivo de flujo intermitente que actúa mediante un émbolo dentro de un cilindro.

El elemento básico de la compresión en un compresor reciprocante es un cilindro, que comprime el gas en solo en una dirección del pistón lo cual se conoce como acción de simple efecto. Cuando existe compresión en ambos lados del pistón, se le llama de doble efecto y consiste de dos de simple efecto operando en paralelo en un sólo pistón.

El movimiento rotatorio proporcionado al eje del compresor es convertido en movimiento alternativo (movimiento lineal), mediante un mecanismo que logra conectar los dos movimientos, por lo general se utiliza un cigüeñal y una biela para lograr la transformación de movimiento.

La válvula de succión y la válvula de descarga se encuentran en la parte superior e inferior del cilindro. Éstas por lo general son válvulas *check*, que sólo permite el flujo en una dirección. El movimiento del pistón dirigiéndose a la parte superior de cilindro crea un vacío en la parte inferior, la presión diferencial entre la presión de admisión y el vacío se encuentra sobre la válvula de admisión provocando que las válvulas se habrán, permitiendo el paso de aire dentro del cilindro desde la línea de entrada.

En el regreso del pistón, cuando la presión en el cilindro excede la presión de la línea de descarga, las válvulas de descarga se abren, permitiendo que el aire a presión se descargue fuera del cilindro.

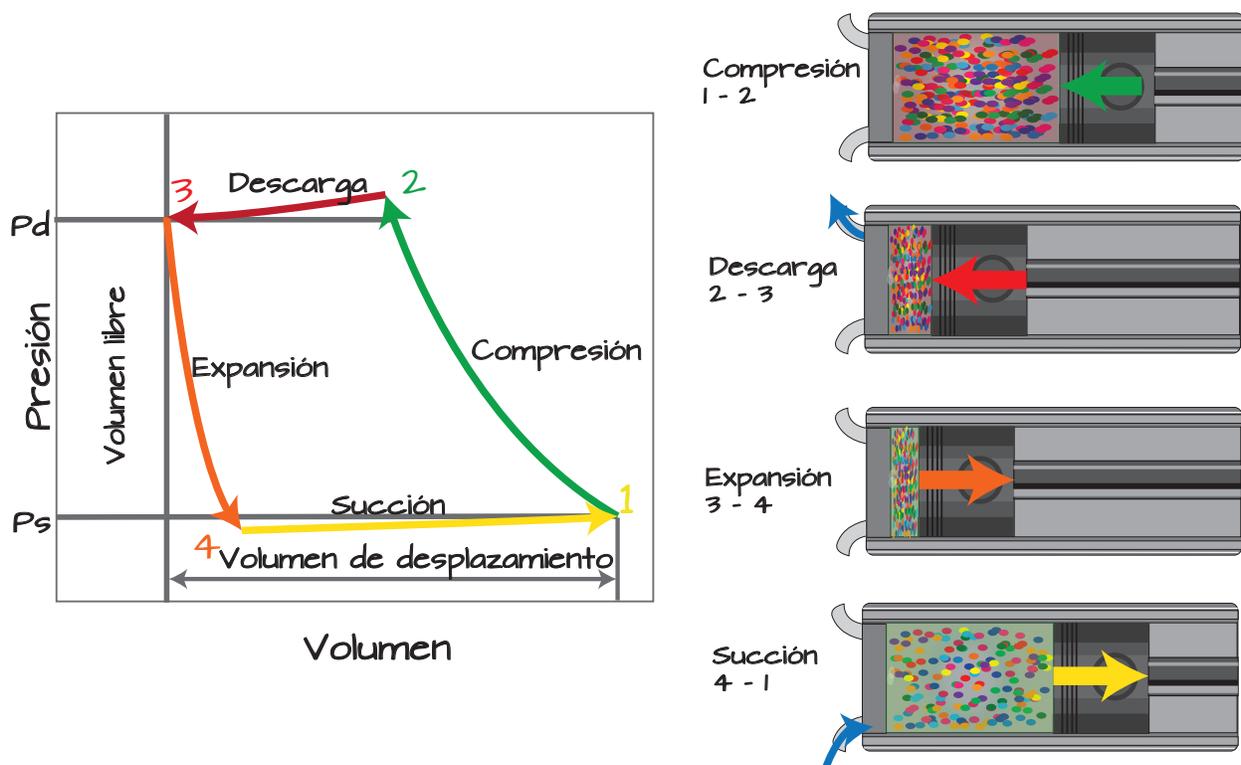


Fig. 1.7 Ciclo de compresión de un compresor recíprocante.
Realizado por el autor.

1.3. Trabajo

Jhon Avison (1989) en su libro *The World of Physics* dice que todas las máquinas, simples o complejas, permiten que una fuerza externa se aplique en cualquier lugar y ésta sirva para vencer otra en un lugar diferente. Superar una fuerza implica hacer trabajo.

Las máquinas en acción realizan trabajo tomando energía de alguno de sus extremos alimentado a otro extremo, entonces para entender a las máquinas necesitamos mirar cuidadosamente lo que nosotros entendemos por trabajo (p. 106).

Por lo que, en general se realiza trabajo sólo si un objeto se desplaza de un punto a otro mientras se le aplica una fuerza.

Yanus A. Cengel y Michael A. Boles (2012) mencionan que existen diversas formas de hacer trabajo, cada una relacionada de cierta manera con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia. En la mecánica elemental, el trabajo que realiza una fuerza constante F sobre un cuerpo que se desplaza una distancia s en la dirección de la fuerza se expresa como (p. 66).

$$W = Fs$$

Si la fuerza F no es constante, el trabajo realizado se obtiene al sumar las cantidades diferenciales del trabajo (integrando, para efectuar la integración es necesario saber cómo varía la fuerza con el desplazamiento).

$$W = \int_{s_2}^{s_1} F ds$$

Existen dos requisitos los cuales son fundamentales para que se presente una interacción de trabajo entre un sistema y el exterior:

1. Debe haber una fuerza que actúe sobre los límites.
2. Los sistemas deben moverse.

1.3.1. Trabajo de flecha

Yanus A. Cengel y Michael A. Boles (2012) en su libro Termodinámica dicen que la transmisión de energía mediante un eje rotatorio (flecha), es una práctica común en la ingeniería. Con frecuencia el momento de torsión τ aplicado a un eje es constante, lo cual significa que la fuerza F aplicada también es constante. Para un determinado momento de torsión constante, el trabajo hecho durante n revoluciones se determina así. Una fuerza F que actúa por medio de un brazo de momento r genera un momento de torsión τ (p. 66).

$$\tau = Fr \rightarrow F = \frac{\tau}{r}$$

Esa fuerza actúa a lo largo de una distancia s , que se relaciona con el radio r mediante:

$$s = (2\pi r)n$$

El trabajo de flecha se determina a partir de:

$$W_{Flecha} = Fs = \left(\frac{\tau}{r}\right)(2\pi rn) = 2\pi n\tau$$

La potencia transmitida mediante la flecha es el trabajo de flecha por unidad tiempo, que se puede expresar como:

$$\dot{W}_{Flecha} = 2\dot{n}\pi\tau$$

Donde \dot{n} es el número de revoluciones por unidad de tiempo.

1.3.2. Trabajo de frontera móvil

José Alfredo Jiménez Bernal, Claudia Del Carmen Gutiérrez Torres y Juan Gabriel Barbosa Saldaña (2014) explican que en un sistema cerrado pueden ocurrir procesos sin flujo de masa a través de las fronteras del sistema. Sin embargo, la sustancia que conforma ese sistema termodinámico puede expandirse o comprimirse efectuando trabajo contra las fronteras del sistema, o bien, recibiendo trabajo desde las fronteras del mismo (p. 35).

El trabajo de frontera móvil relacionado con compresores reales no se puede determinar de forma precisa a partir solamente un proceso termodinámico, porque el émbolo por lo regular se mueve a altas velocidades, lo cual dificulta que el gas en el interior de la máquina mantenga su equilibrio.

Por ser una función de la trayectoria, no se puede conocer de forma analítica sin conocer dicha trayectoria. Por lo que el trabajo de frontera móvil en compresores reales se determina mediante mediciones directas.

De manera analítica se puede conocer el trabajo de frontera móvil solo en un proceso cuasiestático, el cual permanece cercano al equilibrio todo el tiempo, para este caso es el comportamiento que presenta los compresores a velocidades muy bajas .

Si se considera un gas encerrado en un dispositivo cilindro-émbolo como se muestra en la Figura 1.8. La presión del gas es P , el volumen total es V , y el área de sección transversal del émbolo es A . Si se desplaza el émbolo de una distancia ds de manera que se conserve el estado de cuasiequilibrio, el trabajo diferencial que se obtiene durante el proceso es:

$$dW_b = Fds = PAds = PdV$$

Donde el trabajo de frontera móvil en la forma diferencial es igual al producto de la presión absoluta P y el cambio diferencial en el volumen dV del sistema.

El trabajo total del proceso se obtiene con la suma de los trabajos diferenciales del movimiento del émbolo desde su estado inicial hasta el final, el cual se puede representar mediante la siguiente integral:

$$W_b = \int_1^2 PdV$$

La integral se puede obtener solo si se conoce la relación que existe entre P y V durante el proceso la cual es el mismo al área bajo la curva en un diagrama P-V como se muestra en la fig. 1.8.

Un gas puede seguir varias trayectorias cuando se expande de un estado a otro. En general, cada trayectoria tendrá debajo un área diferente y, puesto que ésta representa la magnitud del trabajo hecho será diferente para cada proceso debido a que el trabajo es una función de la trayectoria.

Obteniendo los datos de forma experimental es posible graficar el diagrama P-V del proceso con puntos obtenidos, lo cual permite calcular el área bajo la curva de forma gráfica y así obtener el trabajo hecho.

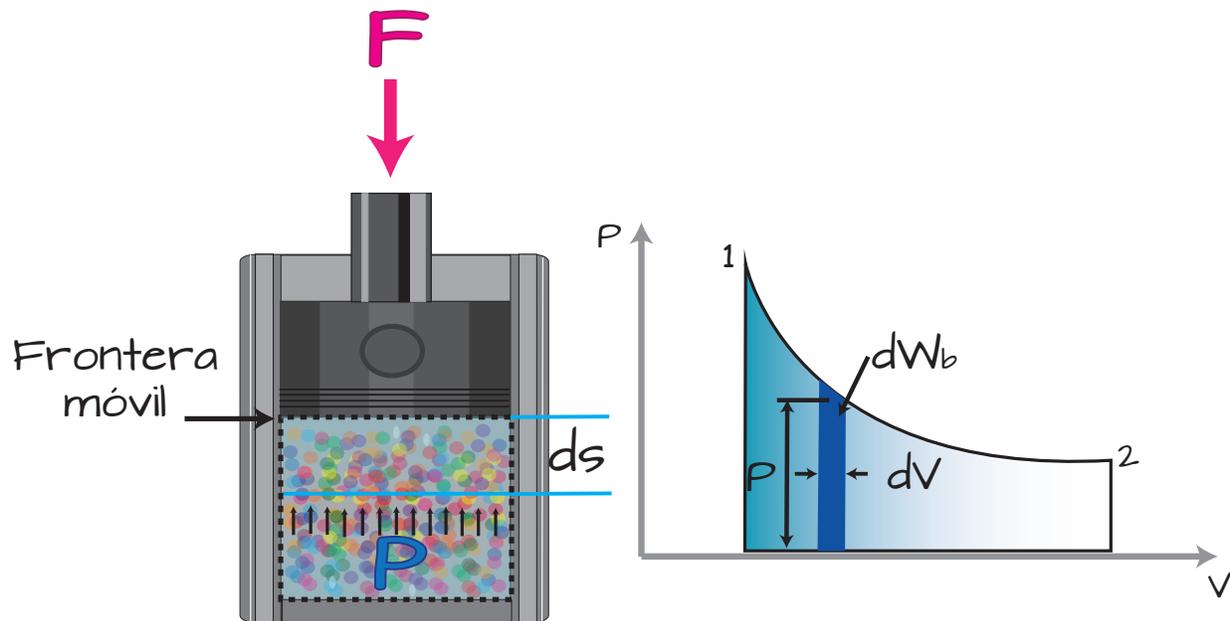


Fig. 1.8 Trabajo de frontera móvil.
Realizado por el autor.

1.4. Adquisición de señales

El mundo se ve rodeado de un innumerable número de señales que son producidas por la naturaleza o por el mismo hombre, como por ejemplo los cambios de temperatura que hay en un invernadero, la variación de presión que existe en el interior de una caldera o incluso la presión arterial de una persona. Esas señales brindan la información necesaria para conocer cómo se comportan los fenómenos que están presentes dentro y fuera de un sistema. Es por eso que la adquisición de señales es de suma importancia para los bancos de pruebas.

1.4.1. Transductores y Sensores

Ramón Pallás Areny (2003) menciona que se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta. Es, por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro. Ésto significa que la señal de entrada es siempre una energía o potencia, pero al medir, una de las componentes de la señal suele ser tan pequeña que puede despreciarse, y se interpreta que se mide sólo la otra componente. En la transducción siempre se extrae una cierta energía del sistema donde se mide, por lo que es importante garantizar que esto no lo perturba.

Dado que hay seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas), cualquier dispositivo que convierte una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería considerarse un transductor, y la señal de salida podría ser de cualquier forma física <<útil>>.

Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transfusible que es función de la variable medida.

Sensor y transductor se emplean a veces como sinónimos, pero sensor sugiere un significado más extenso: La ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas por los sentidos. Transductor, en cambio, sugiere que la señal de entrada y la de salida no deben ser homogéneas.

La distinción entre transductores de entrada (señal física/señal eléctrica) y transductor de salida (señal eléctrica/presentación). La tendencia actual, es emplear el término sensor para designar el transductor de entrada, y el término de actuador o accionamiento de información, mientras que los segundos buscan la conversión de energía (pp. 2-3).

1.4.2. Instrumentación

Miguel Ángel Pérez García en su libro Instrumentación Electrónica (2014) dice que la instrumentación es una rama científico-técnica cuyo objetivo es mejorar la capacidad de percepción de la realidad mediante el uso de cualquier tipo de técnicas y sistemas. La percepción de la realidad hace referencia a la extracción de información del entorno, de un sistema o de un proceso mediante la identificación y cuantificación de sus variables características.

Los sistemas de instrumentación electrónica entregan la información mediante señales eléctricas, listas para ser procesadas por otros sistemas electrónicos, tales como microprocesadores, microcontroladores, computadoras entre otros. Un sistema de este tipo suele tener una estructura como la que se presenta en la figura 1.9 (p. 3).

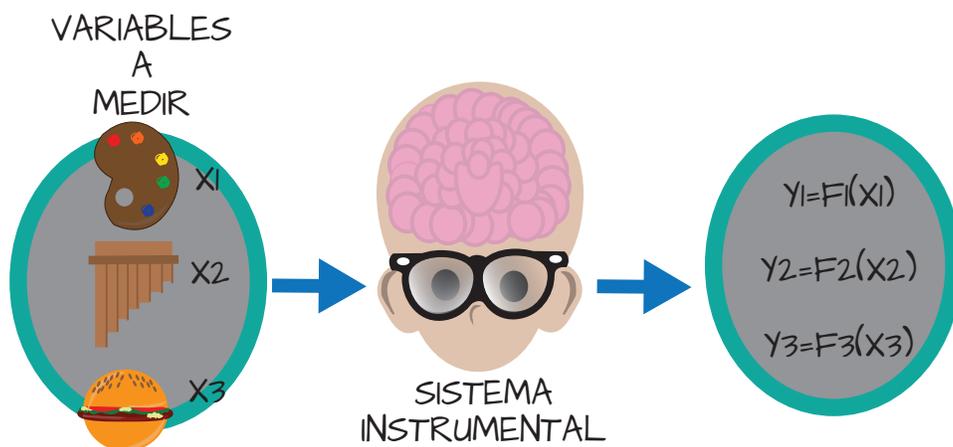


Fig. 1.9 Concepto general de un sistema instrumental.
Realizado por el autor.

Miguel Ángel Pérez García (2014) explica que en un sistema así, el sensor recibe la información de la variable X que se pretende medir y produce algún tipo de señales eléctricas (tensión, corriente o carga) o modifica los valores de algún parámetro eléctrico (resistencia, capacidad, inductancia...). El término sensor representa el concepto genérico de lectura de una información y entrega de una señal de salida en función de esa información.

Las salidas producidas por el sensor se representan mediante la tensión entre dos puntos de un circuito o la corriente a través de un elemento donde las cuales pueden variar en el tiempo y mostrar la información que se necesita, las cuales suelen precisar una cierta adaptación para obtener un valor aceptable. Esto se realiza mediante un **circuito de acondicionamiento** (p. 4).

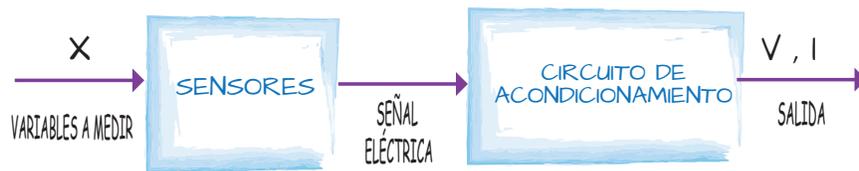


Fig. 1.10 Estructura básica de un sistema instrumental.
Realizado por el autor.

La señal eléctrica producida a la salida de un sistema de instrumentación puede variar en el tiempo y mostrar la información que se necesita. Dichas señales eléctricas utilizadas para representar información se clasifican de la siguiente manera.

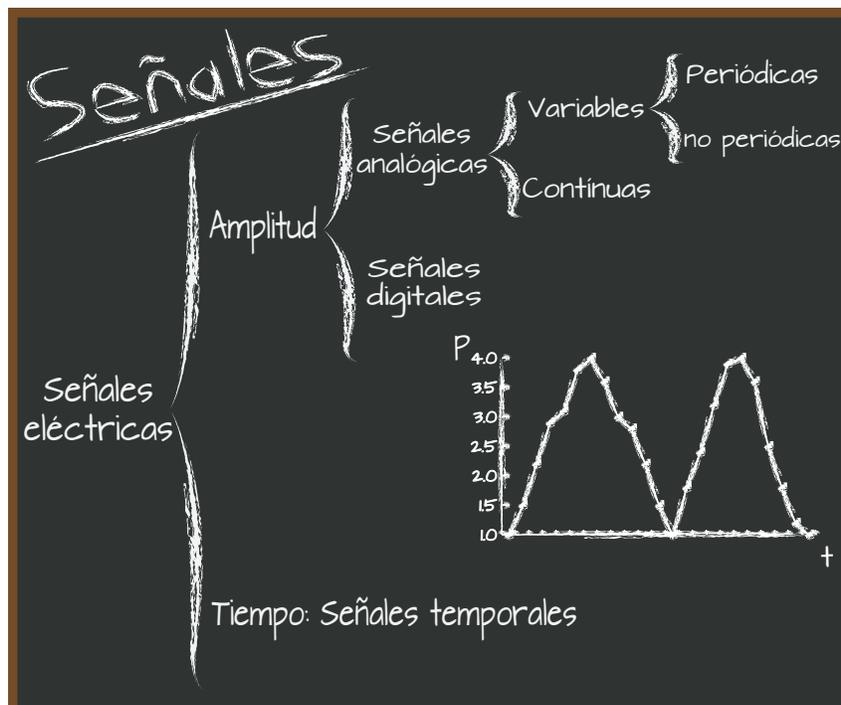


Fig. 1.11 Tipo de señales.
Realizado por el autor.

1.4.3. Procesamiento de señales

El procesamiento de señales es la aplicación de una serie de operaciones lógicas y matemáticas a un conjunto de datos provenientes de una señal mediante el uso de circuitos eléctricos. En el caso de las señales continuas se ha revolucionado debido a la llegada de las señales digitales, ya que las señales digitales se pueden representar con números binarios y a su vez procesarse por medio de los mismos circuitos lógicos utilizados en computadoras digitales, facilitando el trabajo y con ello obtener una ventaja mayor en múltiples aplicaciones; debido a que las señales pueden almacenarse para un uso posterior y con ello realizar su manipulación futura.

Este procesamiento se logra convirtiendo una señal continua en una señal discreta y, después convirtiéndola nuevamente en una señal continua.

Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky y S. Hamid Nawab (1998) explican que el enfoque del procesamiento de señales se puede considerar como la conexión en serie de tres bloques como se muestra en la figura 1.12 donde $x_c(t)$ y $y_c(t)$ son señales continuas y $x_d[n]$ y $y_d[n]$ son sus señales discretas correspondientes. El sistema total es, de hecho, un sistema continuo en el sentido de la entrada y la salida del sistema son ambas señales continuas. La base teórica para la conversión de una señal continua a una señal discreta y la reconstrucción de una señal continua a partir de su representación de tiempo discreto reside en el teorema de muestreo (p. 534).

$$x_d[n] = x_c(nT)$$

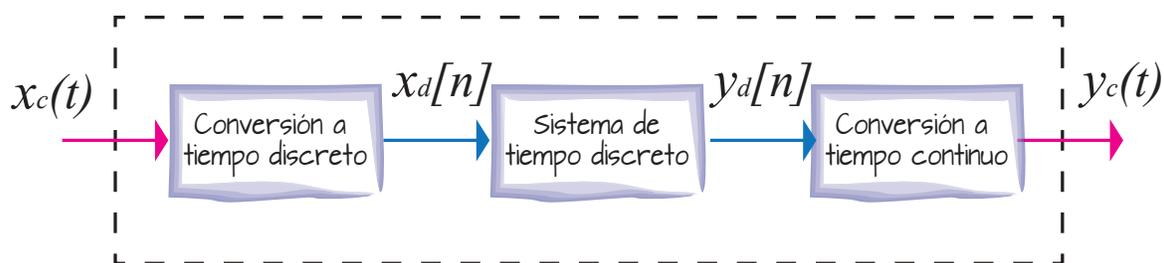


Fig. 1.12 Procesamiento de tiempo discreto de señales continuas.
Realizado por el autor.

1.4.4. Muestreo y cuantización

El muestreo es parte fundamental para la adquisición de señales debido su facilidad práctica. Por lo que para procesar una señal analógica por medios digitales es necesario convertirla en una señal digital en dos pasos. Ashok Ambardar (2002) menciona que primero se debe muestrear, por lo común en intervalos uniformes t_s . La cantidad discreta nt_s se relaciona con el índice entero n . luego, debemos cuantizar los valores de la muestra (amplitudes). Tanto como el muestreo como la cuantización conducen a una perdida potencial de información. La buena noticia es que la señal puede muestrearse sin pérdida de información si la señal continua está limitada en una banda en alguna frecuencia finita.

El muestreo ideal describe una señal muestreada como una suma ponderada de impulsos, en la que los factores de la ponderación son iguales a los valores de la señal analógica en los instantes donde ocurren los impulsos. Una señal muestreada idealmente $x_I(t)$ puede considerarse como el producto de una señal analógica $x(t)$ y un tren periódico de impulsos $i(t)$.

La señal muestreada idealmente puede describirse en forma matemática como:

$$x_I(t) = x(t)i(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nt_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nt_s) \delta(t - nt_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \delta(t - nt_s)$$

En esta expresión, la señal discreta $x[n]$ representa simplemente la secuencia de valores muestra $x(nt_s)$. Es evidente que la operación de muestreo conduce a una pérdida potencial de información en la señal muestreada en forma ideal $x_I(t)$ cuando se le compara con su contra parte analógica subyacente $x(t)$. Cuanto más pequeño sea el intervalo de muestreo t_s , menor será esta pérdida de información. De manera intuitiva, siempre deb existir alguna pérdida de información, sin importar cuán pequeño sea el intervalo de muestreo utilizado (pp. 446-447).

Metodología de diseño

Capítulo

2

La mayoría de las veces el éxito de las empresas depende de la capacidad que tengan para identificar las necesidades de los clientes, así como sus propias necesidades. Las empresas dependen del nivel de satisfacción de las necesidades particulares de los clientes, las cuales en muchas ocasiones no son totalmente claras o no se tiene conocimiento de ellas, es por ello que un buen análisis y reconocimiento de las nuevas exigencias o demandas no satisfechas por completo, abren un camino para la creación de productos o desarrollo de tecnologías. Por otro lado la identificación de necesidades de la organización es un trabajo que se realiza para el crecimiento y desarrollo organizacional, en el cual de igual manera se puede desarrollar tecnología o nuevos procesos que incrementen la eficiencia y la optimización del tiempo y los recursos, partiendo de una buena planeación y desarrollo intelectual del capital humano.

Por lo cual en la creación de productos o desarrollo de tecnologías es importante que los proyectos de innovación y diseño se guíen por un proceso que incremente la probabilidad de éxito de la empresa frente a la competencia y las demandas del mercado.

Gran parte del éxito es gracias a la sinergia que existe en los proyectos conformados por equipos interdisciplinarios con un fuerte enfoque en la creatividad para el logro de los objetivos. Dentro de una empresa el conjunto de personas, quienes crean productos o desarrollan tecnologías, idealmente deben de ser de múltiples disciplinas y poseer diversas habilidades y conocimientos que fortalezcan la generación de ideas y soluciones que enriquezcan al equipo. Los equipos tienen la finalidad de identificar las necesidades, y de forma eficiente generar innovación para satisfacerlas.

Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger (2013) nos dicen que “un proceso es una secuencia de pasos que transforman un conjunto de entradas en un conjunto de salidas, donde muchos de estos pasos y actividades son intelectuales y organizacionales más que físicos” (p. 12).

Un proceso bien definido de desarrollo de diseño es útil para el aseguramiento de la calidad, la coordinación, la planeación, la administración y mejoría en cada una de las áreas de la empresa. El proceso dependerá de la capacidad de cada empresa, y con ello el diseño se debe de adecuar a los alcances y restricciones del proceso, y aun así en algunos casos el diseño tiene holgura ante el proceso.

Una forma de explicar brevemente el proceso de desarrollo de diseño es la generación de un amplio conjunto de conceptos variados, los cuales puede interactuar y mezclarse entre sí, para obtener el o los mejores conceptos que ayudarán a desarrollar de forma paulatina y detallar gradualmente el producto final. Hasta el punto en el que llegue a ser confiable y repetible.

Con base a los beneficios y utilidades que brinda un proceso de diseño, se implementó en el diseño del banco de pruebas un derivado del proceso de desarrollo del producto, planteado por Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger. El proceso es conocido como Proceso de Desarrollo del Producto en Espiral (utilizado para productos de rápida elaboración), el cual se basa principalmente en construir y probar modelos en prototipos. Siendo este un proceso de alta rapidez que el ciclo de diseño-fabricación-prueba se puede repetir varias veces.

El proceso propuesto por Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger se muestra de forma esquemática a continuación .

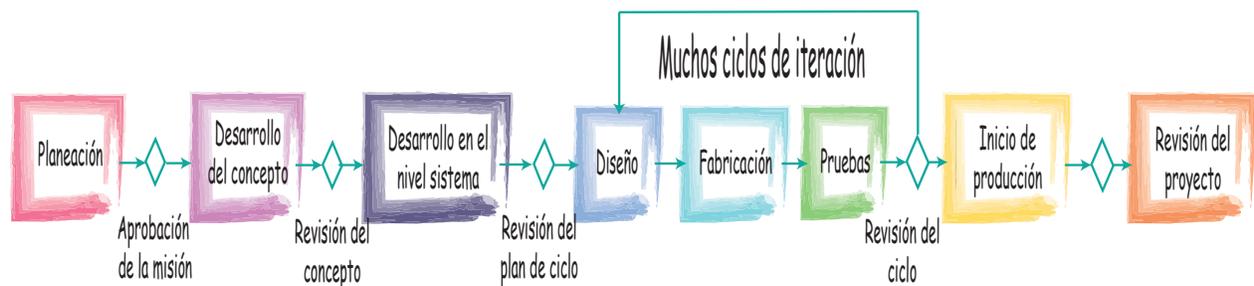


Fig. 2.1 Proceso de desarrollo del producto en espiral
Tomado de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger (2013) p. 23.

El proceso de desarrollo utilizado para el diseño del banco de pruebas quedó de la siguiente manera.

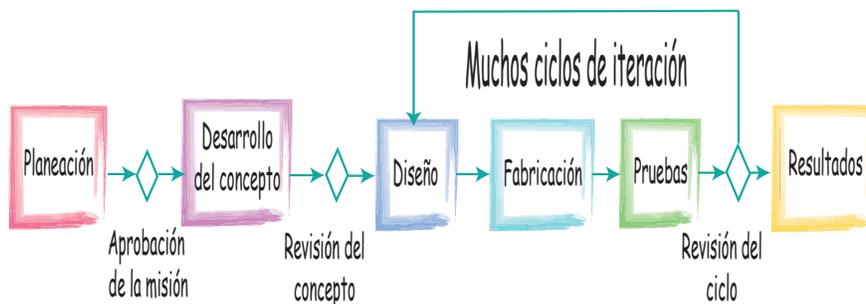


Fig. 2.2 Proceso de desarrollo utilizado por el equipo.
Realizado por el autor.

Diseño del banco de pruebas

Capítulo

3

El diseño de los bancos de pruebas surge por el interés que tiene la empresa Mabe en la investigación, la innovación y el diseño, que en vinculación con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) buscan el desarrollo de nuevas tecnologías que tengan un impacto positivo para el crecimiento de la empresa.

Uno de los proyectos que tiene Mabe con la UNAM está enfocado en el área de compresores de electrodomésticos, cuyo principal objetivo es conocer a detalle su tecnología en compresores, brindando libertad a la academia universitaria para estudiar y crear conocimiento en esa área. Como se mencionó en el capítulo anterior, el proceso de diseño implementado es un derivado del Proceso de Desarrollo del Producto en Espiral. Consta de 4 etapas: planeación, desarrollo del concepto, ciclo iterativo y resultados.

3.1. Proceso de desarrollo para el banco de pruebas de mecanismos de compresión

3.1.1. Planeación

Al haber establecido el objetivo se formó el equipo de diseño, conformado por pasantes de la Facultad de Ingeniería de las disciplinas de mecánica y mecatrónica, con el asesoramiento de doctores expertos en el área de diseño e ingeniería. En ciertas etapas y presentación de avances, el cliente mantuvo constante retroalimentación.

La primer tarea del equipo de diseño fue realizar una investigación con la finalidad de adentrarse y especializarse en el área de estudio, mecanismos de compresión, así como conocer los riesgos y restricciones que se pudieran presentar durante el desarrollo del proyecto, y evaluar las nuevas tecnologías existentes en el área de compresores, para poder asignar recursos y presupuesto al proyecto.

La siguiente tarea fue determinar la ruta de acción para el proyecto, de ahí que se decidió comparar distintos compresores de marcas competitivas, incluyendo el del cliente. El fin, conocer las características más importantes que existen en cada mecanismo de compresión, mediante el trabajo de flecha de cada uno, con igualdad de condiciones, y poder recomendar aquél que requiere menor energía por ciclo de compresión, lo cual se conseguiría mediante un banco de pruebas para la caracterización de mecanismos de compresión.

3.1.2. Desarrollo del concepto

I. Necesidades del cliente

Para generar los conceptos es necesario identificar las necesidades del cliente porque es esencial tener un camino claro, sin ambigüedades ni divagaciones en torno al problema, además de crear una buena comunicación y transmisión de la información entre el cliente y los desarrolladores. Por esta razón el equipo de diseño de la UNAM visitó el Centro de Tecnología y Desarrollo de Proyectos de Mabe para el levantamiento de información de las necesidades, mediante entrevistas y posterior contacto vía telefónica con las personas encargadas de diseño de electrodomésticos de la empresa.

Con la información obtenida se logró el acercamiento con el cliente para el diseño del banco de pruebas, donde surgieron y ponderaron las siguientes necesidades:

1	Conocer las características de los mecanismos de compresión de electrodoméstico de la empresa Mabe.
2	Conocer las debilidades de los mecanismos, para sugerir posibles mejoras.
3	Comparar los mecanismos de compresión de Mabe con respecto a los de la competencia.

Tabla 3.1 Necesidades del cliente.
Realizado por el autor.

Con la información recopilada se realizó una interpretación de las necesidades, las cuales son enfocadas al desarrollo del banco de pruebas y se expresa con el siguiente enunciado.

Necesidades	Enunciado de necesidades
Conocer las características de los mecanismos de compresión de electrodoméstico de la empresa Mabe.	El banco de pruebas, caracteriza cualquier tipo de mecanismo de compresión de electrodoméstico, resaltando sus cualidades y debilidades.
Conocer las debilidades de los mecanismos, para sugerir posibles mejoras.	
Comparar los mecanismos de compresión de Mabe con respecto a los de la competencia.	

Tabla 3.2 Interpretación de las necesidades.
Realizado por el autor.

II. Especificaciones para el banco de pruebas

Como en el punto anterior, identificación de necesidades, al puntualizar las especificaciones se busca eliminar la interpretación subjetiva que se puede llegar a tener de las necesidades anteriormente analizadas para la construcción del banco de pruebas. La mayoría de las especificaciones que se establezcan deben de contar con detalles medibles y precisos enfocadas la para la construcción del banco de pruebas. Para ello el equipo del proyecto aterrizó algunas necesidades para convertirlas en especificaciones, lo cual facilita la selección de conceptos.

A continuación se muestra las especificaciones del banco de pruebas en la Tabla 3.3.

Número	Métrica	Unidad	Valor
1	Frecuencia de comportamiento del banco	Hz	<60
2	Valor máximo a medir de par de torsión	Nm	>-10 < 10
3	Valor máximo a medir de Presión	Psi	< 100
4	Rango a medir de Posición	Grados	0 a 360
5	Tiempo mínimo de montaje y desmontaje del banco	min	5 a 10
6	Tipos compresores que puede caracterizar el banco	No aplica	Todos los de electrodoméstico
7	Reproducibilidad en las pruebas	% (error)	< 5
8	Facilidad en manipulación de datos posterior a las pruebas	No aplica	Mediante software conocido

Tabla 3.3 Especificaciones del banco de pruebas.
Realizado por el autor.

III. Generación de concepto

Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger (2013) “definen que el concepto es una descripción concisa de la forma en que el producto va a satisfacer las necesidades del cliente” (p. 120).

Para la generación de conceptos existe un método de 5 pasos que ayuda a la sistematización de información y exploración de alternativas que generen soluciones parciales.

El primer paso del método es la descomposición de un problema complejo en subsistemas o subproblemas más sencillos, y así facilitar el entendimiento del problema. Después se continúa con la búsqueda interna y externa de posibles soluciones. Por cuarto paso se tiene a la utilización de árboles de clasificación y tablas de combinación de conceptos, para explorar de manera sistemática los conceptos de solución. Por último se realiza una retroalimentación para la validez y la aplicación de los resultados, y así concretar y crear el concepto final.

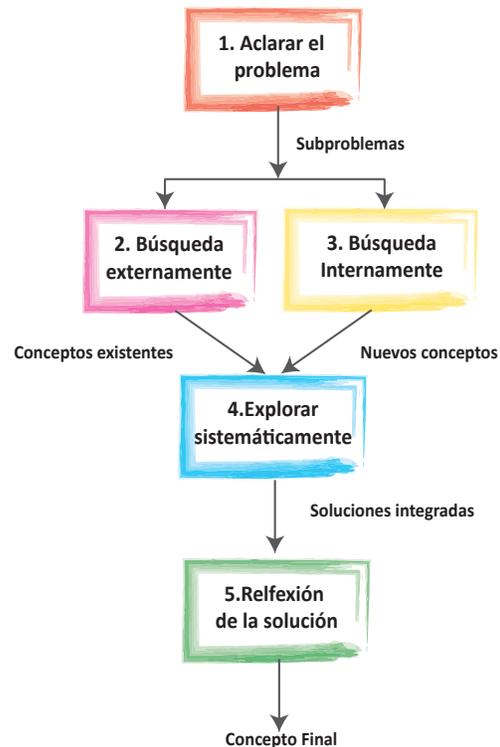


Fig. 3.1 Método de los 5 pasos. Tomado de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger (2013) p. 122.

El equipo se basó en el método de 5 pasos para generar conceptos, aunque por tiempo y número de soluciones posibles solamente se siguieron 4 de los 5 pasos, omitiendo la parte de la exploración sistemática. Los resultados de la generación de conceptos, utilizando los 4 pasos, se muestran en el siguiente diagrama.

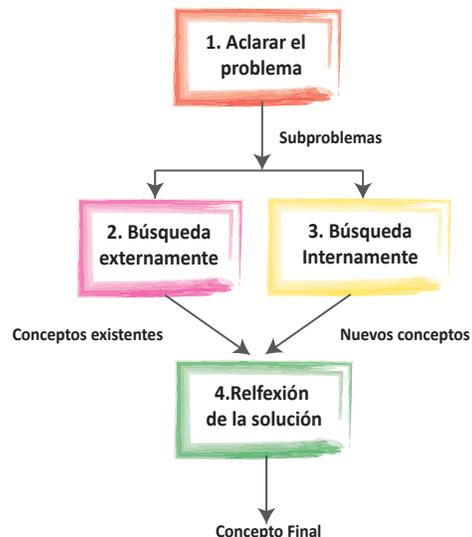


Fig. 3.2 Método de los 4 pasos. Realizado por el autor.

i. Aclarar el problema

Para aclarar el problema de forma simple se estableció que la finalidad del reto era **“Realizar un banco de pruebas para conocer las características de los mecanismos de compresión de electrodomésticos al mostrar sus debilidades y así sugerir posibles mejoras, realizando comparaciones con compresores líderes en el mercado”**.

Es por ello que la concepción del banco de pruebas tiene por objeto conocer el trabajo requerido en un mecanismo de compresión, mejor conocido como trabajo de flecha, el cual debe de actuar en condiciones constantes de velocidad angular y presión; de ahí que el equipo precisaba el estudio exclusivo del mecanismo.

Por conjetura para la exploración y comprensión del sistema a estudiar, se estableció la condición de suministrar aire por la válvula de descarga a una presión constante, bloqueando en posición de abertura la válvula de descarga para que no se pueda cerrar y el aire entre libremente en la cámara a la presión deseada (la válvula de succión se deja funcionando normalmente ya que la presión en la cámara es mayor que la atmosférica, por consiguiente siempre permanecerá cerrada).

La presión se pretende que permanezca constante para que el par de torsión sólo cambie con la posición del compresor y no sea función de la presión.

Así mismo, el trabajo de flecha se pretende medir mediante un sensor de par de torsión, entre el motor transmisor de energía y la flecha del mecanismo de compresión.

Al seguir el método, para la generación de conceptos, se realizó la descomposición funcional del sistema mediante un diagrama de flujo como se muestra en la Figura 3.4, creando una descripción más específica de las funciones de cada elemento del banco de pruebas para concebir la función general de este, haciendo más sencillos los subsistemas y así poder trabajar con ellos.

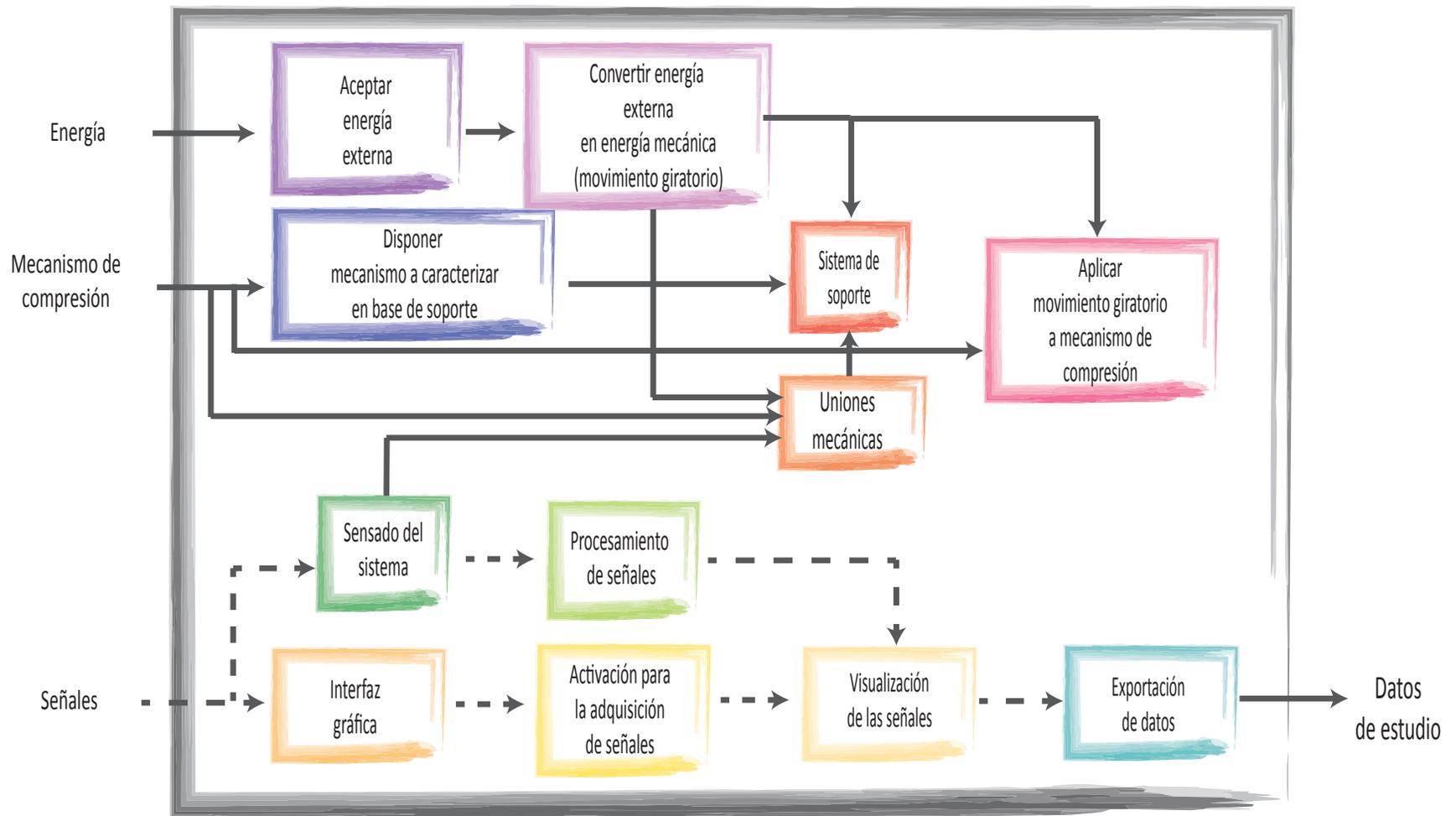


Fig. 3.3 Diagrama funcional.
Realizado por el autor.

De la simplificación funcional del sistema el equipo se dividió en áreas con funciones específicas a desarrollar, lo que ayudó al equipo en la búsqueda de soluciones dependiendo la especialización de cada disciplina. Con objeto de mostrar las posibles soluciones de cada área, y después analizarlas en equipo. Cada propuesta de solución debería ser supervisada constantemente por los asesores expertos, para tomar en cuenta su experiencia y conocimientos, de tal manera que se restara la ambigüedad y subjetividad.

El fin de la división por áreas fue el garantizar el buen desempeño en la generación de conceptos. Las áreas y funciones de cada una de ellas se muestran en la siguiente figura.

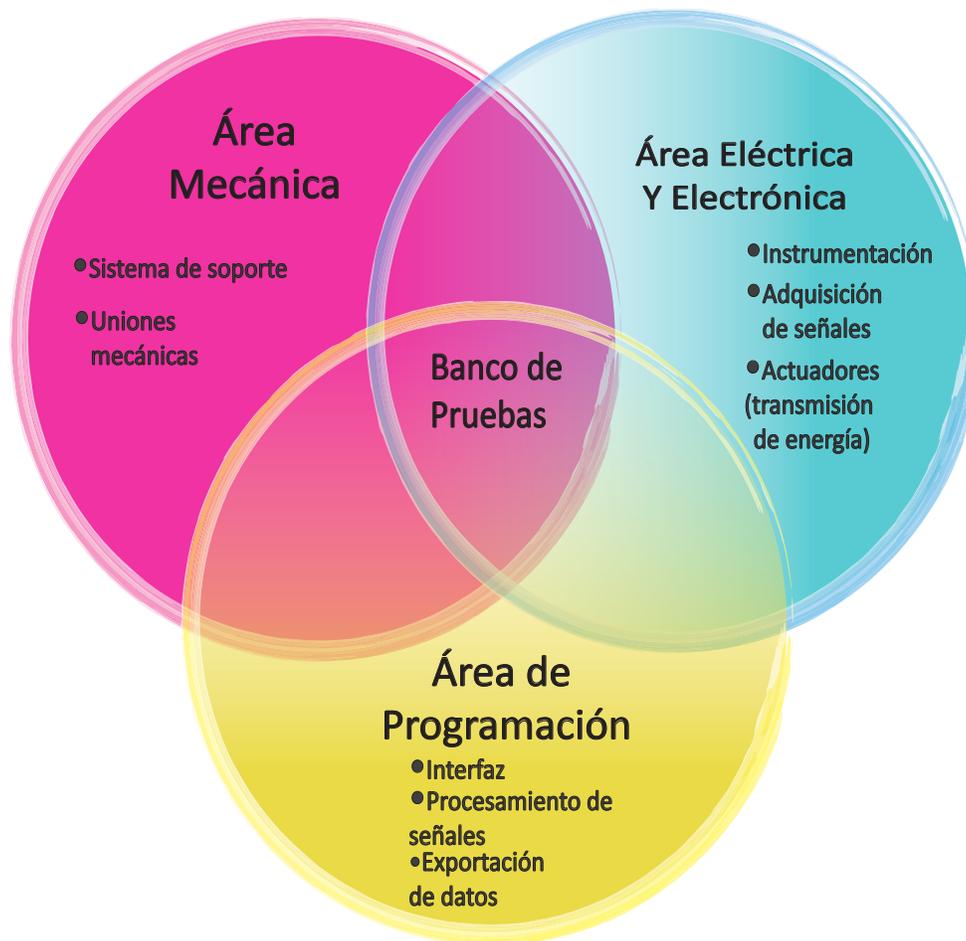


Fig. 3.4 Áreas.
Realizado por el autor.

ii. Buscar Internamente

En la generación de soluciones, cada área llevó a cabo una búsqueda interna proponiendo diversos conceptos de forma individual, que después en equipo se analizaron y evaluaron para poder transformarlos en soluciones concretas y viables que pudieran implantarse. Aprovechando la creatividad y experiencia de cada integrante del equipo; con el fin de recabar información útil y adaptarla a un problema en espera de solución.

Cabe mencionar que la creatividad no sólo se aplicó en la generación de soluciones, también al adaptarse al restringido presupuesto y materiales que en ese momento se puso a disposición del equipo, aprovechando cada recurso para reducir costos, tiempo de elaboración y tiempo de entrega de dispositivos.

Con la interacción del equipo y el aprovechamiento de los materiales asignados, se obtuvieron soluciones en los subproblemas de la búsqueda interna.



• Base de soporte (Bancada).
• Base de mecanismo.
• Programación interfaz gráfica.
• Sensor de par de torsión.
• Sensor de posición.
• Sensor de presión.
• Procesamiento de señales.
• Transferencia de energía.

Tabla 3.4 Soluciones de los subproblemas en la búsqueda interna.
Realizado por el autor.

iii. Buscar Externamente

En la búsqueda de soluciones externas el equipo realizó un *benchmarking* (evaluación comparativa de productos relacionados) con el propósito de revelar conceptos existentes, así como la tecnología utilizada en dichos conceptos de modo que se pudieran generar soluciones exitosas. Para mostrar mejor los resultados, véase las siguientes figura 3.6. Las soluciones encontradas y luego seleccionadas en lo antes mencionado fueron enfocadas en el procesamiento de señales y sensado de la posición.

	Modelo de artículo	Puntos a favor	Artículo
	DAQ-NI 9201	<ul style="list-style-type: none"> • 8 canales de adquisición • 12 bits resolución • Rango 10 Volts • Acondicionar de señales 	
	OMG-DAQ-3000	<ul style="list-style-type: none"> • 8 canales de adquisición • 16 bits resolución • Rango 10 Volts 	

Tabla 3.5 Benchmarking de procesamiento de señales.
Realizado por el autor.

Nombre	Familia	Rango de medición	Voltaje de entrada [V]	Tiempo de vida	Notas
Blade 360		360-0º	32-4.8	-	Da diferentes tipos de outputs
Vert-X 13E	Touchless	360-0º	5	ilimitado	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 22E	Touchless	360-0º	5	ilimitado	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 27E	Touchless	360-0º	5	ilimitado	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 31E	Touchless	360-0º	5	ilimitado	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 37E	Touchless	360-0º	5	ilimitado	Un sensor para cada distinto tipo de output
RFA 4000	Touchless	360-0º	5	ilimitado	Un sensor para cada distinto tipo de output
RFC 4800	Touchless	360-0º	5	ilimitado	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 1300	Rotary Shaft	360-0º	5	360 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 1600	Rotary Shaft	360-0º	5	50 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 2100	Rotary Shaft	360-0º	5	360 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 2200	Rotary Shaft	360-0º	5	360 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 2400	Rotary Shaft	360-0º	5	20 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 2800	Rotary Shaft	360-0º	5	50 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
RSC- 2801	Rotary Shaft	360-0º	5	>50 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 3700	Rotary Shaft	360-0º	5	358 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 5100	Rotary Shaft	360-0º	5	359 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
Vert-X 8800	Rotary Shaft	360-0º	5	360 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
MO -450A	Rotary Shaft	360-0º	5 o 30-10	10 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
MO -450D	Rotary Shaft	360-0º	5 o 30-10	10 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
MO -451A	Rotary Shaft	360-0º	5	10 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output
MO -451D	Rotary Shaft	360-0º	5	10 millones de movimientos	Un sensor para cada distinto tipo de output

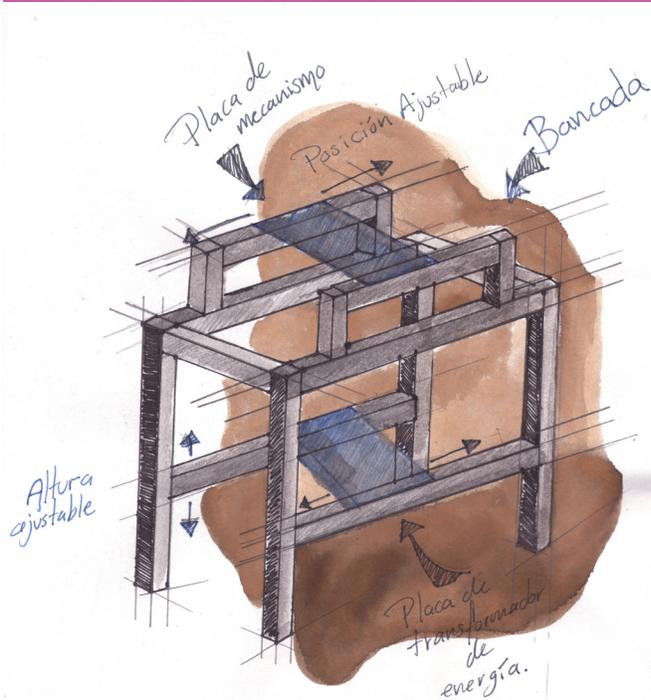
Tabla 3.6 Tabla de Benchmarking para sensor de posición.
Realizado por el autor.

iv. Reflexión de resultados

Las propuestas de conceptos para la solución de los subproblemas, fueron analizadas en una reunión a fin de tener una retroalimentación final para poder corroborar la fiabilidad que existía en el desarrollo e implementación. Estos son los conceptos generados por área:

Área Mecánica

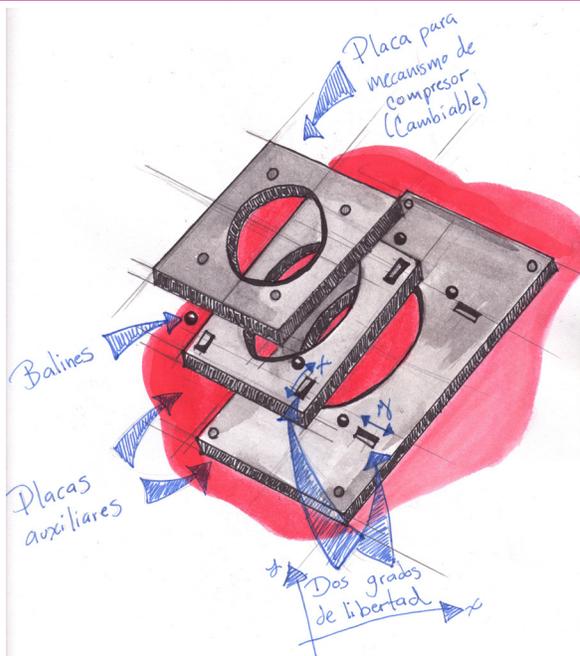
Solución al subproblema para sistema de soporte (Concepto Bancada)



- Alturas y posición de placas ajustable.
- Fácil montaje y desmontaje.
- Perfil de aluminio.

Fig. 3.5 Concepto Bancada. Realizado por el autor.

Solución al subproblema para base de soporte para mecanismo de compresión.
(Concepto Base de mecanismo)



- Evita fuerzas de reacción en la medición de par.
- Placa cinemática de dos grados de libertad.
- Rodamientos y placas auxiliares.

Fig. 3.6 Concepto Base de mecanismo.
Realizado por el autor.

Área Eléctrica y Electrónica

Solución al subproblema Sensor de Par
(Concepto Sensor-Par)



- Rango de Par 17.5 - 0 Nm.
- Salida analógica de voltaje.

Fig. 3.7 Concepto Sensor de Par.

Solución al subproblema Sensor de Presión
(Concepto Sensor-Presión)

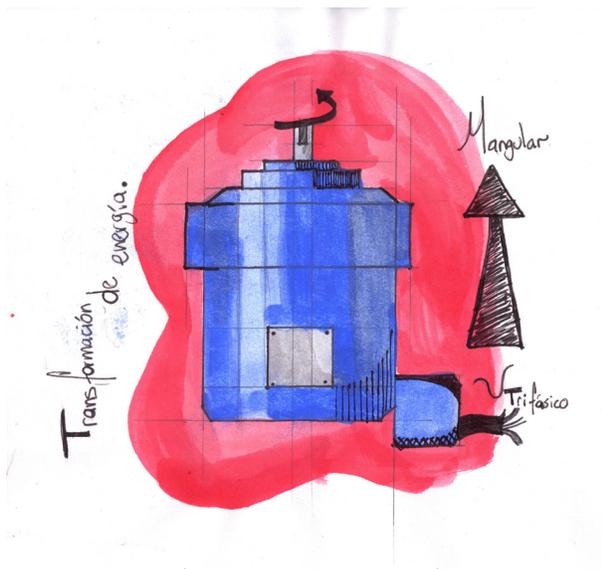
FESTO



- Rango de Presión 10 - 0 Bar.
- Salida analógica de corriente.

Fig. 3.8 Concepto Sensor de Presión.

Solución al subproblema Transferencia de energía
(Concepto Motor)



- Motor trifásico
- Velocidad 9 RPM.

Fig. 3.9 Concepto Motor.
Realizado por el autor.

Solución al subproblema Sensor de Posición (Conceptos Sensor de Posición)

a

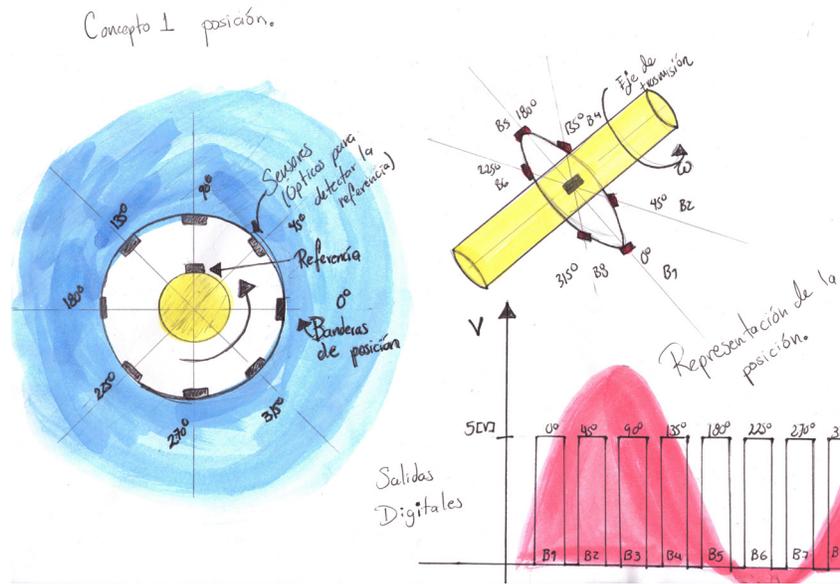


Fig. 3.10 Concepto a) Sensor de Posición.
Realizado por el autor.

b

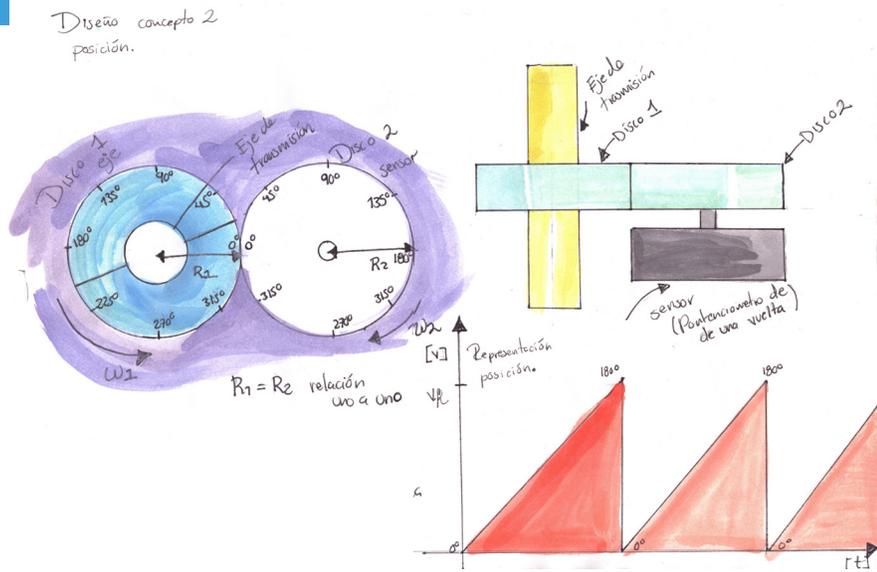
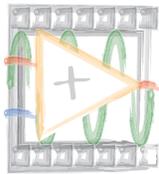


Fig. 3.11 Concepto b) Sensor de Posición.
Realizado por el autor.

Área de Programación

Soluciones al subproblema interfaz gráfica (Concepto Interfaz)



Programación
Labview



Programación
Java



Programación
C#

Fig. 3.12 Concepto Interfaz.
Realizado por el autor.

Soluciones al subproblema procesamiento de señales (Concepto procesamiento señales)



DAQ
National Instruments
NI9201



ARDUINO
Mega 2560



PIC
PIC16F877A



DAQ
OMEGA
OMB-DAQ-3000

Fig. 3.13 Concepto Procesamiento de señales.
Realizado por el autor.

IV. Selección de Concepto

En la selección de conceptos que se realizó fue para comparar puntos relativamente fuertes y débiles para después probar y desarrollar en conjunto todos los conceptos.

Para poder seleccionar los conceptos y encontrar el que más se adecuara a las necesidades, se definieron matrices de selección las cuales se evaluaron y calificaron mediante criterios de selección que los expertos y el equipo propusieron para facilitar la elección de los conceptos finales defendidos en cada área.

Las matrices de selección que se muestran a continuación sirvieron para encontrar el mejor concepto para los subsistemas de procesamiento de señales, programación de interfaz gráfica y sensor de posición.

Criterios de selección	Peso	Concepto A Posición Óptica		Concepto B Posición Potenciómetro	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Fácil elaboración	20%	4	0.8	6	1.2
Menor costo	40%	5	2.0	5	2.0
Resolución de la posición	20%	3	0.6	7	1.4
Facilidad para manipular la señal.	10%	3	0.3	7	0.7
Fácil montaje	10%	5	0.5	5	0.5
	Total de puntos		4.2		5.8
	Lugar		2		1

Tabla 3.7 Matriz de selección Sensor de posición.
Realizado por el autor.

Criterios de selección	Peso	Concepto A Programación Labview		Concepto B Programación Java		Concepto C Programación C#	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Conocimiento del equipo en la plataforma.	20%	5	1	1	0.2	4	0.8
Fácil vinculación con elementos para el procesamiento de señales	25%	5	1.25	2	0.5	3	0.75
Flexibilidad a través de software	20%	4	0.8	3	0.6	3	0.6
Menor tiempo de implementación	15%	4	0.6	3	0.45	3	0.45
Fácil uso de herramientas para visualización de señales.	10%	5	0.5	2	0.2	3	0.3
Fácil uso de herramientas para exportar datos	10%	5	0.5	2	0.2	3	0.3
	Total de puntos		4.65		2.15		3.2
	Lugar		1		3		2

Tabla 3.8 Matriz de selección Interfaz gráfica.
Realizado por el autor.

Criterios de selección	Concepto A DAQ National Instruments			Concepto B Arduino Mega		Concepto C PIC 16F887		Concepto D DAQ Omega	
	Peso	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Conocimiento del equipo del hardware	15%	3	0.45	3	0.45	3	0.45	1	0.15
Acondicionamiento en la tarjeta	5%	5	0.25	1	0.05	1	0.05	3	0.15
Número de entradas analógicas	10%	2	0.2	4	0.4	2	0.2	2	0.2
Mayor resolución en bits	15%	3	0.45	2	0.3	2	0.3	3	0.45
Mayor rango de voltaje de entrada	15%	3	0.45	2	0.3	2	0.3	3	0.45
Menor costo	20%	2	0.4	3	0.6	4	0.8	1	0.2
Facilidad de programación	10%	4	0.4	2	0.2	2	0.2	2	0.2
Facilidad vinculación con Interfaz	10%	5	0.5	2	0.2	2	0.2	1	0.1
	Total de puntos		3.1		2.5		2.5		1.9
	Lugar		1		2		2		3

Tabla 3.9 Matriz de selección Procesamiento.
Realizado por el autor.

Mediante los conceptos establecidos con anterioridad por el equipo y las matrices de selección mostradas en las tablas 3.7, 3.8, y 3.9 las cuales definieron los conceptos faltantes.

Los conceptos para la solución de los subsistemas quedan de la siguiente forma.

Área de Mecánica	Área de Eléctrica y Electrónica
<ul style="list-style-type: none"> • Base de soporte de perfil de aluminio (Bancada). 	<ul style="list-style-type: none"> • Motor trifásico.
<ul style="list-style-type: none"> • Base de soporte de mecanismos de compresión de dos grados de libertad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de Par Torsional NCTE serie 2000.
	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de Presión Festo SPTW
	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de Posición-Potenciómetro.
<ul style="list-style-type: none"> • Interfaz gráfica programada en Labview. 	
<ul style="list-style-type: none"> • Procesamiento de señales tarjeta de adquisición DAQ NI 9201. 	

Área de Programación

Tabla 3.10 Solución de los subsistemas.
Realizado por el autor.

3.1.3. Ciclo iterativo (Diseño, fabricación y pruebas)

En la etapa iterativa se realizó el rediseño, fabricación y prueba de los conceptos, para llevar al banco de pruebas a una serie de prototipos rápidos para conocer su funcionamiento en varias etapas hasta generar los resultados deseados.

I. Bancada

La estructura del banco de pruebas mejor conocida como bancada es la encargada de soportar la mayor parte de los elementos utilizados para conocer el comportamiento de los mecanismos de compresión. La cual se construyó con perfiles de aluminio utilizada en proyectos anteriores, por lo cual se realizó el diseño de la estructura con el propósito de soportar el compresor, el motor encargado de la transferencia de energía y los sensores. Donde el diseño modular de la bancada brinda la versatilidad de posicionar a los elementos y placas en el lugar más pertinente para su funcionamiento de tal manera que la estructura quedara de la forma mostrada en la figura 3.13.

En lo que concierne a las bases para el soporte de los mecanismos de compresión se diseñaron con el fin de evitar la influencia de fuerzas de reacción en la medición del par de torsión; lo cual se logra colocando el mecanismo sobre una placa cinemática con dos grados de libertad utilizando rodamientos y placas auxiliares como se muestra en la figura 3.14.

Bancada



Fig. 3.13 CAD de la bancada.

Placas para mecanismo

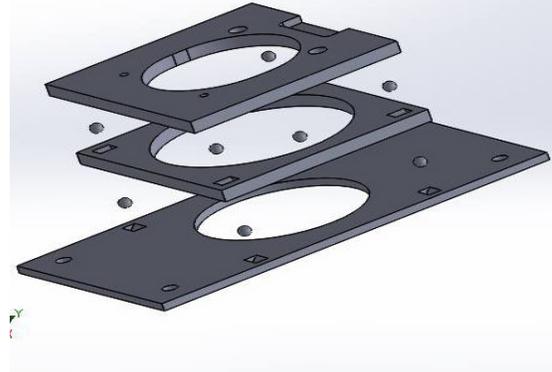


Fig. 3.14 CAD de las placas para mecanismo.

II. Instrumentación del banco de pruebas

Los sensores se encargaron de determinar los estados de las variables de mayor importancia para los mecanismos de compresión y así poder recabar toda la información necesaria para conocer sus características de una forma fiable y repetible. Estos dispositivos son la pieza fundamental para el funcionamiento del banco de pruebas.

i. Sensor de par de torsión

La tecnología del sensor de Par de torsión de la marca **NCTE** serie 2000 está basada en el efecto **Magnetostricción** (magneto- elástico) el cual ocurre cuando un material ferromagnético se expone a un campo magnético generando la deformación del material, lo cual permite convertir energía magnética en mecánica. De tal forma esté puede llevarse a una acción inversa donde el intercambio de energía se pueda realizar de forma mecánica deformando algún material ferromagnético y así obtener energía magnética.

Por esa razón cuando el sensor de par torsional se ve afectado por una fuerza, éste genera un cambio en el campo magnético. Estos cambios son detectados por sensores de campo magnético que permiten determinar las fuerzas que actúan en el sensor de par de torsión.

Las características del sensor de par de torsión se muestran a continuación en la figura 3.15.

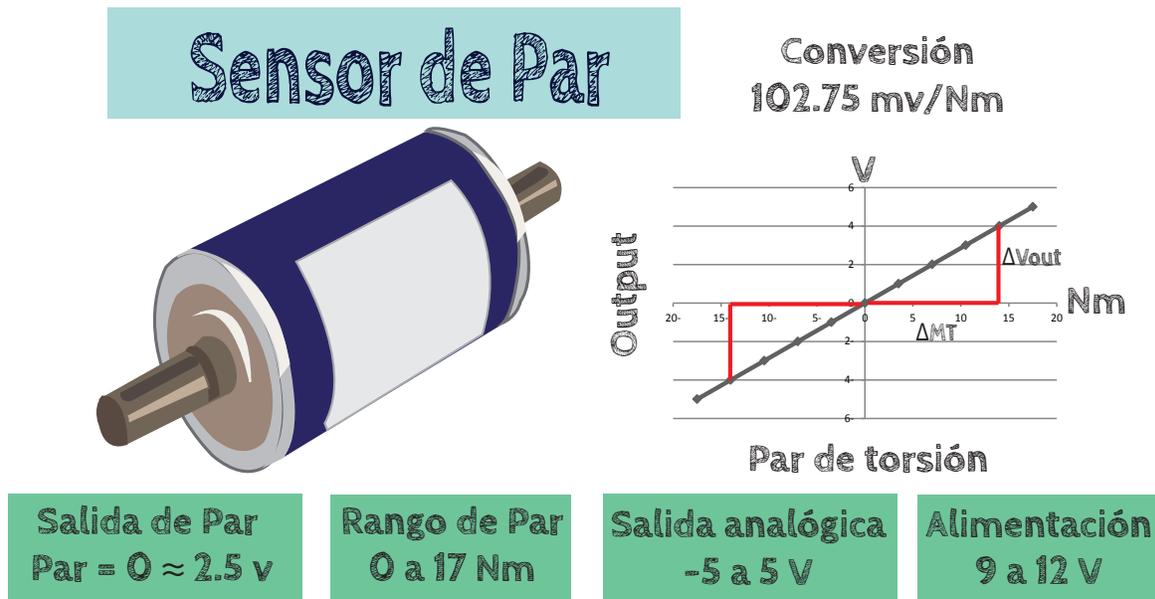


Fig. 3.15 Características del sensor de par de torsión.
Realizado por el autor.

Debido que el sensor fue utilizado anteriormente se realizó una caracterización estática para verificar su correcto funcionamiento y garantizar que los valores que se obtuvieran en la medición del banco fueran correctas.

La caracterización se realizó mediante una serie de pruebas colocando un disco de 12 cm de radio concéntricamente a uno de los ejes del sensor, esto con la finalidad de poner pequeños incrementos de masas en dos extremos del disco junto con ayuda de poleas y cordones como se muestra en la figura 3.16 lo cual generaría un par torsional diferente por cada masa colocada entre la distancia del centro del disco a uno de sus extremos.

Las pruebas se realizaron en un intervalo de 0 a 3 [Nm] (debido a que los valores de Par de Torsión obtenidos en los análisis teóricos de los mecanismos de compresión permanecía por debajo de los 2.5 [Nm]). Este intervalo se dividió en 21 pruebas, donde en cada una de ellas se varió la masa con incrementos de 0.05 [kg]; lo cual generó la curva de calibración del sistema de medición de Par de Torsión suponiendo que el sistema cumpliera con la linealidad que menciona el fabricante y con ello conocer la tendencia que hay entre Par de Torsión [Nm] y Voltaje [V] en el sistema.

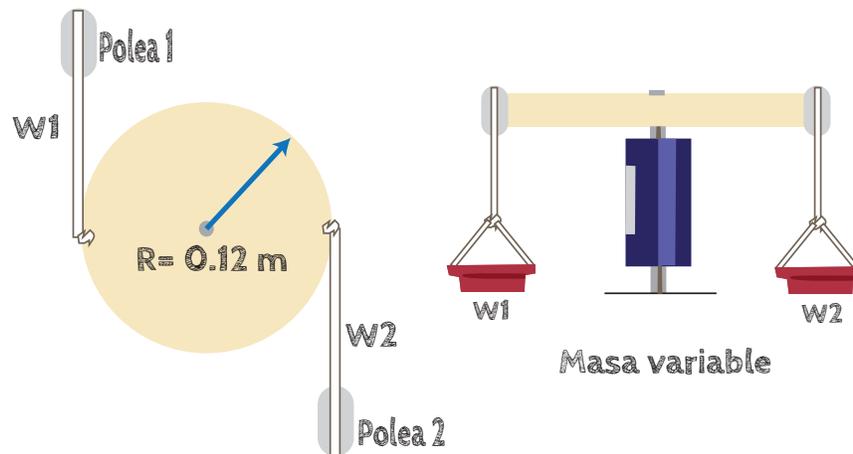


Fig. 3.16 Caracterización del sensor de par de torsión.
Realizado por el autor.

Los datos obtenidos de la calibración estática del sensor de par de torsión NCTE se muestran a continuación.

Masa [Kg]	T [Nm]	Vsalida [mv]
0.05	0.117	12.293
0.1	0.235	23.870
0.15	0.352	36.017
0.2	0.469	48.550
0.25	0.587	60.525
0.4	0.939	96.275
0.45	1.056	108.478
0.5	1.173	121.037
0.55	1.291	132.138
0.6	1.408	144.607
0.65	1.526	156.930
0.7	1.643	169.023
0.75	1.760	180.731
0.9	2.112	216.916
0.95	2.230	229.126
1	2.347	240.536
1.05	2.464	253.137
1.1	2.582	265.299
1.15	2.699	277.770
1.2	2.816	289.343
1.25	2.934	301.279



Fig. 3.17 Datos de la caracterización del sensor de par de torsión.
Realizado por el autor.

Los datos de la caracterización estática sirvieron para realizar una regresión lineal y con ello se encontró la relación que existe en el sensor de voltaje y par de torsión. El valor de la pendiente que se obtuvo en la caracterización se comparó con el factor de conversión que el fabricante del sensor sugiere en sus especificaciones. Tomando en cuenta estos dos valores podemos notar que la diferencia entre ellos es de 0.04, lo cual brinda la confianza para utilizar el sensor y estar seguros de los datos que este proporcione ya que el error relativo de 0.0389 %.

ii. Sensor de presión

El sensor de presión SPTW-P10R-G14-A-M12 de **Festo** utiliza como transformación de energía una lámina metálica delgada mejor conocida como **galga extensiométrica** (extensómetro) la cual está basada en el efecto **piezorresistivo**, ésta es la propiedad que poseen algunos materiales cuando se someten a ciertos esfuerzos y éstos se deforman cambiando de manera nominal su resistencia eléctrica.

Este fenómeno permite que la medición de presión en el sensor de presión se de forma lineal en los rangos establecidos por el fabricante.

Las características de sensor de presión se muestran a continuación en la figura 3.18.

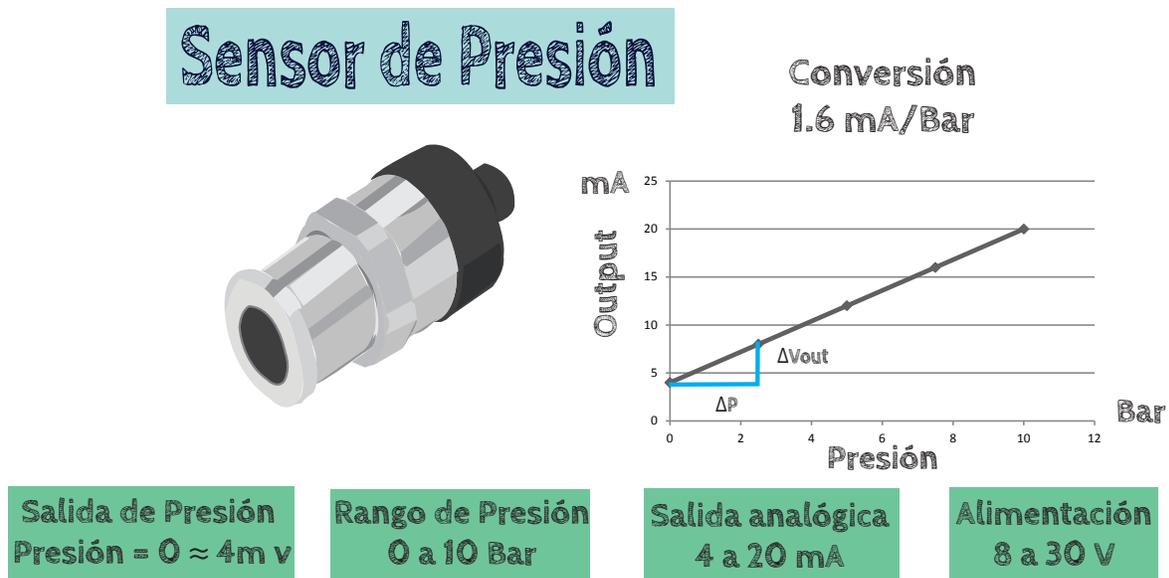


Fig. 3.18 Características del sensor de presión.
Realizado por el autor.

Debido a que el sensor de presión era de salida analógica de corriente; se realizó un diferencial de potencial colocando una resistencia de carga en serie a la salida y así poder aplicar la **Ley de Ohm**, con el fin de obtener una salida analógica de voltaje. Dicho diferencial de potencia se muestra enseguida.

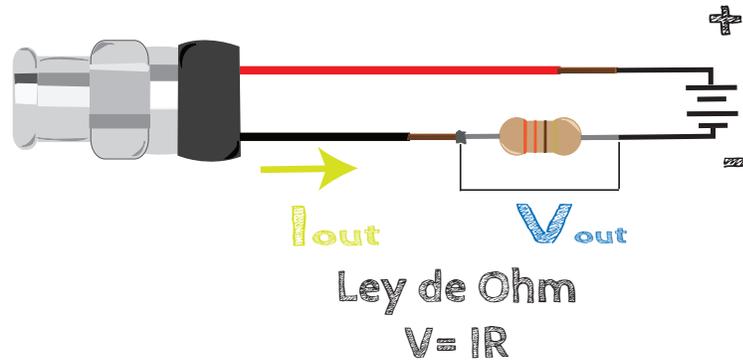


Fig. 3.19 Diferencia de potencial en el sensor de presión.
Realizado por el autor.

iii. Sensor de posición–potenciómetro

El sensor de posición está compuesto por un potenciómetro de la marca **omega** de una vuelta con movimiento angular sin fin, el cual al variar su posición cambia el valor nominal de sus resistencia.

El potenciómetro cuenta con las siguientes características.

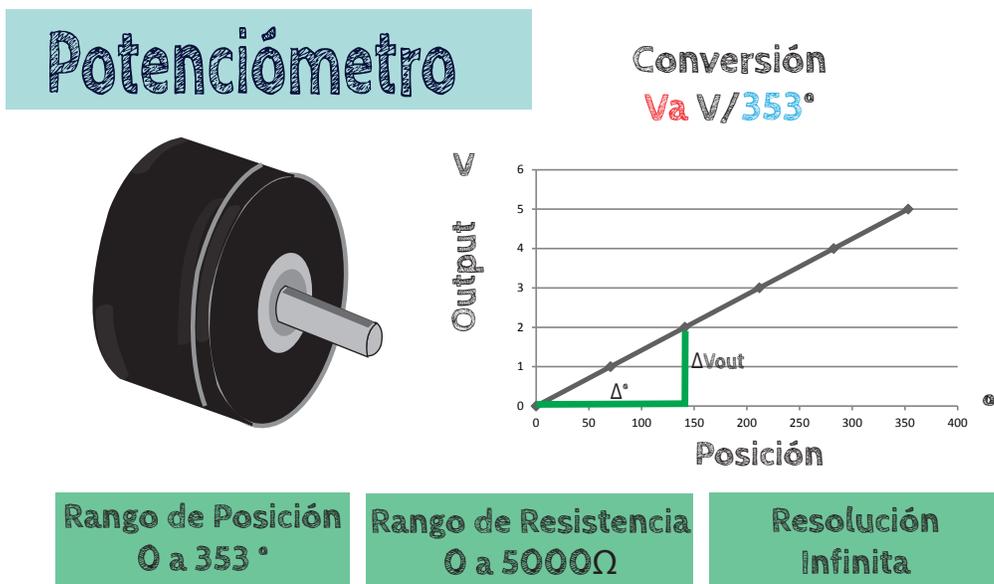
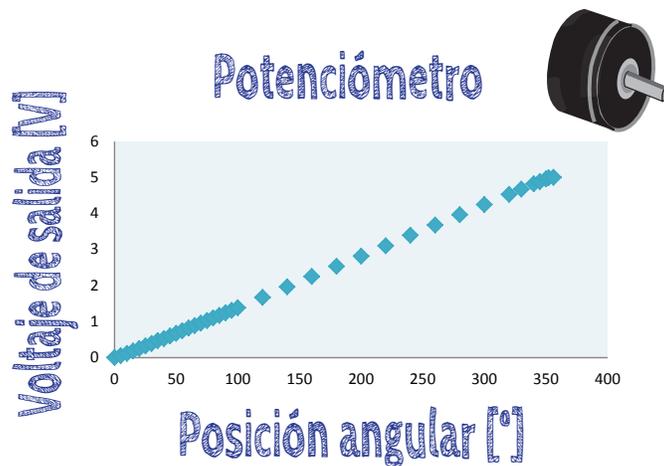


Fig. 3.20 Características del potenciómetro.
Realizado por el autor.

Ya que el potenciómetro fue utilizado en proyectos anteriores, de la misma manera que el sensor de par de torsión se generó una caracterización del potenciómetro para obtener la relación existente entre el voltaje y la posición angular, y con ello corroborar su correcto funcionamiento. La caracterización estática realizada, se hizo alimentando el potenciómetro con 5 volts y colocando un transportador graduado de 0° a 360° de forma axial al eje del potenciómetro. Se giró el potenciómetro gradualmente para conocer el voltaje que existía con respecto a la posición y así construir la curva de caracterización del instrumento con los siguientes datos.

Posición [°]	Voltaje [V]
0	0.0006
5	0.0492
10	0.1133
15	0.1827
20	0.2511
25	0.3228
30	0.3914
35	0.4655
40	0.527
45	0.5977
50	0.671
55	0.7442
60	0.8152
65	0.8859
70	0.9557
75	1.0285
80	1.0984
85	1.1683
90	1.2416
95	1.3105
100	1.3832
120	1.6712
140	1.9616
160	2.2498
180	2.532
200	2.8146
220	3.1017
240	3.3945
260	3.678
280	3.9645
300	4.2461
320	4.5298
330	4.6764
340	4.8205
345	4.8857
350	4.9594
352	4.9886
356	5.0028



Valores obtenidos por la regresión lineal

$$y = 0.0143x - 0.0352$$

$$V_{ref} = 5.047V$$

Caracterización estática

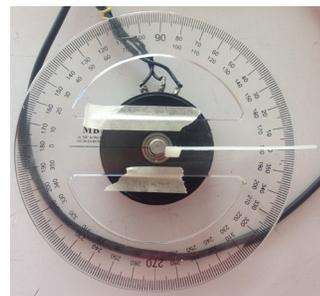
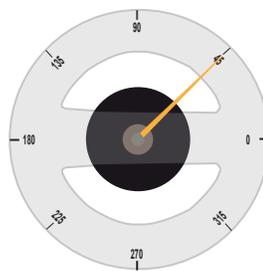


Fig. 3.21 Datos de la caracterización del potenciómetro. Realizado por el autor.

Se aplicó la regresión línea a los datos obtenidos de la caracterización estática del potenciómetro para averiguar la razón de cambio que existe entre el voltaje de salida y la posición angular. Dicha razón depende del voltaje de alimentación del potenciómetro el cual se nombró voltaje de referencia V_{ref} ya que este a su vez es el equivalente a la posición máxima que entrega el potenciómetro, donde el fabricante menciona en sus especificaciones que es 353° . Lo cual se quería comprobar para verificar la fiabilidad del potenciómetro mediante las siguientes operaciones.

$$Conversion = 0.0143 \frac{[V]}{[^\circ]} \rightarrow Posición_{max} = \frac{1}{0.0143} \frac{[^\circ]}{[V]} \frac{V_{ref} [V]}{1} = \frac{1}{0.0143} \frac{[^\circ]}{[V]} \frac{5.047 [V]}{1}$$

$$Posición_{max} = 352.9370629^\circ$$

Con el valor que surge de la posición máxima del potenciómetro en el análisis realizado podemos notar que la cercanía que hay entre este y el valor que proporciona el fabricante en sus especificaciones es relativamente pequeño con una diferencia de 0.0629 y un error relativo de 0.018% podemos confiar en las lecturas arrojadas por el potenciómetro.

En lo que concierne al sensor para determinar la posición de los mecanismos de compresión, se desarrolló colocando una llanta de forma axial en el potenciómetro, la cual es la encargada de realizar la transferencia de movimiento entre el potenciómetro y eje de transmisión que va a la flecha del mecanismo del cual se quiere conocer la posición angular. La llanta genera la fricción necesaria para hacer girar al potenciómetro mientras el eje de transmisión se mueve sin que llegue a existir un deslizamiento y se desfase la relación de la posición.

Debido a que el diámetro eje de transmisión es más pequeño que el de la llanta se adaptó un disco con un diámetro igual al de la llanta al eje para tener una relación uno a uno y así mantener una transmisión de la posición de forma directa, tal y como se muestra en la figura 3.22.

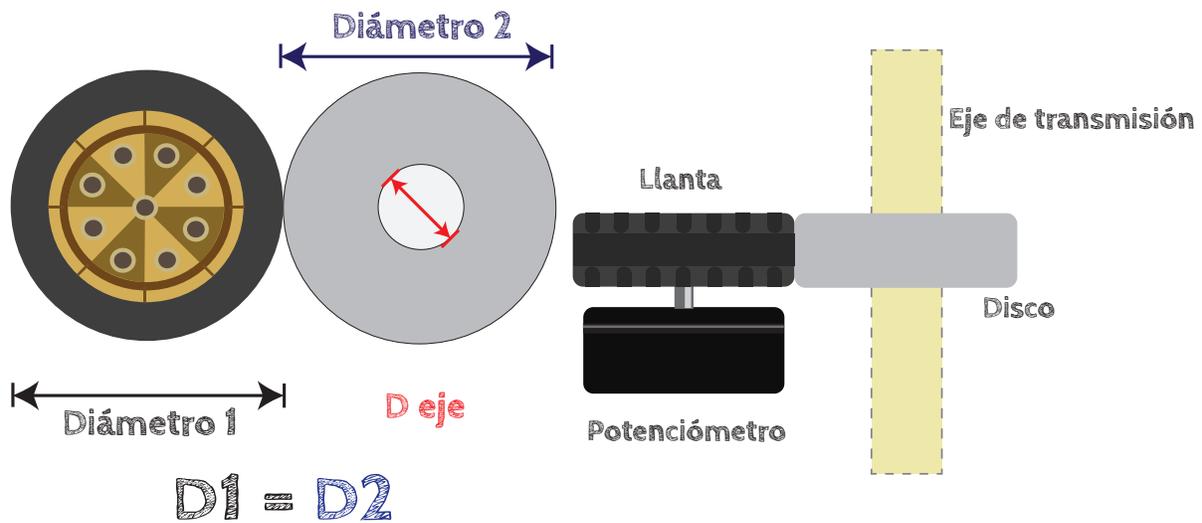


Fig. 3.22 Representación del sensor de posición.
Realizado por el autor.

Para el sensor de posición se diseñó y construyó un soporte el cual logra mantener una posición tangencial entre el disco que sostiene el eje y la llanta encargada de la transmisión del movimiento, lo cual asegura que se tenga la posición deseada.

Soporte del sensor de posición

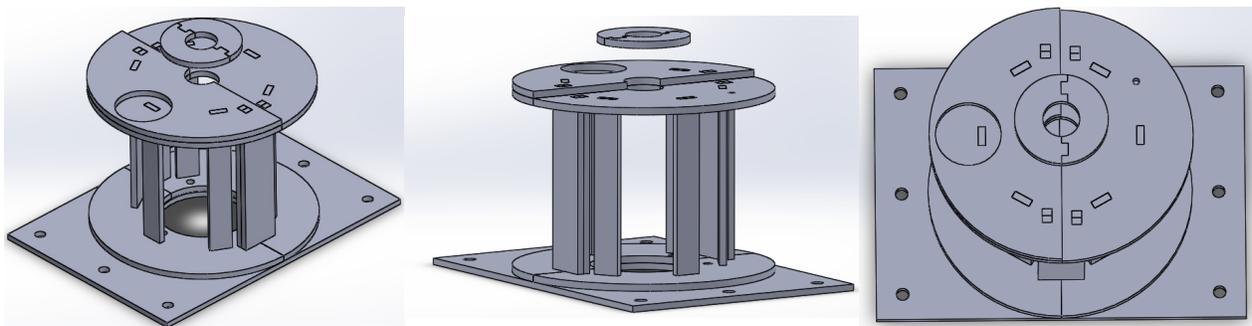


Fig. 3.23 CAD del soporte del sensor de posición.

III. Adquisición de las señales

i. Muestreo

El muestreo de las señales analógicas es el primer paso para la adquisición de las señales, es por ello que para el muestreo de las señales provenientes de los sensores del banco de pruebas fue necesario saber el tiempo que tarda en realizar un ciclo de trabajo todo el sistema. Al conocer la velocidad del motor que transfiere la energía a todo el sistema el cual giraba a 9.32 RPM la cual nombraremos ω , se pudo conocer la frecuencia de trabajo del sistema con la siguiente conversión.

$$\omega_{Motor} = 9.32 [RPM] = \frac{9.32 [RPM]}{1} \frac{1}{[RPM]} \frac{1}{60 [s]} = 0.155\bar{3} \text{ Hz}$$

$$F_T = 0.155\bar{3}$$

Con la frecuencia de trabajo (F_T) sabemos cada cuando se genera un ciclo de trabajo en el sistema, lo cual sirvió para poder determinar la frecuencia de muestreo. Debido a que en el procesamiento de las señales, se digitaliza la señal con la tarjeta de adquisición la cual hace una discretización de las señales de entrada, para después reconstruirlas con una suma ponderada de cada uno elementos obtenidos por el haz de muestreo en un tiempo establecido. Por lo que es de vital importancia conocer dicha frecuencia.

Se utilizó **El Teorema de Muestreo de Nyquist** para obtener la frecuencia de muestreo, el cual menciona que se debe de muestrear a una frecuencia mayor que el doble de la frecuencia máxima de la señal que se está adquiriendo para representarla exactamente, esto de forma teórica.

A la cual llamaremos Frecuencia de Nyquist (F_N).

Aplicando **El Teorema de Nyquist** a la frecuencia de trabajo se obtiene la frecuencia de muestreo que tendríamos que utilizar para el procesamiento de las señales del banco de pruebas, donde dicha F_N queda de la siguiente manera.

$$F_N = F_T(2) = 0.301\bar{6} \text{ Hz}$$

Debido a que la señal que se crea con dos veces F_T , se generan dos muestras por ciclo lo cual no bosqueja de forma completa el comportamiento del fenómeno, debido a la pérdida de información que se tiene por una tasa de muestreo pobre. Por lo cual para tener una representación del fenómeno más clara se decidió tener más de 100 muestras por ciclo, la cual minimizaría la pérdida de información. Aplicando esta condición a la frecuencia de muestreo queda de la siguiente manera.

$$F_N = F_T(100) = 15.\bar{3} \text{ Hz}$$

Por lo que para la implementación de F_N (frecuencia de muestreo) se propuso un valor entero, que serviría para mostrar de forma clara el comportamiento del sistema mediante sus sensores.

$$F_N = 20 \text{ Hz}$$

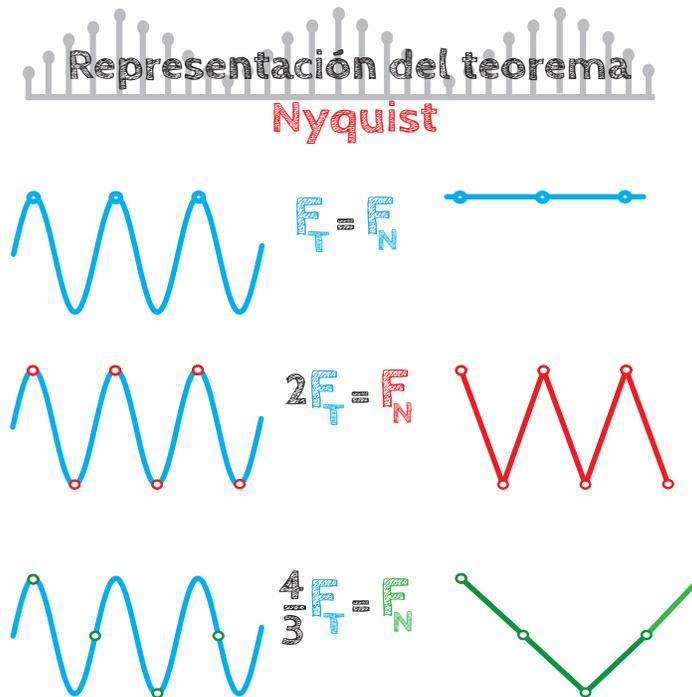


Fig. 3.24 Representación del Teorema de Nyquist.
Realizado por el autor.

ii. Procesamiento de señales mediante la Tarjeta de adquisición NI 9201

El dispositivo que se utilizó para realizar el procesamiento de señales de los sensores del banco de pruebas fue una tarjeta de adquisición **DAQ NI 9201** Módulo de la serie C de *National Instruments*, la cual cuenta con 8 entradas con una resolución en su convertidor analógico digital de 12 bits, y una rango de entrada de voltaje de ± 10 volts.

Las señales al entrar a la **DAQ** pasan por un circuito de entrada que se encarga de proteger la unidad de un sobre voltaje con magnitudes de ± 100 volts de cada canal de entrada al común. La tarjeta también cuenta con una etapa de acondicionamiento donde existe un multiplexado de las señales para después llevarlas a un buffer que almacena temporalmente la información obtenida y así distribuir al convertidor analógico digital tal y como se muestra en la figura 3.25.

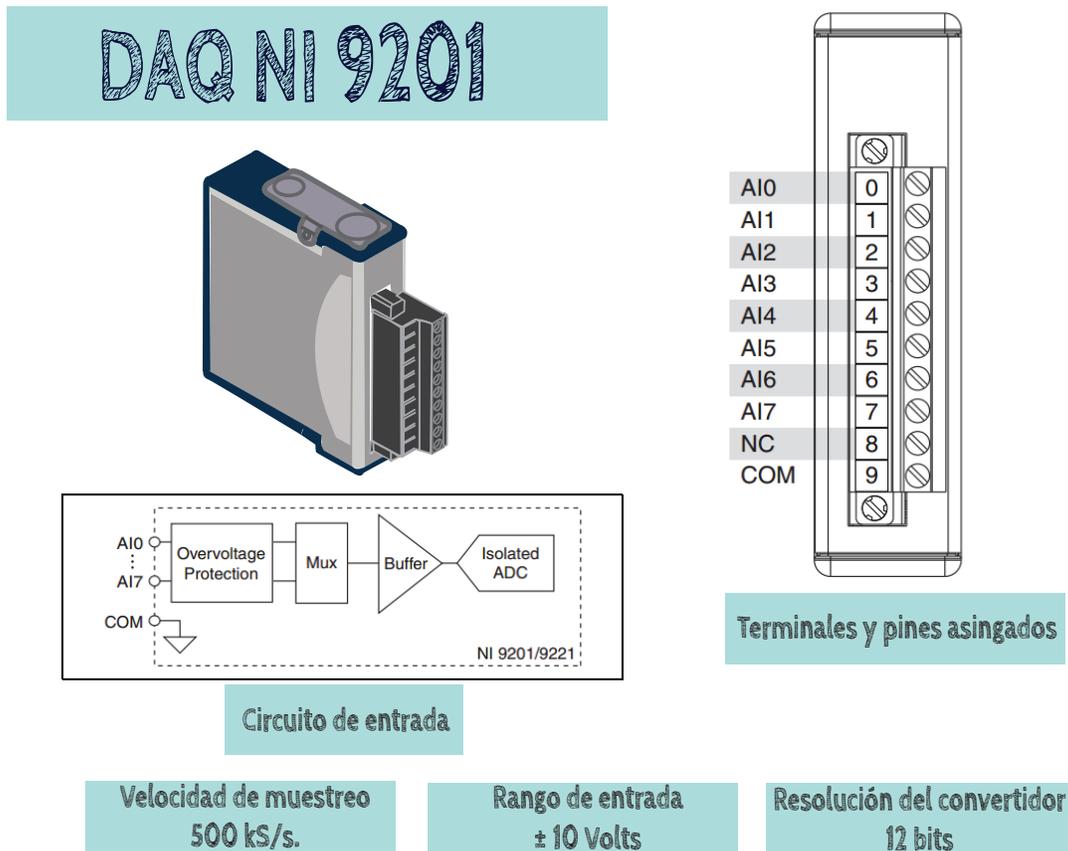


Fig. 3.25 Características de la tarjeta de adquisición.
Realizado por el autor.

La configuración de la tarjeta **NI 9201** se realiza mediante el software **NI Labview** y una de sus herramientas llamada **DAQmx** .

iii. Programación

La programación da pie para crear la vinculación que existe entre el banco de pruebas y el usuario mediante la interfaz gráfica, la cual hace posible la visualización del comportamiento del sistema a estudiar en tiempo real, así como la recolección de los datos generados después de cada prueba. Es importante recalcar que mediante la programación se configura la tarjeta de adquisición la cual es vital para el procesamiento de señales como se mencionó con anterioridad.

La programación se realizó mediante el software Labview 2014 de *National Instruments* el cual está enfocado en desarrollar sistemas de prueba y control usando un entorno de desarrollo gráfico conocido como lenguaje de programación G, Labview contiene herramientas para el desarrollo y visualización de datos, así como permite la vinculación con dispositivos de adquisición, sensores e instrumentos científicos.

a) Configuración de la tarjeta de adquisición NI 9201

Para la configuración de la tarjeta utilizada en el banco de pruebas se realizó mediante el software Labview 2014 y con la herramienta DAQmx 14.5, la cual es un controlador de adquisición de datos, el cual comanda cada uno de los aspectos de un sistema DAQ, desde la configuración de programación en Labview, hasta el control a nivel del sistema operativo y del dispositivo; la configuración de NI 9291 se realizó de la forma que se muestra a continuación.

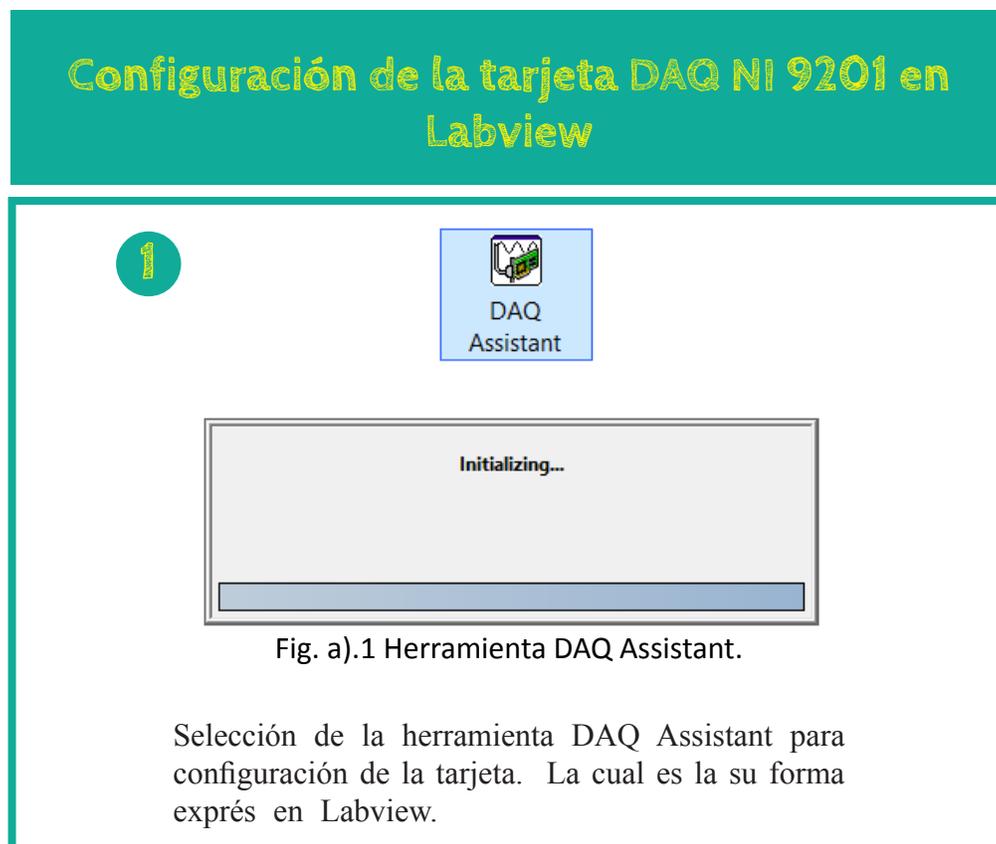


Fig. a).1 Herramienta DAQ Assistant.

Selección de la herramienta DAQ Assistant para configuración de la tarjeta. La cual es la su forma expés en Labview.

2

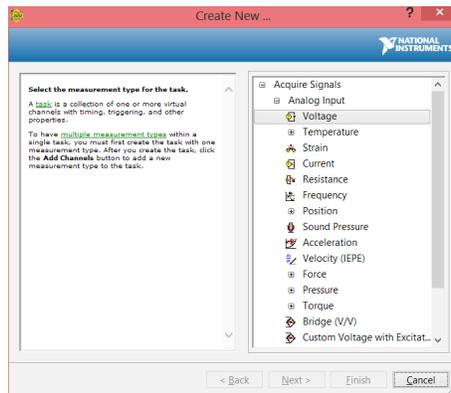


Fig. a).2 Tipo de señal de trabajo.

Selección de tipo de tarea o señal con la cual trabajara la tarjeta . Para la configuración de la NI9201 se seleccionaron entradas analógicas de voltaje.

3

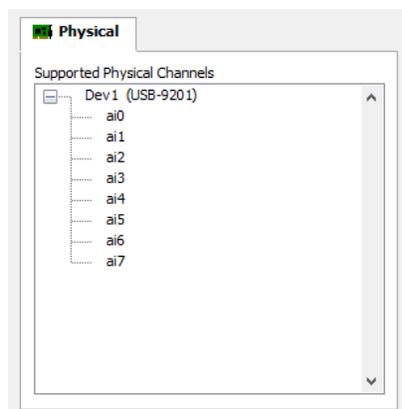


Fig. a).3 Selección Pin de entrada.

Selección de los canales de entrada de la tarjeta para su configuración.

En la selección la ventana muestra el dispositivo DAQ conectado , así como sus entradas físicas disponibles.

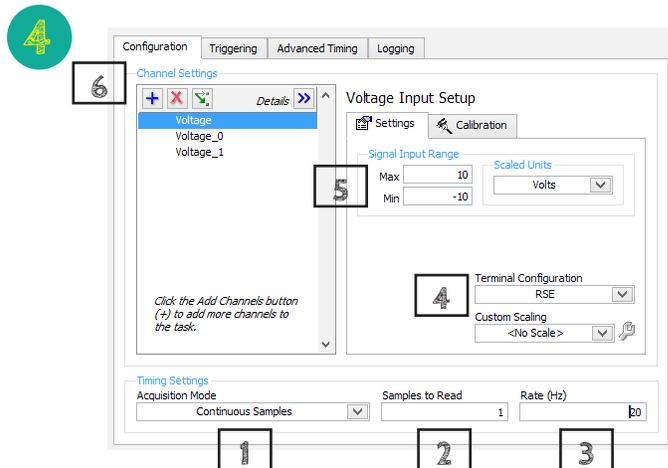


Fig. a).4 Configurar la adquisición.

En la configuración

1. **Acquisition Mode:** Modo de adquisición de la señal. Selección de muestras, si es una muestra, N número de muestras o con muestreo continuo.
2. **Samples to Read:** Número de muestras a leer.
3. **Rate (Hz):** Taza de muestreo.
4. **Terminal Configuration:** Se habilita solo una entrada para lectura:

RSE (Referenciada). Toma como referencia a tierra GND de la siguiente manera.

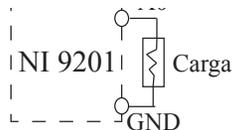


Fig.a).4.4 Representación señal RSE.

5. **Signal Input Range:** Selección del rango de la señal de entrada (La NI 9201 tiene como entrada máxima de voltaje ± 10 volts).
6. **Channel Settings:** Se habilitan o deshabilitan canales de entrada.

b) Primera iteración de la programación

En la primera iteración de la programación se realizó únicamente para la adquisición de la señal del sensor de par, la cual sirvió como pionera para su creciente desarrollo posterior, dicha iteración cuenta con tres etapas importantes en su arquitectura.

Etapas 1 Promedio de las señales: Se calcula el promedio del voltaje de salida del sensor para conocer el valor cuando el par de torsión es igual a cero y con ello encontrar el voltaje de referencia, lo cual se realizó mediante una herramienta de Labview nombrada **mean**, la que calcula el promedio de un número de datos establecido, en este caso se calculó el promedio para un valor de 300 datos, en la salida de voltaje del sensor. El voltaje de referencia fue utilizado como indicador para verificar que los sensores estuvieran conectados de forma correcta y que estos estuvieran funcionando de manera adecuada, también el promedio fue utilizado en la etapa 2 para la conversión de voltaje.

Etapas 2 Conversión y visualización de las señales: En esta etapa se realiza la conversión para obtener los valores de trabajo con el voltaje a la salida del sensor mediante la conversión que se muestra continuación, para así obtener el par de torsión en valores de Newton-metro [Nm].

$$Par = \frac{(V_{par} - V_{RefP}) [V]}{102.75 \left[\frac{mV}{Nm} \right]} \frac{1000 [mV]}{1 [V]} = (V_{par} - V_{RefP}) \frac{1000}{102.75} [Nm]$$

La conversión se realiza mediante operaciones que interactúan en tiempo real con el voltaje emitido en la salida del sensor; inmediatamente los valores de trabajo son mostrados en un gráfico mediante un display para que el usuario pueda interpretar los valores mediante sucede la prueba.

Etapas 3 Exportación de datos: La tercera etapa es la encargada de guardar los datos y exportarlos a Microsoft Excel, para guardar los datos se utilizó la herramienta llamada **Write to measurement file** la cual recolecta los datos adquiridos en un arreglo y los guarda hasta que estos necesiten ser utilizados. Para la exportación se leen los datos guardados mediante **Read from measurement file** y así visualizarlos en un segundo display que le muestra al usuario el comportamiento total de la prueba; mediante el segundo display el usuario puede exportar los datos mostrados en el gráfico utilizando el botón derecho del mouse para realizarla. Los datos son mostrados en una hoja de Excel en columnas.

A continuación se muestran los diagramas de flujo establecidos para cada etapa de la programación así como el programa utilizado en la primera iteración.

Diagramas de flujo de la primera iteración

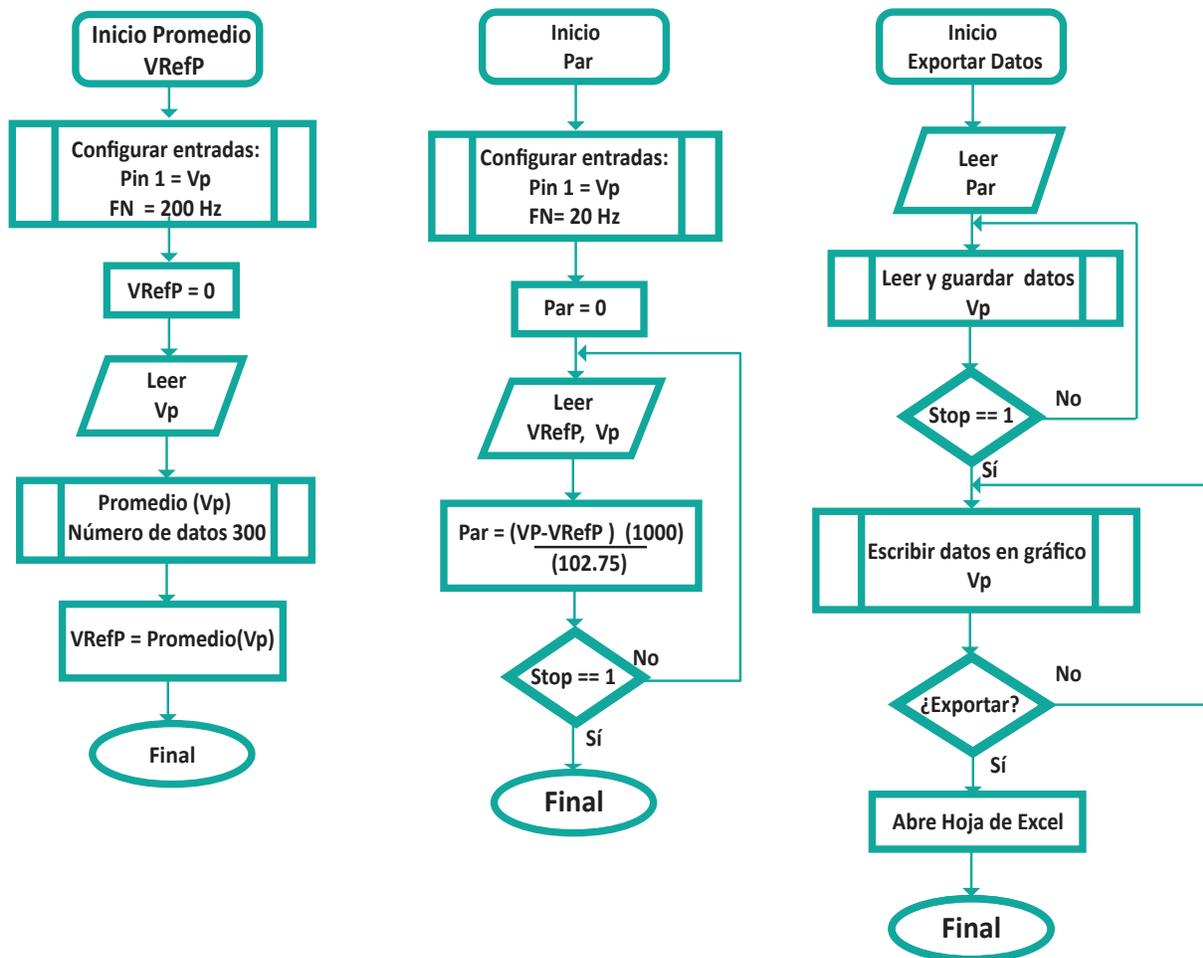


Fig. 3.32 Diagramas de flujo de la primera iteración.
Realizado por el autor.

Programa de la primera iteración

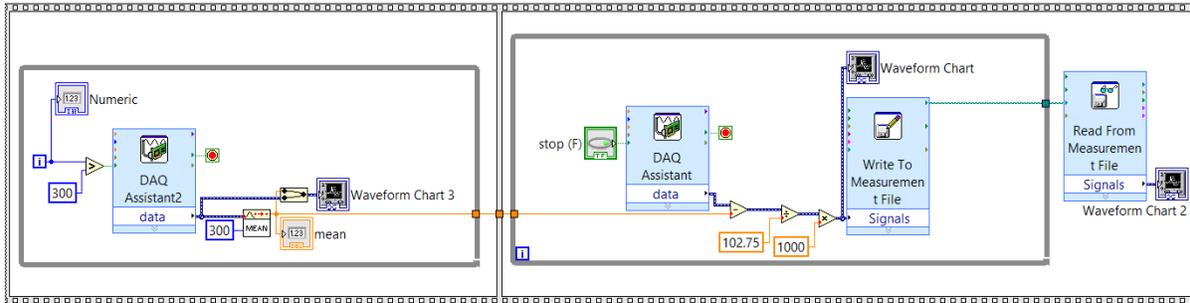


Fig. 3.33 Programa de la primera iteración.

Interfaz gráfica de la primera iteración

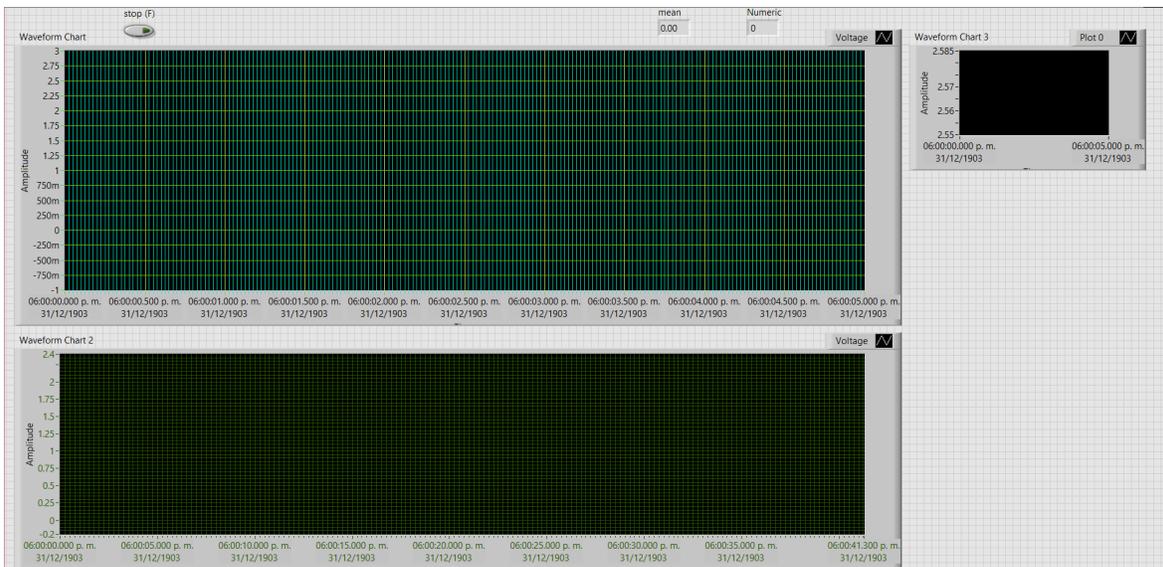


Fig. 3.34 Interfaz gráfica de la primera iteración.

c) Segunda iteración de la programación

En esta iteración se agregó el sensor de presión a la adquisición, también se modificó la etapa de exportación de datos para hacerla más amigable para el usuario.

Etapa 1 Promedio de las señales: En la segunda iteración se calculó también el promedio para el sensor de presión con 1000 datos para calcularlos y utilizarlos posteriormente.

Etapa 2 Conversión y visualización de las señales: En esta etapa se agregó la conversión para poder obtener el valor de la presión la cual se realizó en dos partes. En la primera se aplicó la conversión al diferencial de potencial obtenido del divisor de voltaje que surge del sensor de presión y la resistencia de carga para obtener el valor de la presión en [Bar]. Con el valor obtenido en [Bar] se calculó el valor de presión en [PSI] utilizando la segunda conversión para así después visualizar las señales en un display. Las conversiones utilizadas se muestran ensgueida.

$$Presión = \frac{(V_{presión} - V_{RefPr}) [V] \frac{1000 [mA]}{328 \left[\frac{V}{A} \right]} \frac{1 [Bar]}{1.6 [mA]}}{1 [A]} = (V_{presión} - V_{RefPr}) \frac{1000}{(328)(1.6)} [Bar]$$

$$Presión = (V_{presión} - V_{RefPr}) \frac{1000}{(328)(1.6)} [Bar] \frac{14.5037738 [PSI]}{1 [Bar]}$$

$$Presión = (V_{presión} - V_{RefPr}) \frac{(1000)(14.5037738)}{(328)(1.6)} [PSI]$$

Etapa 3 Exportación de datos: Para la exportación de datos de esta iteración se crearon arreglos de cada parámetro a adquirir los cuales se acomodaban cronológicamente cada que se adquirido un dato nuevo y así guardar ese arreglo en un variable para su uso posterior.

Para tener una relación del tiempo con las señales adquiridas, se generó una señal de tiempo con una herramienta nombrada elapsed time, la cual se recolecto de la misma manera que las otras variables. Los arreglos fueron llamados en un programa en paralelo al de la etapa 1 y 2, para que el usuario mediante un botón en la interfaz exporte los datos en cualquier momento de la prueba en hoja de Excel acomodados en una tabla.

Diagramas de flujo de la segunda iteración

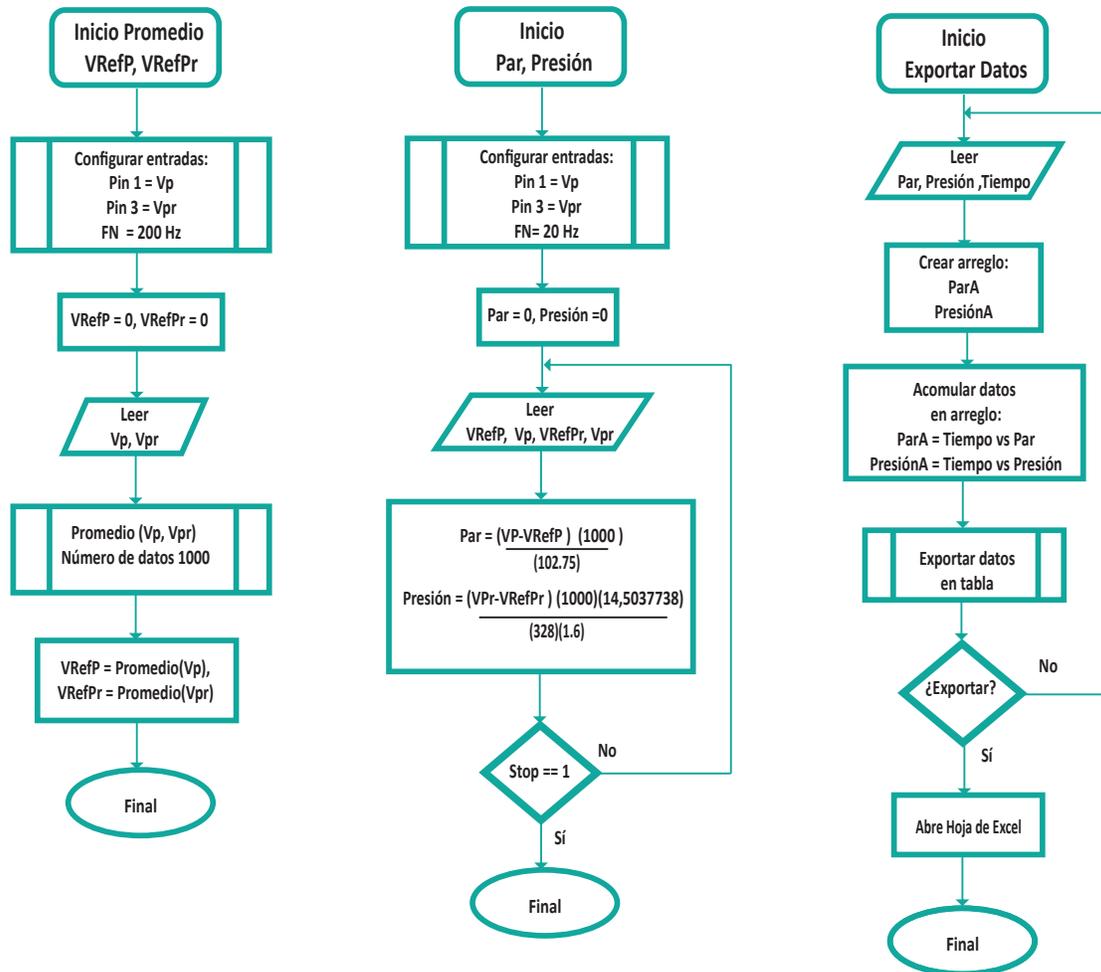


Fig. 3.35 Diagramas de flujo de la segunda iteración.
Realizado por el autor.

Programa de la segunda iteración

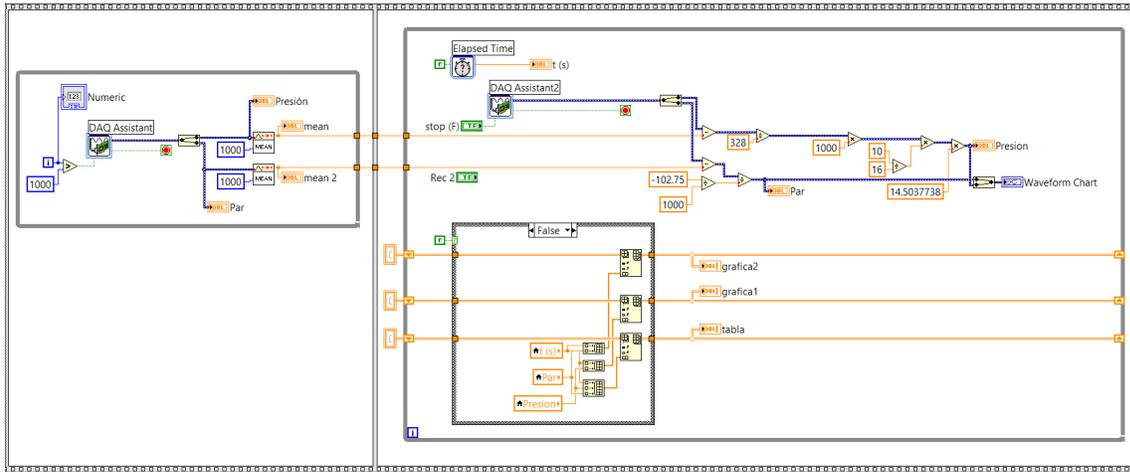


Fig. 3.36 Programa de la etapa 1 y 2 de la segunda iteración.

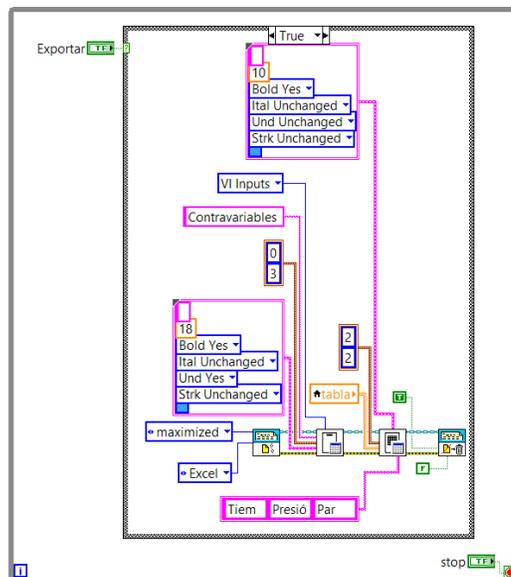


Fig. 3.37 Programa de la etapa 3 de la segunda iteración.

Interfaz gráfica de la segunda iteración

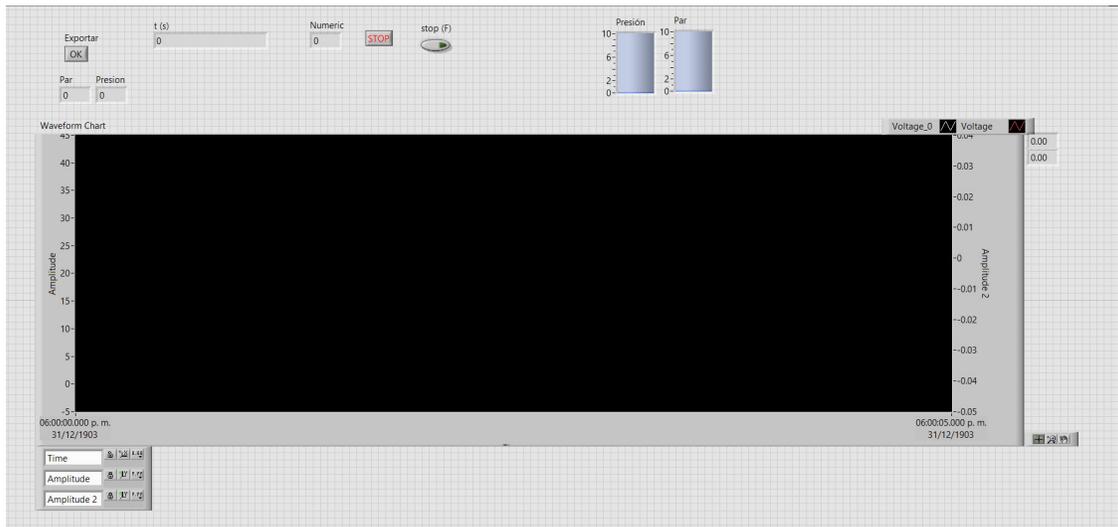


Fig. 3.38 Interfaz gráfica de la segunda iteración.

d) Tercera iteración de la programación

La tercera iteración de la programación se encargó de mejorar la parte visual de la interfaz gráfica, así como agregar la adquisición del sensor de posición al sistema y un procesamiento adicional a las señales para disminuir ruido en la adquisición.

Etapa 1 Promedio de las señales: En la última iteración se calculó el promedio de los sensores de la misma manera que en la segunda iteración, incluyendo en esta iteración voltaje de alimentación del potenciómetro del sensor de posición para el cálculo de su promedio.

Etapa 2 Conversión y visualización de las señales: En esta etapa se agregó la conversión del sensor de posición, la cual requería el voltaje de alimentación del potenciómetro para obtener los valores en grados [°] de la posición; mediante la siguiente conversión.

$$Posición = \frac{353 [^\circ]}{V_{Refal} [V]} (V_{Posición}) [V] = \frac{(353) (V_{Posición})}{V_{Refal}} [^\circ]$$

Programa de la tercera iteración

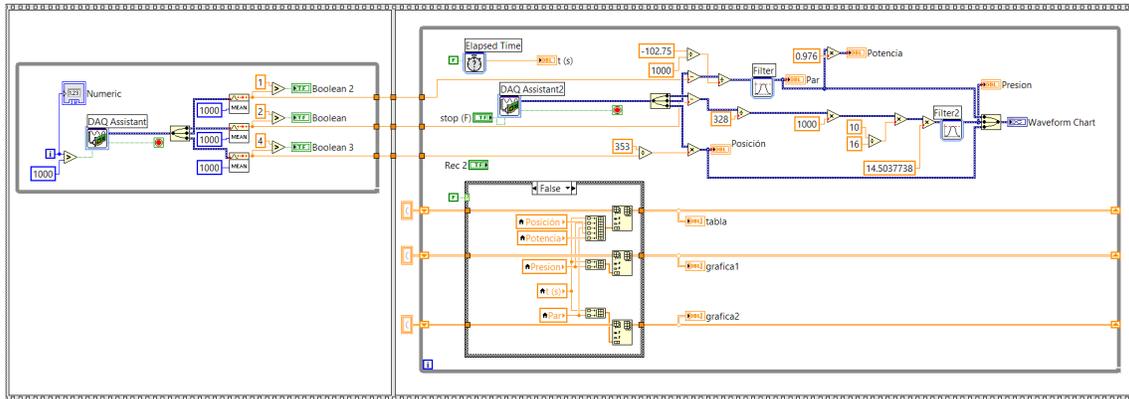


Fig. 3.40 Programa de la etapa 1 y 2 de la tercera iteración.

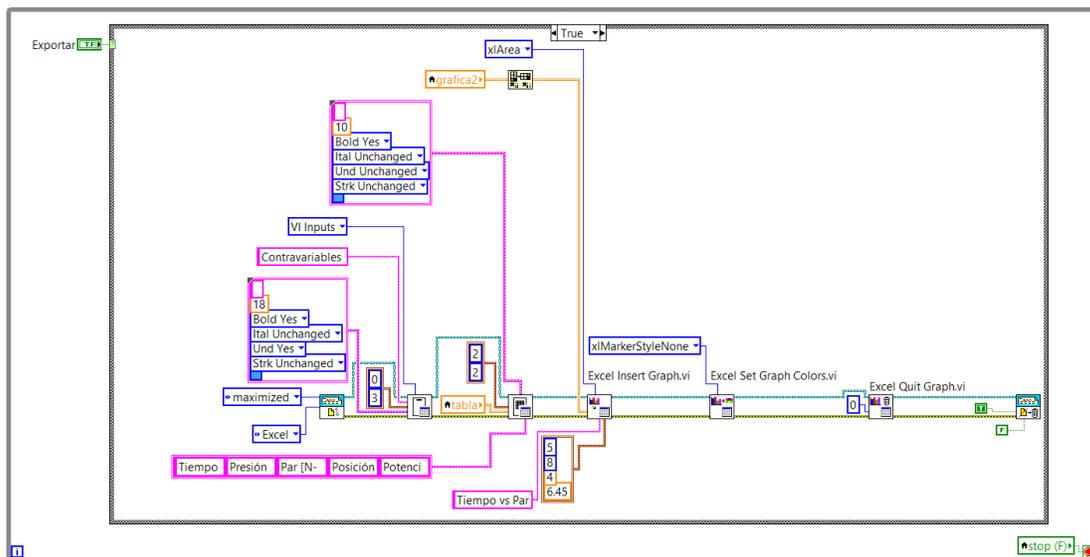


Fig. 3.41 Programa de la etapa 3 de la tercera iteración.

Interfaz gráfica final del Banco de Pruebas



Fig. 3.42 Interfaz gráfica final del Banco de Pruebas.

Al haber concluido la última iteración de la programación se obtiene la interfaz gráfica final con la cual el banco de pruebas será operado. El diseño y desarrollo del banco de pruebas finaliza al haber incorporado el sensor de posición y con ello la conexión final entre los sensores y la tarjeta de adquisición, dichas conexiones se muestran en la figura 3.43.

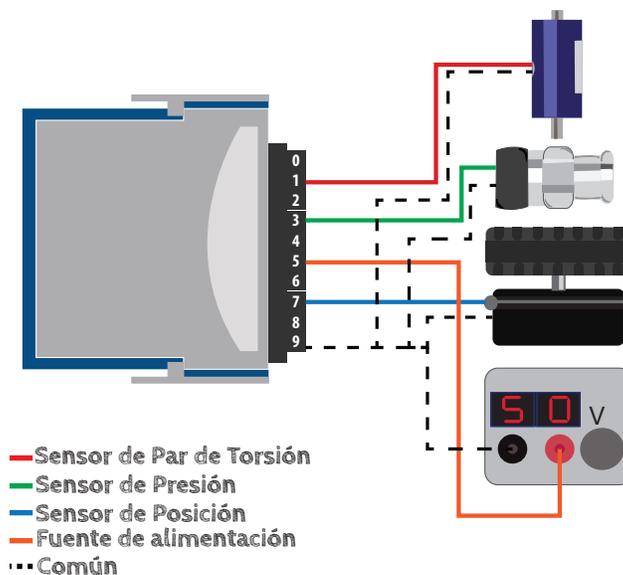


Fig. 3.43 Conexión final del banco del Banco de Pruebas.
Realizado por el autor.

IV. Configuración final del banco de pruebas

Configuración final del banco de pruebas

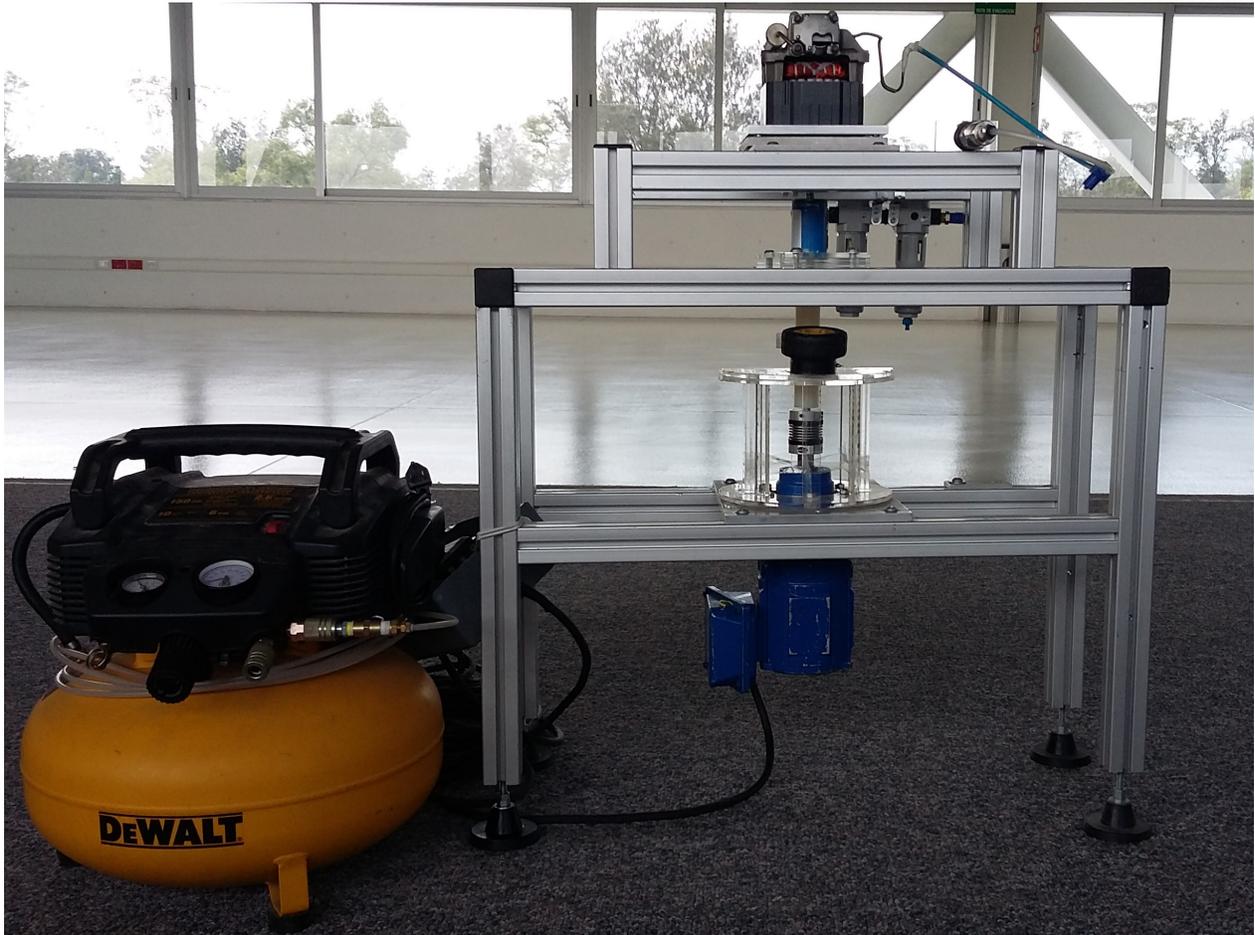
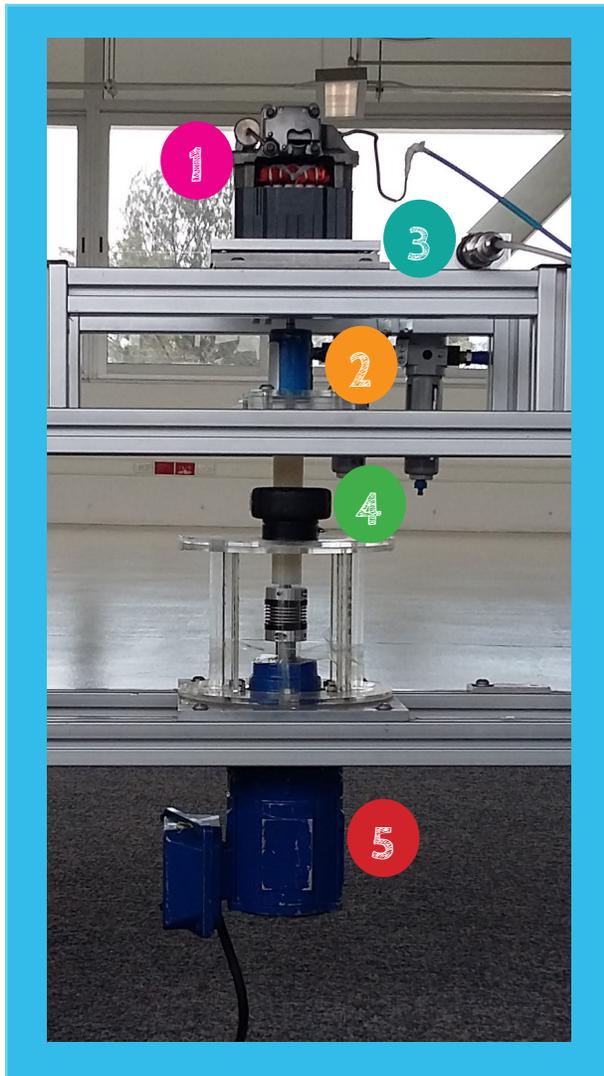


Fig. 3.44 Configuración final del banco de pruebas.

Elementos del banco de pruebas



1	Mecanismo a estudiar.
2	Sensor de Par.
3	Sensor de Presión.
4	Sensor de Posición.
5	Motor trifásico.

Fig. 3.45 Elementos del banco de pruebas.

Pruebas

Capítulo

4

La etapa de pruebas da comienzo al uso del banco para caracterizar mecanismos de compresión, donde se validó su funcionamiento eficiente y confiable.

Para dar inicio a la etapa de pruebas el equipo estableció una matriz de compresores de marcas mundialmente utilizadas en el área de electrodomésticos, incluyendo el de la empresa Mabe y un prototipo de compresor realizado por la UNAM en un proyecto que se realizó de forma paralela al diseño del banco. La matriz cuenta con cinco compresores los cuales ayudaron a satisfacer una de las principales necesidades del cliente; dicha matriz se muestra a continuación.



Fig. 4.1 Matriz de compresores.
Realizado por el autor.

La parte de estudio de los compresores en este documento es el mecanismo que se encarga de realizar la compresión, por lo cual es necesario desensamblar los compresores para extraer los mecanismos y después utilizarlos en el banco de pruebas.

El desensamble del compresor se realiza con los siguientes pasos:



1. Se extrae la mayor cantidad de aceite del compresor, recolectándolo en un contenedor para su uso posterior.

2. Quitar la carcasa con ayuda de un esmeril, cortando de manera transversal por donde se encuentra soldada la tapa, tratando de no dañar las partes internas del compresor.

3. Al retirar la tapa del compresor, se vacía el resto de aceite en el mismo contenedor.

4. Cortar el tubo de descarga y lijarlo.

5. Desconectar la conexión que alimenta el motor del compresor.

6. Sacar el motor-bomba de la carcasa, sin separar el mecanismo del motor.

7. Colocar el compresor en la placa de soporte para su uso en el banco de pruebas.

Fig. 4.2 Desamble de compresores.
Realizado por el autor.

Al tener los mecanismos de la matriz listos; cada una de las pruebas se realizó siguiendo un protocolo establecido por el equipo de diseño, el cual define una serie de pasos que permiten la repetitividad en las pruebas así como una forma estructurada de realizarlas. Dicho protocolo es el siguiente.

Protocolo de pruebas Mecanismos de compresión

PREVIO

1. Montar el mecanismo de compresión junto con la base de soporte, sobre las placas en el banco de pruebas utilizando balines en los diferentes niveles para obtener el movimiento de dos grados de libertad.
2. Realizar la conexión de los sensores, la tarjeta de adquisición y el motor trifásico.
3. Alimentar los sensores mediante las especificaciones establecidas por el fabricante.
Sensor de Par: 10 [V] | Sensor de Presión 10 [V] | Sensor de Posición 5[V]
4. Realizar la conexión neumática entre el mecanismo de compresión y la fuente de aire.
5. Lubricar el mecanismo de compresión con el mismo aceite retirado de los compresores.

Las pruebas se tienen que realizar en un horario de 1:00 pm a 3:00 pm siguiendo los siguientes pasos. Es necesario realizar el previo cada que se comienza con un serie de pruebas nueva o con un mecanismo de compresión diferente. (No realizar pruebas si está lloviendo).

PRUEBAS

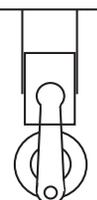
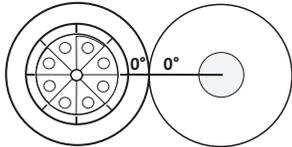
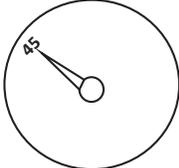
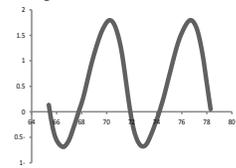
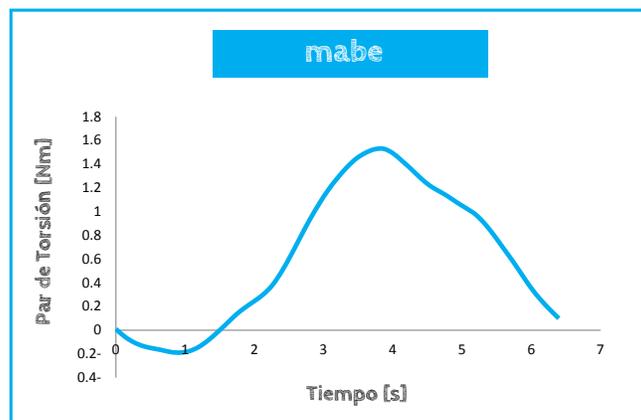
<p>1. Posicionar el mecanismo al punto donde existe la mayor expansión en la compresión. Esa posición será la referencia del cero para medir la posición del mecanismo.</p> 	<p>2. Colocar el sensor de posición en 0°</p> 	<p>3. Acceder a la interfaz gráfica y correr la prueba. Esperar que se calcule los promedios para verificar si los sensores están disponibles para la prueba. Cuando los leds indicadores de la interfaz se enciendan, se pasa al paso 4. En caso de no ser así, revisar paso 2 y 3 de las instrucciones del previo.</p>
<p>4. Alimentar de aire al mecanismo de compresión con una presión de 45 [PSI].</p> 	<p>5. Encender el motor trifásico para transferir energía al mecanismo y observar su comportamiento en el display de la interfaz.</p> <p><small>Nota: Del paso 4 al 5 tiene que durar menos de 10 segundos.</small></p> 	<p>6. En cualquier momento de la prueba después del paso 5 se pueden exportar los datos mediante el botón indicado para realizar esta acción. La prueba puede pararse después de exportarse los datos o en cualquier momento desde el paso 3.</p> 
<p>Las pruebas tiene que tener una duración de un dos minutos como máximo de paso 3 al paso 6.</p>		

Fig. 4.3 Protocolo de pruebas.
Realizado por el autor.

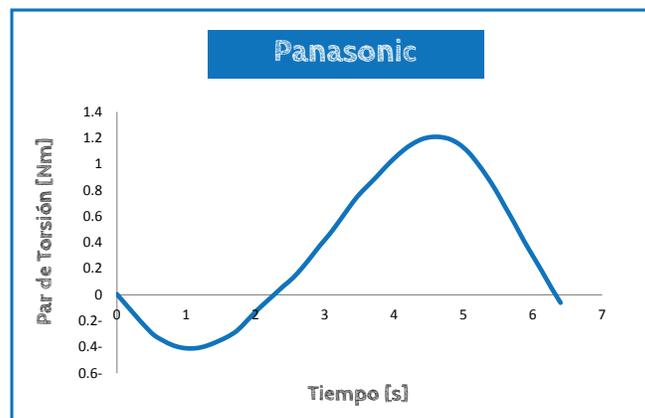
Resultados

5.1. Resultados obtenidos por el banco de pruebas

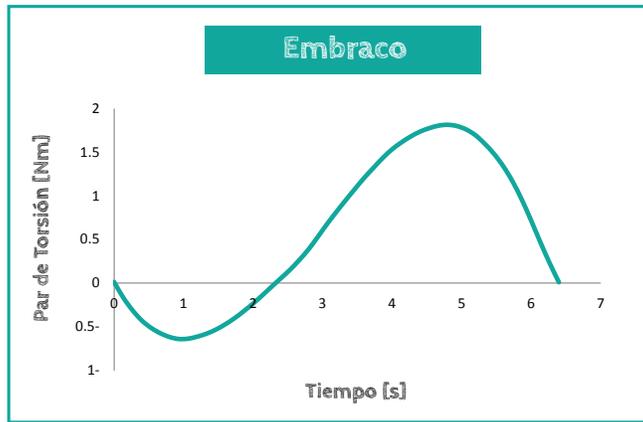
1. Se realizaron 15 pruebas por cada mecanismo de compresión apegadas al protocolo, las cuales mostraron el comportamiento que tuvo cada sistema de compresión en condiciones iguales de presión y velocidad angular para calcular el **Trabajo de Flecha** de cada compresor. Lo cual se representó con la tendencia del Par de torsión de forma gráfica.



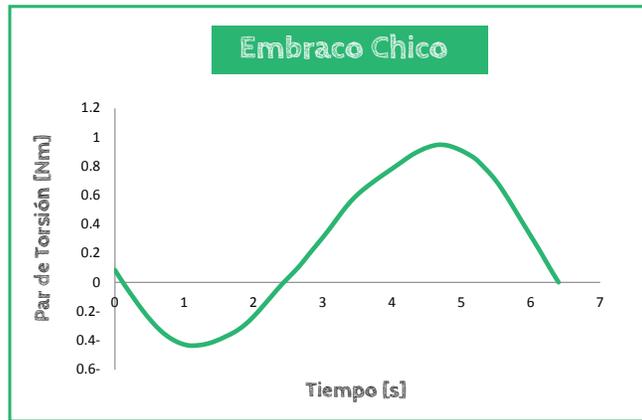
Gráfica 5.1 Mecanismo de compresión MABE.



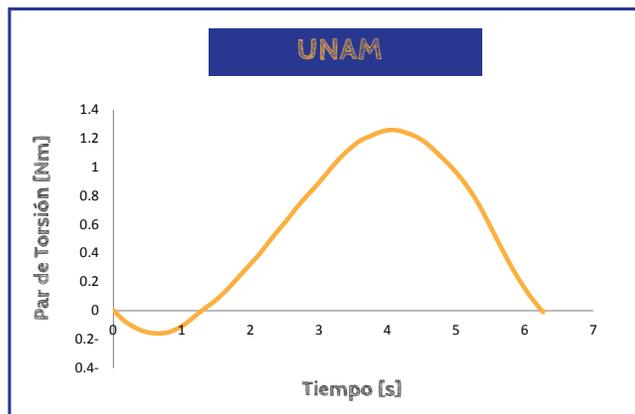
Gráfica 5.2 Mecanismo de compresión PANASONIC.



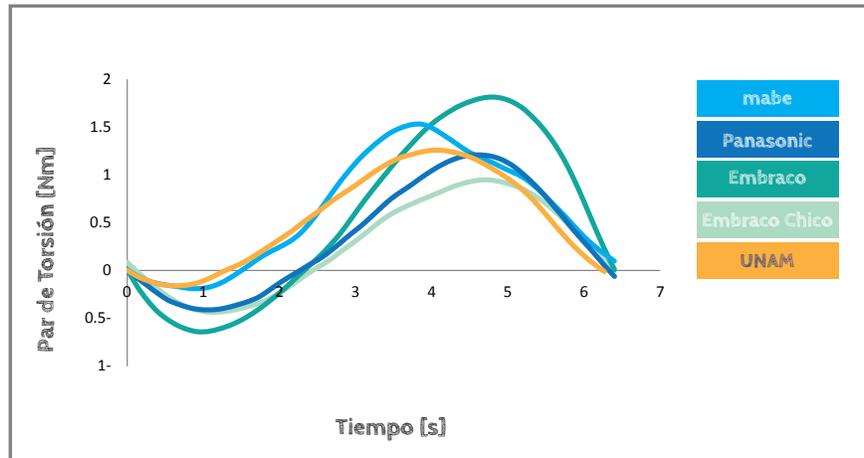
Gráfica 5.3 Mecanismo de compresión EMBRACO.



Gráfica 5.4 Mecanismo de compresión EMBRACO chico.



Gráfica 5.5 Mecanismo de compresión UNAM.



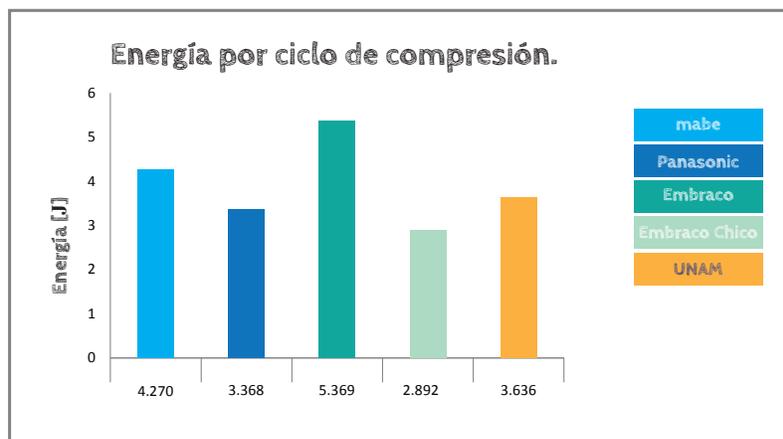
Gráfica 5.6 Gráfica comparativa de los mecanismo de compresión.

Mediante los datos obtenidos también se calculó la energía empleada por ciclo de compresión en cada uno de los compresores, utilizando la velocidad angular del motor ω y el Par de Torsión τ arrojado por el banco de pruebas. Para conocer el valor de la energía se empleó la siguiente ecuación.

$$Potencia = \dot{W} = |\tau\omega|$$

$$Energía = W = \sum \dot{W}\Delta t$$

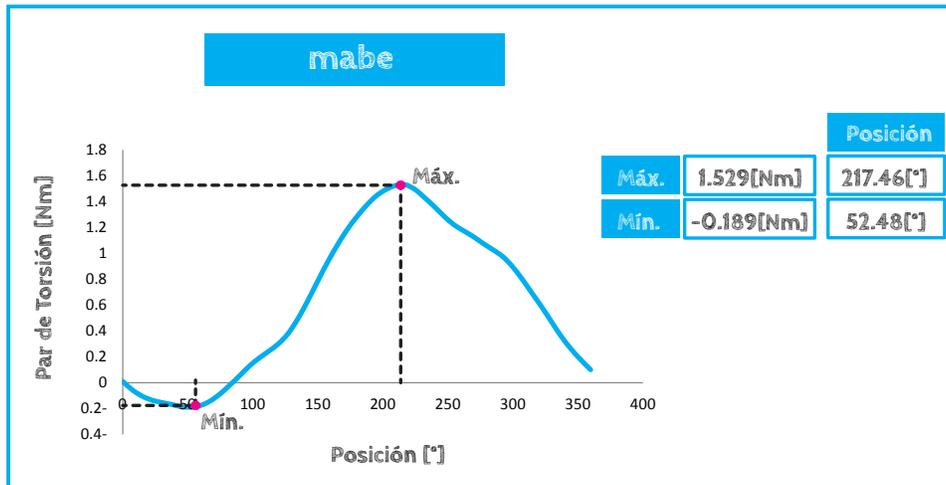
Con la ecuación mostrada se calculó la energía que necesita cada mecanismo por ciclo de compresión, lo cual permite comparar que compresor necesita menor energía en mismas condiciones. Los resultados obtenidos de la energía se muestran en la siguiente gráfica.



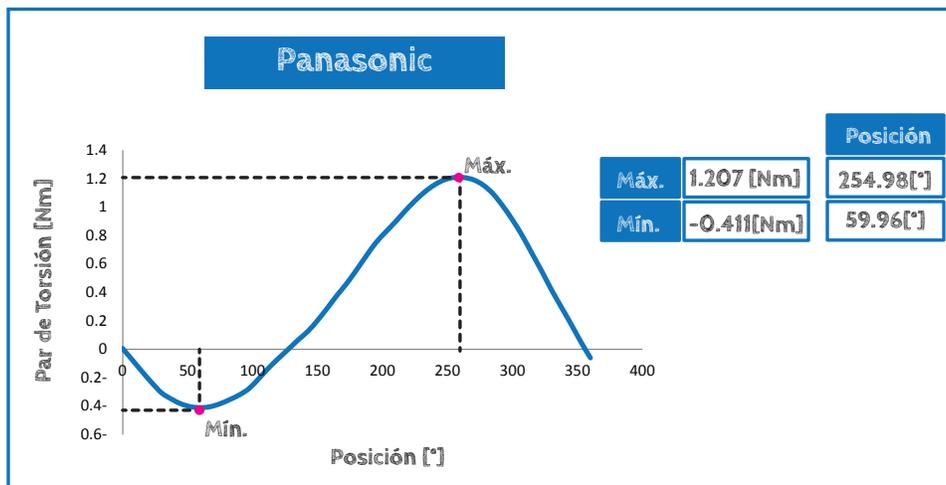
Gráfica 5.7 Energía por ciclo de compresión.

Por otra parte el banco de pruebas sirvió para mostrar la posición angular de los mecanismos en relación con el Par de torsión y con ello conocer los puntos críticos de cada mecanismo, como lo es su par de torsión máximo y mínimo en su posición angular.

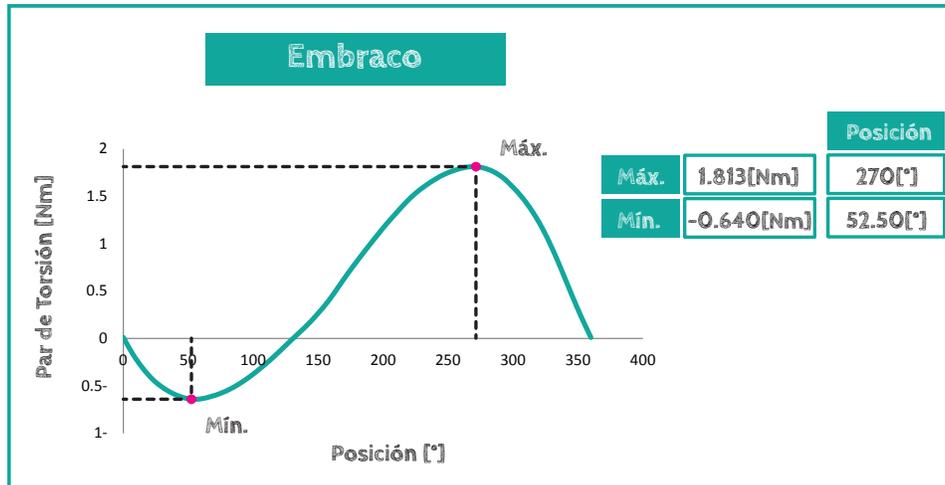
A continuación se muestra en las siguientes gráficas el comportamiento de cada compresor en su par de torsión con respecto a su posición y sus puntos máximos y mínimos de Par de Torsión.



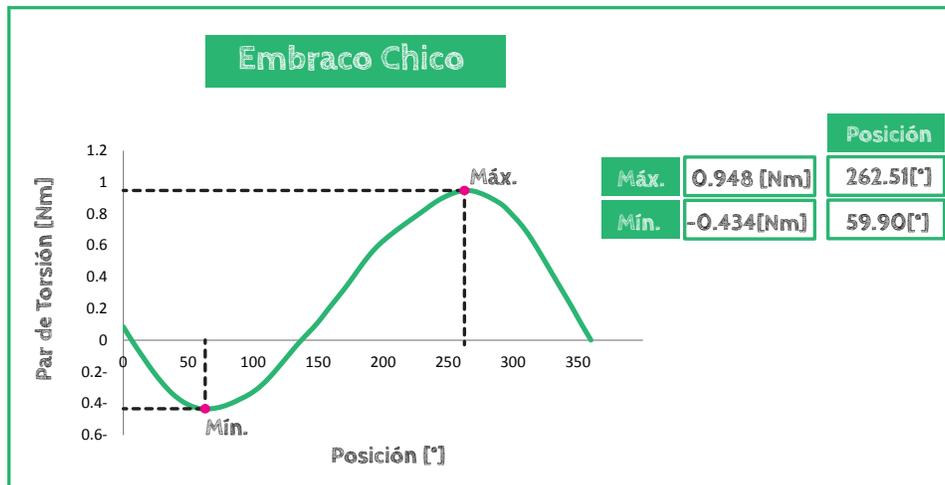
Gráfica 5.8 Mecanismo de compresión MABE con su posición.



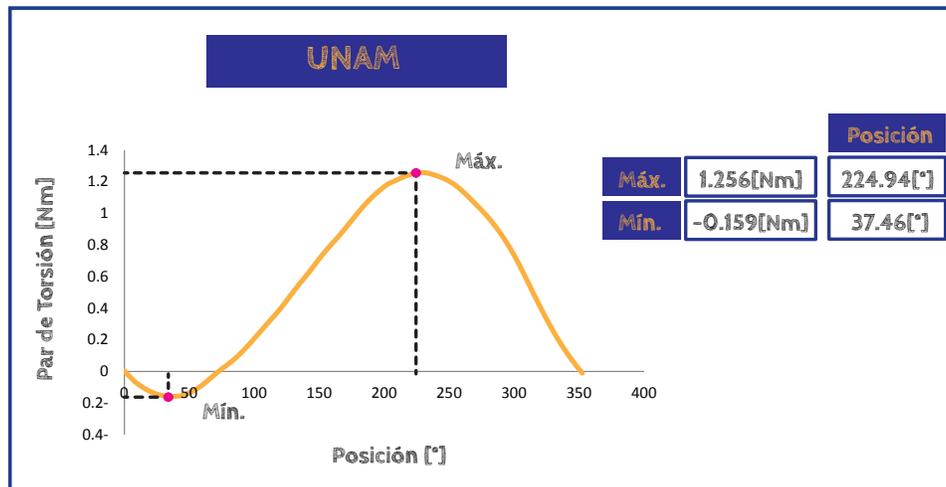
Gráfica 5.9 Mecanismo de compresión PANASONIC con su posición.



Gráfica 5.10 Mecanismo de compresión EMBRACO con su posición.



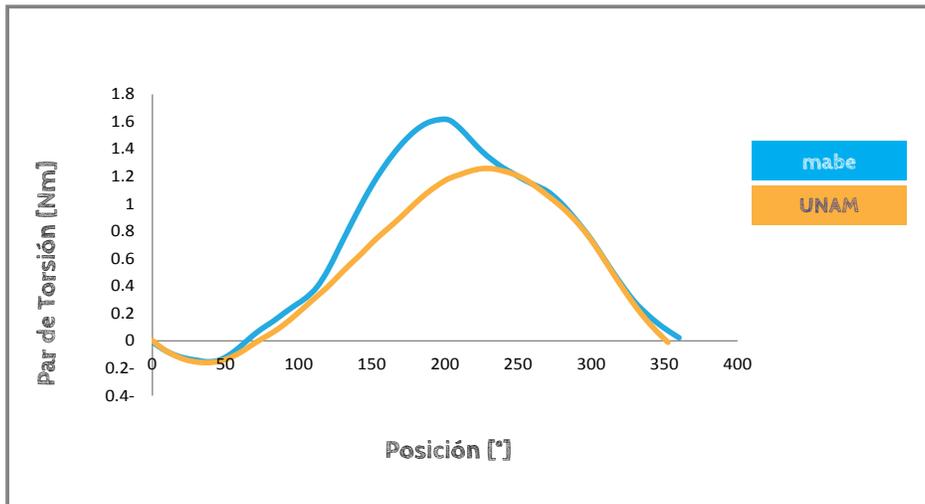
Gráfica 5.11 Mecanismo de compresión EMBRACO chico con su posición.



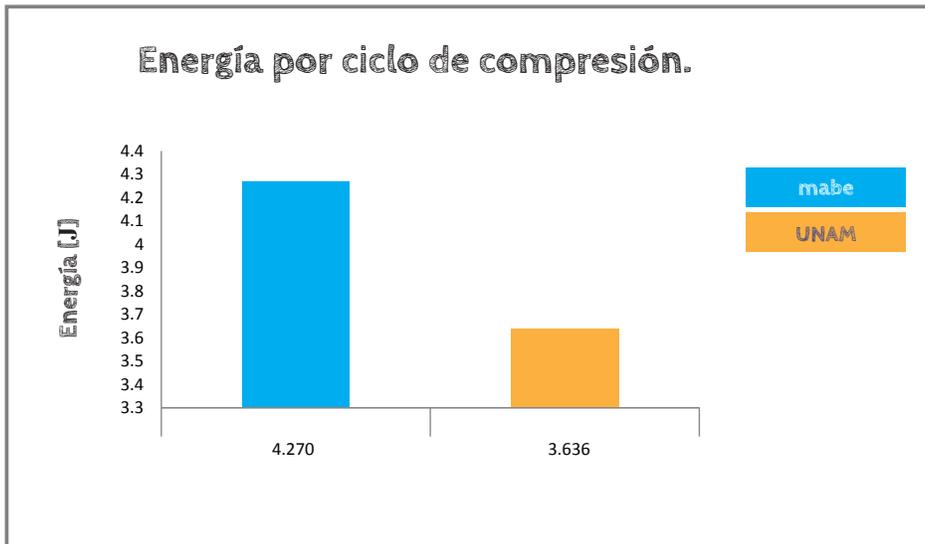
Gráfica 5.12 Mecanismo de compresión UNAM con su posición.

2. Para satisfacer una de las necesidades de Mabe y mostrarle posibles mejoras de su compresor, se realizó un prototipo de mecanismo de compresión en un proyecto paralelo al de la construcción del banco de pruebas, donde se cambió el mecanismo de Yugo Escoses utilizado por la empresa en su bomba por uno de Manivela Biela Corredera, lo cual se hizo sin modificar de manera brusca el diseño del compresor original, conservado el mismo pistón.

Por lo que el banco de pruebas sirvió para identificar las diferencias entre el compresor de Mabe y el propuesto por la UNAM en una serie de pruebas en condiciones iguales para poder verificar cuál de ellos resulta más eficiente en sus gráficas de Par de Torsión y energía por ciclo de compresión, como los mostrados por anterioridad en las siguientes gráficas que muestran la comparación de estos dos mecanismo.

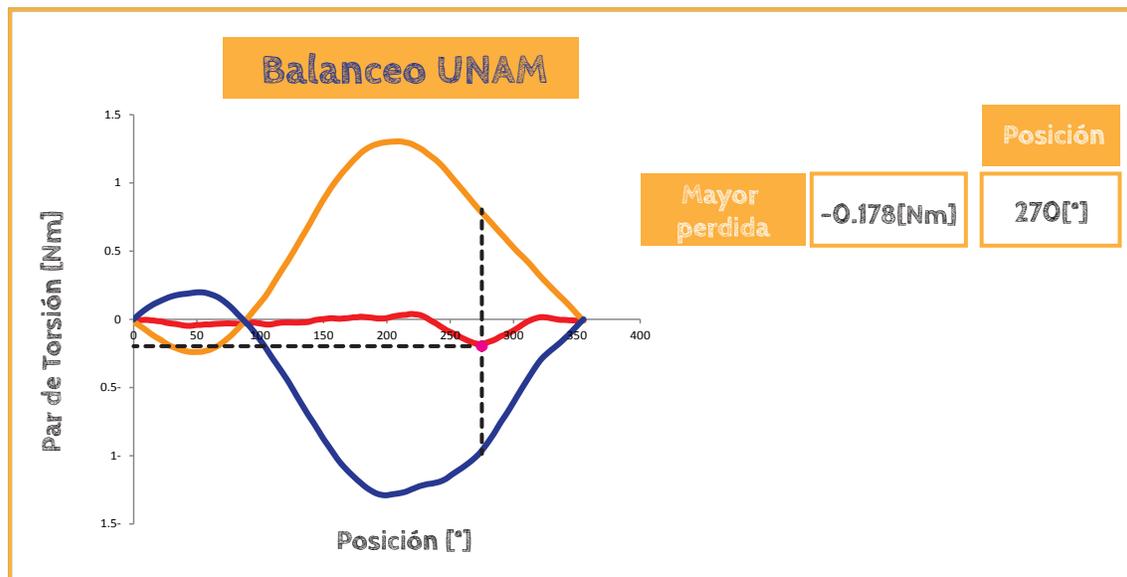


Gráfica 5.13 Comparación de par de torsión entre mecanismo de mabe y UNAM.



Gráfica 5.14 Comparación de energía entre mecanismo de mabe y UNAM.

Por otro lado con el banco de pruebas se propone conocer si los sistemas de compresión están balanceados, mediante una prueba que consiste en analizar el comportamiento que tienen los mecanismos en sus dos sentidos de giro, los cuales de forma ideal se tiene que comportar de la misma manera y al sumarlos entre el resultado tendría que ser igual a cero; en el caso de que no sea así el sistema tiene pérdidas y no está balanceado en los puntos con mayor valor como se muestra en la siguiente figura.



Gráfica 5.16 Balanceo de mecanismo de compresión UNAM.

Cabe mencionar que los datos generados por el banco de pruebas fueron previamente analizados por diagramas de cuerpo libre de los mecanismos de forma cuasiestático debido a la velocidad baja del motor. Lo cual sirvió solo para mostrar la posible tendencia que llegarán a tener los mecanismos en el banco de pruebas ya que este método considera condiciones cuasiestáticas sin tomar en cuenta los efectos de la inercia de las piezas, solo su posición en el tiempo. Por lo tanto, es de esperar que este método no arroje resultados cercanos al comportamiento real del compresor; es por eso que necesitamos otros métodos que consideren más variables en el modelo.

Los métodos analíticos utilizados para conocer la dinámica de los mecanismos fueron diagramas de cuerpo libre, los cuales se muestran a continuación.

5.2. Resultados analíticos de los mecanismos de compresión

Debido a que la velocidad es baja (menor a 10RPM) se tomó como un modelo cuasiestático, por lo tanto en cada paso del movimiento puede decirse que el mecanismo está en equilibrio.

Manivela Biela Corredera

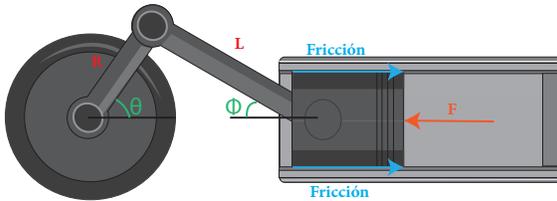


Fig. 5.1 Diagrama del Manivela Biela Corredera. Realizado por el autor.

De la figura 5.1 podemos apreciar que mediante ley de senos se obtiene:

$$\frac{R}{\text{sen}\phi} = \frac{L}{\text{sen}\theta}$$

$$\text{sen}\phi = \frac{R}{L} \text{sen}\theta$$

$$\phi = \text{arcsen}\left(\frac{R}{L} \text{sen}\theta\right)$$

La fuerza que ejerce la biela sobre el cilindro puede representarse como dos componentes, las cuales llamaremos P_x y P_y .

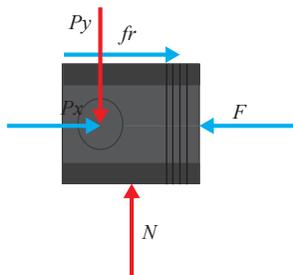


Fig. 5.3 Diagrama de cuerpo libre del pistón. Realizado por el autor.

Yugo Escocés

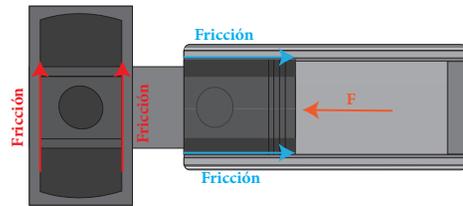


Fig. 5.2 Diagrama del Yugo escocés. Realizado por el autor.

El diagrama de cuerpo libre del Yugo Escocés se representa en tres diagramas de cuerpo libre; los cuales se muestran a continuación.

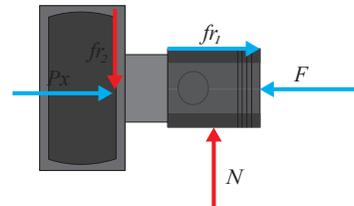


Fig. 5.5 Diagrama de cuerpo libre del Yugo. Realizado por el autor.

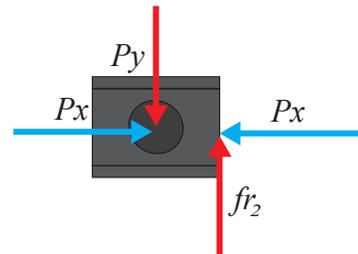


Fig. 5.6 Diagrama de cuerpo libre de la corredera. Realizado por el autor.

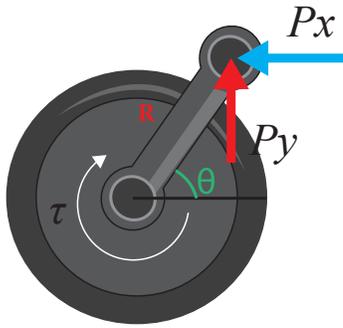


Fig. 5.4 Diagrama de cuerpo libre de la Manivela.
Realizado por el autor.

Mediante el diagrama de cuerpo libre del pistón y asumiendo que está en equilibrio la suma de fuerzas queda de la siguiente manera.

$$Px = F - fr$$

$$Py = N$$

Pon lo que:

$$fr = \mu_k N$$

Con ello queda de la siguiente manera:

$$fr = \mu_k Py$$

$$Px = F - \mu_k Py$$

Además, geoméricamente:

$$Py = Px \tan \phi$$

Por lo tanto:

$$Px = F - \mu_k Px \tan \phi$$

$$Px = \frac{F}{1 + \mu_k \tan \phi}$$

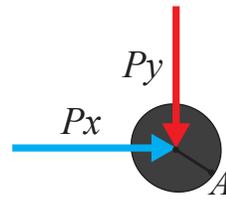


Fig. 5.7 Diagrama de cuerpo libre del eje excéntrico.
Realizado por el autor.

Con el diagrama del Yugo y considerando que se encuentra en equilibrio.

$$Px = F - fr_1 = F - \mu_1 N$$

$$fr_2 = N$$

De la corredera interior del Yugo y su diagrama de cuerpo libre se puede concluir que:

$$fr_2 = Py$$

Además:

$$fr_2 = \mu_2 Px$$

Lo cual queda de la siguiente manera.

$$Py = \mu_2 Px$$

Las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$Px = F - \mu_1 \mu_2 Px$$

$$Px = \frac{F}{1 + \mu_1 \mu_2}$$

Mediante el diagrama de cuerpo libre de la manivela la ecuación final queda de la siguiente manera.

$$\sum M = 0$$

$$\tau = RP_x \sin \theta + RP_y \cos \theta$$

Mediante el diagrama de cuerpo libre del eje excéntrico la ecuación final queda de la siguiente manera.

$$\sum M = 0$$

$$\tau = RP_x \sin \theta + RP_y \cos \theta$$

En análisis de cada uno de los mecanismos se realizó de 0° a 360° con un grupo de 100 valores cada uno de 3.6°, en los ángulos superiores de 180° el sentido de la fricción del pistón se invirtió. Con un coeficiente de fricción 0.25 (μ) el cual es para material acero-acero.

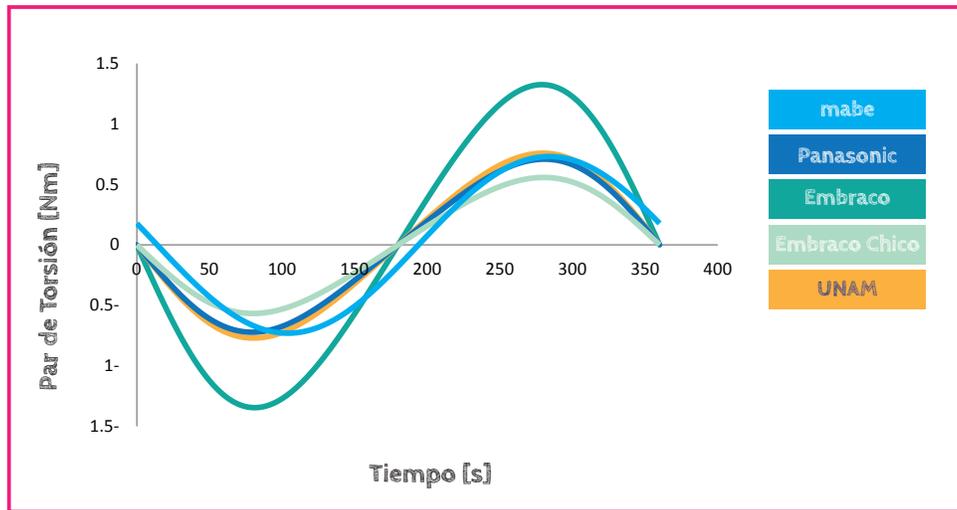
Donde P_x y P_y representan las fuerzas de reacción en cada cuerpo, F_r las fuerzas de fricción que se están involucradas y N la fuerza normal.

Para realizar el análisis los análisis se utilizaron los siguientes parámetros.

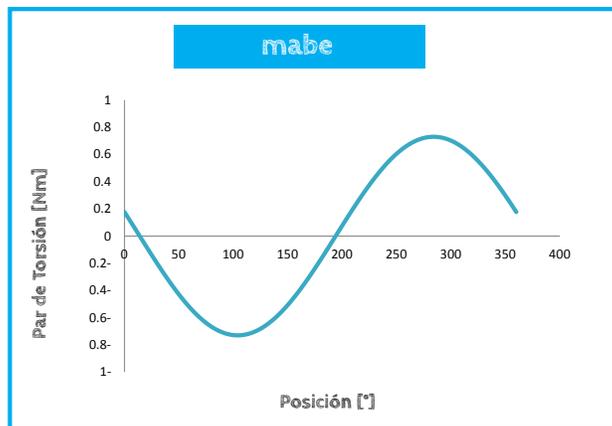
	mabe	Panasonic	Embraco	Embraco Chico	UNAM
Manivela	7.1 mm	7.2mm	8.0 mm	8.0 mm	7.1 mm
Biela	NA	37 mm	50 mm	40 mm	40 mm
Diámetro del pistón	21 mm	20 mm	26 mm	18 mm	21 mm

Tabla 5.1 Datos utilizados de los compresores para análisis de diagrama de cuerpo libre. Realizado por el autor.

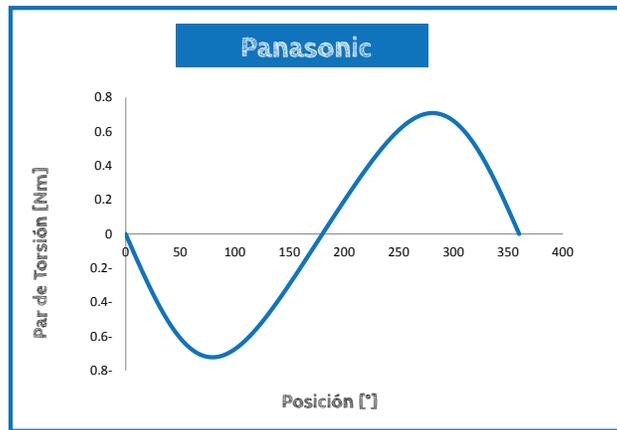
Mediante el análisis de diagramas de cuerpo libre los datos obtenidos de los mecanismos de compresión son los siguientes:



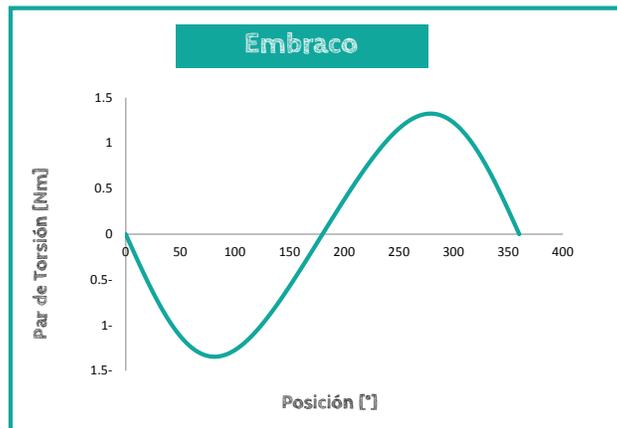
Gráfica 5.17 Gráfica comparativa de los mecanismo de compresión del método analítico.



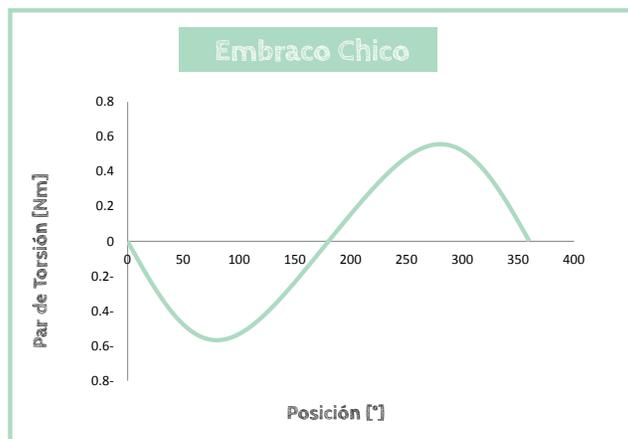
Gráfica 5.18 Mecanismo de compresión MABE mediante método analítico.



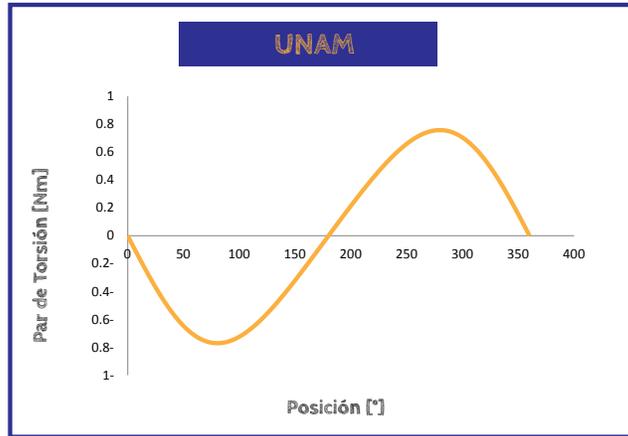
Gráfica 5.19 Mecanismo de compresión PANASONIC mediante método analítico.



Gráfica 5.20 Mecanismo de compresión EMBRACO mediante método analítico.



Gráfica 5.21 Mecanismo de compresión EMBRACO chico mediante método analítico.



Gráfica 5.22 Mecanismo de compresión UNAM mediante método analítico.

También se obtuvieron los valores máximos y mínimos del par de torsión de cada mecanismo mediante las pruebas analíticas.

	mabe	Panasonic	Embraco	Embraco Chico	UNAM
Par de torsión Máximo [Nm]	0.7401	0.7081	1.3240	0.6378	0.7681
Par de torsión Mínimo [Nm]	-0.7401	-0.7081	-1.3240	-0.6378	-0.7681

Tabla 5.2 Par de torsión máximo y mínimo en análisis de diagrama de cuerpo libre. Realizado por el autor.

5.3. Análisis de resultados

5.3.1. Análisis de resultados de las especificaciones

Se realizó una parte de análisis de resultados para verificar si se cumplieron las especificaciones de diseño del banco de pruebas. Lo cual se muestra a continuación en una serie de puntos que resaltan cada una de ellas.

1. Frecuencia de comportamiento del banco: Para obtener una frecuencia de comportamiento del sistema menor a 60 Hz, se optó por colocar un motor trifásico el cual mueve el sistema a una velocidad angular de 9.32 RPM, por lo que brinda una frecuencia de trabajo en el banco de pruebas de 0.1553 Hz. Esto sirvió para establecer una frecuencia de muestreo pequeña.

2. Valor máximo a medir de par de torsión: Para saber el intervalo de Par de torsión con el cual el banco de pruebas trabajaría, se analizaron los mecanismo de compresión de manera analítica; lo cual dio a conocer los valores máximos del par de torsión en cada sistema de estudio; con lo que se encontró que los valores estaban por cinco veces por debajo del rango propuesto en la etapa de especificaciones y más del rango del sensor propuesto por el equipo en la etapa de generación de concepto.

3. Valor máximo a medir de Presión: El equipo definió una presión de trabajo de 45 [PSI] para cada prueba, lo cual brinda seguridad al personal que manipula el banco de pruebas. La presión establecida fue un parámetro el cual se utilizó para verificar el comportamiento de los sistemas, incluyendo los métodos analíticos.

4. Rango a medir de Posición: El sensor de posición realizado para el banco de pruebas fue diseñado para medir posición de un intervalo de 0 a 360 grados centígrados y tener la apreciación en tiempo real de los valores de par de torsión con los de la posición en una sola vuelta.

5. Tiempo mínimo de montaje y desmontaje del banco: Al momento de cambiar cada mecanismo de compresión en su montaje y su desmontaje se estima un tiempo de 6 a 8 minutos, lo cual fue definido y demostrado por las pruebas realizadas en el montaje y desmontaje del banco de pruebas cuando se trabajó con él; asumiendo la práctica que se tenía al manipularlo.

6. Tipos compresores que puede caracterizar el banco: Se definieron 5 mecanismos de compresión de marcas mundialmente conocidas incluido el de la empresa en estudio, así como un prototipo de mecanismo realizado por la UNAM los cuales se estudiaron con el banco de pruebas. Sin embargo el banco de pruebas es capaz de estudiar cualquier tipo de mecanismo de compresión de electrodoméstico.

7. Reproducibilidad en las pruebas: Para poder obtener la reproducibilidad de las pruebas del banco se realizaron caracterizaciones estáticas de los sensores de par de torsión y de posición (potenciómetro) ya que son los encargados de representar la realidad en cada uno de los sistemas. Dicha caracterización sirvió para conocer la tendencia de los sensores así como razón de cambio la cual fue comparada con las definida por el fabricante para asumir que porcentaje de error puede

existir en cada una de las mediciones. En caso del sensor de Par de torsión mediante las pruebas de caracterización estática se encontró que existe un error relativo del 0.0389% con respecto al valor de conversión del fabricante y 0.018% en el sensor de posición. También para poder tener mediciones más repetibles se estableció un horario en el cual todas las pruebas tenían que realizarse .

8. Facilidad en manipulación de datos posterior a las pruebas: La especificación del manejo de los datos se abordó con la exportación de datos desde la interfaz gráfica hasta la plataforma Excel Office con la cual después de cada prueba se manipularon, guardaron y trabajaron datos para su análisis y uso posterior. La plataforma utilizada fue escogida por la relación que tenía el equipo con ella, así como fácil acceso en cualquier computadora.

Número	Métrica	Cumplido
1	Frecuencia de comportamiento del sistema	✓
2	Valor máximo a medir de par de torsión	✓
3	Valor máximo a medir de Presión	✓
4	Rango a medir de Posición	✓
5	Tiempo mínimo de montaje y desmontaje del banco	✓
6	Tipos compresores que puede caracterizar el banco	✓
7	Reproducibilidad en las pruebas	✓
8	Facilidad en manipulación de datos posterior a las pruebas	✓

Tabla 5.3 Análisis de resultados de las especificaciones. Realizado por el autor.

5.3.2. Análisis de resultados de los datos obtenidos

Se realizó una comparación de los datos obtenidos con el banco de pruebas y los resultados teóricos para conocer la relación que existía entre ellos mediante las gráficas de tendencia del trabajo de flecha de los mecanismos de compresión, así como sus puntos máximos de par de torsión. Lo cual se muestra con la fig. 5.8 y la gráfica 5.23.

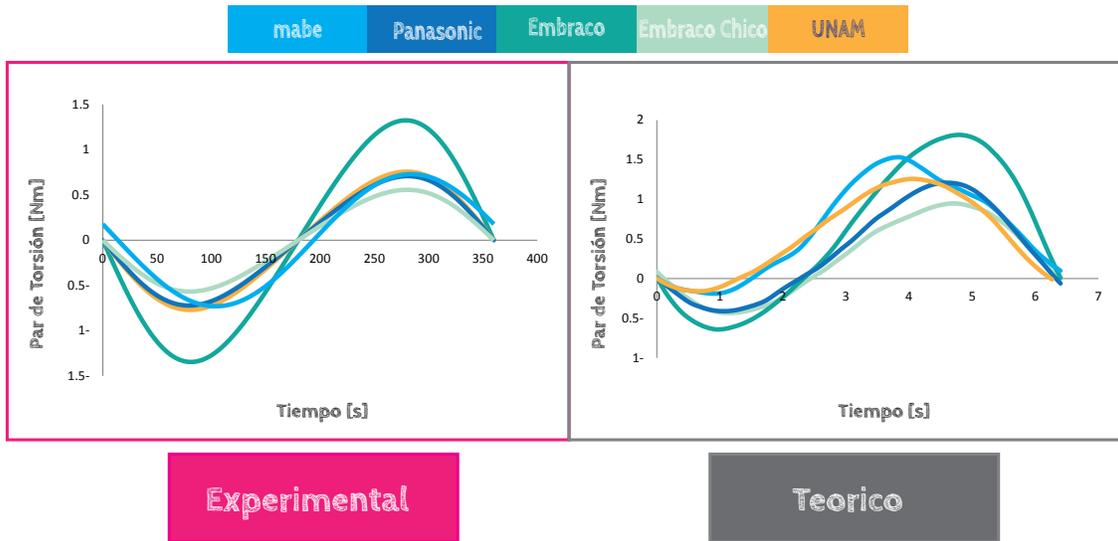
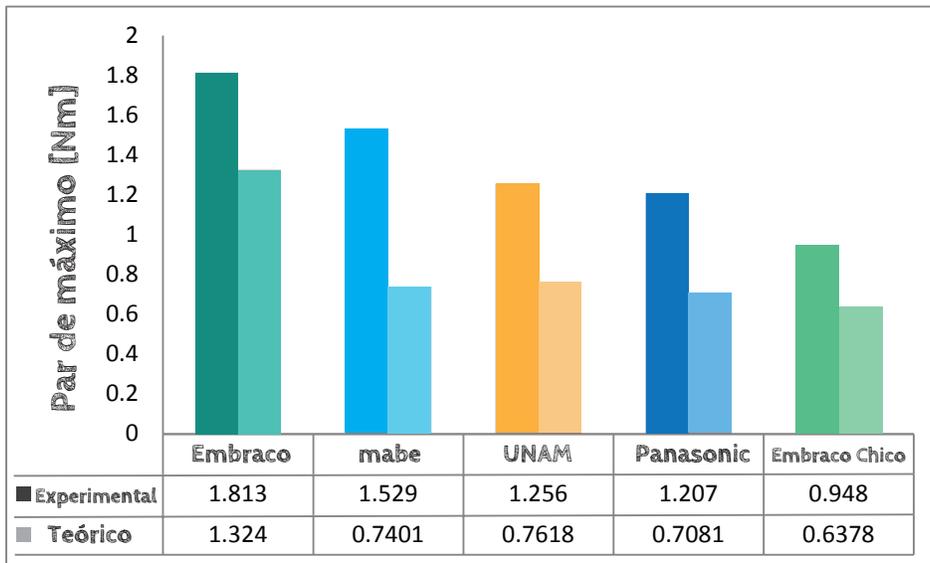


Fig. 5.8 Comparación de datos teóricos y experimentales.
Realizado por el autor.



Gráfica 5.23 Gráfica comparativa de par máximo de torsión.

Conclusiones

Capítulo

6

La investigación en la academia es uno de los pilares fuertes para el impulso de la innovación y el desarrollo de la tecnología en cualquier ámbito, es por ello que el desarrollo de este proyecto, Banco de Pruebas para la Caracterización de Mecanismos de Compresión, crea un puente para la innovación en mecanismos de compresión de electrodoméstico; ya que el banco logra identificar el par de reacción de cualquier mecanismo de compresión de electrodoméstico, así como comparar con diversos sistemas de compresión de diferentes marcas para encontrar deficiencias que existan en su diseño y proponer posibles mejoras.

Cabe mencionar que el banco de pruebas sirvió como herramienta en su etapa inicial, cuando solo contaba con el sensor de par de torsión, para desarrollar un prototipo de mecanismos de compresión por la UNAM para la empresa Mabe y lograr que su compresor tuviera un impacto positivo en su eficiencia.

Por lo que este proyecto en su configuración final logró mostrar de forma segura y confiable el comportamiento que tienen los compresores, que sirve para generar conocimiento en el área y con ello lograr nuevos desarrollos tecnológicos. Recalcando que El Banco de Pruebas ayudo a la empresa Mabe a conocer el funcionamiento de su propio compresor y con ello compararlo con los que son mundialmente competitivos, con lo que se logra poner a México en la mira para competir en esta área.

Es importante decir que en la investigación previa al desarrollo de este proyecto no se encontró un banco de pruebas que detallara de tal manera los mecanismos de compresión como lo hace el definido en este trabajo, ni enfocado al área de electrodomésticos.

En lo que concierne al banco de pruebas para su desarrollo futuro se recomienda llevar a los mecanismos de compresión a su velocidad y presión nominal de trabajo, para involucrar las influencias de la inercia que se llegan a tener en el trabajo de los compresores así como el efecto que tiene cuando el intervalo de presión es superior. También es recomendable realizar un análisis teórico más completo donde se puedan involucrar más variables para obtener un análisis más detallado y apegarlo a las condiciones reales del banco, incluyendo los volantes de inercia que no se tomaron en cuenta en el método de diagrama de cuerpo libre utilizado en este trabajo, los pesos de las piezas y los cambios de velocidad que pudieran generar.

Bibliografía

Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky y S. Hamid Nawab (1998) *Procesamiento de Señales Analógicas y Digitales*. (2ª ed.). The United States of America: Thomson.

David González Calleja (2012) *Motores Térmicos y sus Sistemas Auxiliares*. España: Parafino.

Heinz P. Bloch y John J. Hoefner (1996) *Reciprocating Compressors: Operation & Maintenance*. The United States of America: Gulf Publishing Company.

Ian Sommerville (2005) *Ingeniería de Software*. (7ª ed.). España: Person Educación.

Ing. (grad.) Peter Berg (2000) *Conceptos, Sistemas y Esquemas*. Alemania: Rober Bosch GmbH.

John Avison(1989) *The World Of Physics*. (2ª ed.). United Kingdom: Thomas Nelson and sons.

José Alfredo Jiménez Bernal, Claudia Del Carmen Gutiérrez Torres y Juan Gabriel Barbosa Saldaña (2014) *Termodinámica*. México: Grupo Editorial Patria.

Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger (2013) *Diseño y Desarrollo de Productos*. (5ª ed.). México: Mc Graw Hill.

Mario León (2000) *Diccionario de Tecnología Ferroviaria*. España: Babel.

Miguel Ángel Pérez García (2014) *Instrumentación Electrónica*. España: Paraninfo.

Ramón Pallás Areny (2003) *Sensores y Acondicionadores de Señal*. (4ª ed). España: Marcombo.

Yanus A. Cengel y Michael A. Boles (2012) *Termodinámica*. (7ª ed.). The United States of America: Mc Graw Hill.

