



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA MECÁNICA
CAMPO DISCIPLINARIO: INGENIERÍA MECATRÓNICA

TÍTULO:
DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN
ELECTRODOMÉSTICOS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:
ING. ANAHÍ VELAZQUEZ SILVA

TUTOR PRINCIPAL
DR. ALEJANDRO C. RAMÍREZ REIVICH

2016



Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	2
Lista de figuras	4
Lista de tablas.....	7
I. Resumen.....	8
II. Abstract	8
III. Objetivos	9
IV. Hipótesis.....	9
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	10
Importancia del análisis de fallas en los sistemas, principalmente en las puertas.....	10
1.1 Antecedentes “Confiabilidad”	13
1.2 ¿Qué es el Análisis Modal de Fallas y Efectos?	14
1.2.1 Tipos de AMFE y su clasificación	15
1.2.2 Pasos para el uso de la AMFE en la Ingeniería de Diseño.	16
1.2.3 Ventajas y desventajas de la AMFE.....	16
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	17
2.1 Búsqueda y revisión del trabajo de detección de fallas en el mundo.....	18
2.1.1 Sistemas físicos de predicción de fallas.....	19
2.1.2 Sistemas virtuales de predicción de fallas.....	23
2.2 Ventajas del análisis físico comparado con una simulación.	25
2.2.1 Desempeño	25
2.2.2 Aplicabilidad	26
2.2.3 Costo –Beneficio.....	26
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	
Análisis frecuencial y mecánico aplicado a la detección de fallas en puertas	28
3.1 Análisis dinámico de los sistemas	31
3.2 Detección de variables mecánicas de forma experimental	36
3.2.1 Detección experimental del centro de gravedad.....	36
3.3 ¿Qué es la transformada de Fourier y como se aplica?	38
CAPÍTULO 4. ENTENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS	42
4.1 Elementos que componen el sistema	43
4.1.1 Elementos de sujeción	46



4.1.2	Elementos de amortiguación	48
4.1.3	Elementos de soporte	51
4.2	Principales Problemas Detectados en las Puertas de Refrigeradores	53
CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN		56
5.1	Acelerómetros.....	57
5.2	Celdas de carga.....	60
5.3	Sensor de desplazamiento angular	62
5.4	Mapa sensorial: Análisis introductorio biorrobótico aplicado al tren superior	64
5.6	Diseño de un banco de pruebas para abrir y cerrar puertas	71
5.6.1	Diseño mecánico	71
5.6.2	Sistema de movimiento.....	73
5.7	Adquisición y procesamiento de la señal	74
5.7.1	Descomposición de la señal en su espectro de frecuencias	78
CAPÍTULO 6. IDENTIFICACIÓN DEL GRADIENTE DE PÉRDIDA DE FUNCIÓN		82
6.1	Desarrollo de prueba de impacto a partir de los datos obtenidos en el mapa sensorial .	82
6.1.1	Objetivos	83
6.1.2	Componentes	83
6.1.3	Protocolo para detección del gradiente de pérdida de función	84
6.2	Resultados: Identificación del gradiente de pérdida de función	95
CAPITULO 7. CONCLUSIONES		100
7.1	Contribución.....	102
7.2	Trabajo futuro	103
Apéndice A: Instrumentación.....		104
A.1	Acelerómetro de carga.....	104
A.2	Acelerómetro piezoeléctrico.....	106
A.3	Celda de carga	109
A.4	Refrigerador	111
A.5	DAQ NI USB 6341	112
A.6	Kistler LabAmp 5165A.....	114
Bibliografía		115



Lista de figuras

Ilustración 1 Principales etapas para realizar un Análisis Modal de Fallos y Efectos (Biolini, 1994)	14
Ilustración 2 Ejemplo de prueba de apertura y cierre con fuerza humana (youtube Yuuuchuubu) 17	
Ilustración 3 Robot para analizar ciclos de apertura y cierre en puertas de automóviles (FANUC , America Corporation).....	18
Ilustración 4 Vista lateral del sistema de apertura y cierre de puertas de automóviles (FANUC , America Corporation).....	18
Ilustración 5 Banco de pruebas para puertas automotrices (Daimler Chrysler, 1996)	19
Ilustración 6 Prueba de resistencia de puertas en ambientes a bajas temperaturas para el modelo VoltAGE (Chevrolet 2010)	20
Ilustración 7 Banco de pruebas para puertas de refrigeradores (Factual Tech Solutions)	20
Ilustración 8 Sistema robótico de apertura y cierre de puertas automotrices (Land Rover UK).....	20
Ilustración 9 Acomodo de refrigeradores dentro de cámara climática, obtenido de norma AHAM 7001.2-2014	21
Ilustración 10 Frasco de propilenglicol y termopar, obtenido de norma AHAM 7001.2-2014	22
Ilustración 11 VDST realizada por el equipo Toyota Auto Body (2008).....	23
Ilustración 12 Ejemplo de una gráfica que muestra el punto de mayor esfuerzo en una puerta durante el ciclo de apertura y cierre. Obtenida del artículo “Multi-Body Simulation Approach for Evaluating Door Slam Durability, HTC 2010 y Mahindra.....	25
Ilustración 13 Número de ciclos que debe ejecutar un banco de pruebas de impacto en puertas. 26	
Ilustración 14 Clasificación de las señales	29
Ilustración 15 Gráfica de apertura y cierre de puerta de refrigerador. Señal adquirida con una tasa de muestreo de 625 datos por segundo (Usuario de 1.60 m y 65 Kg).....	29
Ilustración 16 Gráfica de apertura y cierre de puerta de refrigerador. Señal adquirida con una tasa de muestreo de 625 datos por segundo (Señal generada con el banco de pruebas)	30
Ilustración 17 Diagrama del sistema masa-resorte-amortiguador aplicado a la puerta del refrigerador.	31
Ilustración 18 Diagrama de momentum angular de una partícula (Mecánica para ingenieros, Dinámica. R.C. Hibbeler)	33
Ilustración 19 Diagrama de detección experimental del CG	36
Ilustración 20 Aplicación del protocolo para la identificar el CG en la puerta del refrigerador.....	37
Ilustración 21 Retrato de Jean Baptiste Joseph Fourier creador de la transformada de Fourier	38
Ilustración 22 Ejemplo del espectro de frecuencia de una señal senoidal simple (Interfaz desarrollada en NI LabView, 2014)	39
Ilustración 23 Gráficas de una señal de aceleración de puerta móvil del refrigerador (usuario de 1.60 [m] y 65 [Kg]	40
Ilustración 24 Refrigerador de prueba montado sobre un prototipo de banco de pruebas.....	42
Ilustración 25 Refrigerador 33" configuración "French door" (GE, GNS23GMHES).....	43
Ilustración 26 Diagrama de cuerpo libre de una puerta del refrigerador de estudio	44
Ilustración 27 Fotografía del sello hermético de una puerta (objeto de estudio)	45
Ilustración 28 Bisagra superior de refrigerador GNS23GMHES.....	46
Ilustración 29 Diagrama de cuerpo libre de la bisagra superior.....	47

Ilustración 30 Imagen representativa del sello de goma de un refrigerador (obtenida del sitio soluciones prácticas para tu hogar)	48
Ilustración 31 Sección transversal del sello de goma	48
Ilustración 32 Sello hermético, imán y guía.....	49
Ilustración 33 Pequeño rodillo colocado para guiar la puerta a un cierre correcto.....	50
Ilustración 34 Reductor de impacto colocado en la esquina superior externa de la puerta.....	50
Ilustración 35 Bisagra inferior del refrigerador de estudio	51
Ilustración 36 Fuerzas que influyen en la bisagra inferior.....	51
Ilustración 37b Gráfica de la espuma de poliuretano sometida a un ensayo de tracción	52
Ilustración 38 Ejemplo de falla en las bisagras de los refrigeradores lo que produce desalineación de las puertas (Ilustración obtenida del sitio reparatumismo.org)	53
Ilustración 39 Ejemplo de deformación del sello térmico (imagen obtenida del refrigerador de un voluntario).....	54
Ilustración 40 Sección de la espuma de poliuretano de un refrigerador	55
Ilustración 41 Secuencia de apertura y cierre de puerta.....	56
Ilustración 42 Imagen que muestra un modelo de una sonda de apoyo mecánico (Manual Brüel & Kjaer)	57
Ilustración 43 Modelo de sonda de proximidad (Manuel Brüel & Kjaer).....	57
Ilustración 44 Configuración y funcionamiento de un acelerómetro piezoeléctrico	58
Ilustración 45 Imagen que muestra la colocación del acelerómetro en el centro de gravedad de la puerta.	59
Ilustración 46 Acelerómetro piezoeléctrico (Kistler 8704B500).....	59
Ilustración 47 Acelerómetro de carga (Kistler 8044).....	59
Ilustración 48 Galgas conectadas en forma de puente de Wheatstone	60
Ilustración 49 Ejemplo de galga extensiométrica unidireccional	60
Ilustración 50 Posición de la celda de carga durante la prueba	61
Ilustración 51 Celda de carga (Kistler 9712B250).....	61
Ilustración 52 Trayectoria angular descrita por la puerta del refrigerador y el brazo del banco (prueba realizada en laboratorio)	62
Ilustración 53 Potenciómetro de precisión (Omega).....	63
Ilustración 54 Ambiente recreado para mapa sensorial.....	65
Ilustración 55 Marcadores de luz difusa colocados en las articulaciones del tren superior.	65
Ilustración 56 Ángulo de flexión y extensión de Mujer 1	66
Ilustración 57 Ángulo de flexión y extensión de Mujer 2	67
Ilustración 58 Ángulo de flexión y extensión de Hombre 1.....	68
Ilustración 59 Ángulo de flexión y extensión de Hombre 2.....	69
Ilustración 60 Ángulo de flexión y extensión de Hombre 3.....	69
Ilustración 61 Ángulo de flexión y extensión obtenido a través de un estudio de goniometría (sujeto de 163[cm] y 57[Kg])	70
Ilustración 62 Modelado de sistema para abrir y cerrar puertas.	71
Ilustración 63 Perfil de aluminio 6063 (modelo TM 40- 40 ST de Transformadora de metales)	72
Ilustración 64 Acoplamiento entre el motor y brazo de apertura y cierre (Aluminio 6063).....	72
Ilustración 65 Motor CNFM 6075DA (imagen adquirida del sitio oficial de fabricante)	73



Ilustración 66 Ensamble real del banco de pruebas para apertura y cierre de forma automática (Laboratorio del CDMIT 2016).....	73
Ilustración 67 Interfaz para adquisición y procesamiento de datos (desarrollada en LabView 2014)	75
Ilustración 68 Gráficas del comportamiento de las puertas del refrigerador durante un ciclo de apertura y cierre (sujeto de 1.90m y 69 Kg).....	76
Ilustración 69 Gráfica de ciclo de apertura y cierre acelerado ($F=0.001$ Hz).....	77
Ilustración 70 Ejemplos de espectros de frecuencia para diferentes señales.....	78
Ilustración 71 Demostración del concepto de espectro de frecuencias	78
Ilustración 72 Demostración del espectro de frecuencias	79
Ilustración 73 Interfaz generada a partir del software Kistler® para procesamiento de señales	80
Ilustración 74 Aceleración de la puerta móvil (Interfaz Kistler)	80
Ilustración 75 Espectro de frecuencia de la señal mostrada en la ilustración 67.....	81
Ilustración 76 Instrumentos utilizados para la prueba de apertura y cierre	83
Ilustración 77 Diagrama de posicionamiento de los sensores (Visto desde un plano superior).....	84
Ilustración 78 Gráfica en que se muestra el perfil de aceleración del motor comparado con el tiempo de adquisición.....	85
Ilustración 79 Gráfica de apertura y cierre de forma normal (señal adquirida con una tasa de muestreo de 6250 muestras por segundo).....	87
Ilustración 80 Gráfica de apertura y cierre de forma acelerada (señal adquirida con una tasa de muestreo de 6250 muestras por segundo).....	88
Ilustración 81 Sujeción del brazo a la manija del refrigerador realizado con cable acerado y recubrimiento plástico	89
Ilustración 82 Gráfica que describe el comportamiento de la puerta móvil durante el ciclo de apertura y cierre con el banco de pruebas (señal muestreada a una frecuencia $F=1$ KHz.....	90
Ilustración 83 Gráfica que describe el comportamiento de la aceleración producida por la estructura y el gabinete (Señal muestreada a una frecuencia de 1KHz)	90
Ilustración 84 Gráfica de fuerza que experimenta el sistema durante el ciclo completo (señal muestreada a una frecuencia $F=1$ KHz).....	91
Ilustración 85 Espectro de frecuencia de la gráfica descrita por la puerta móvil cuando se realiza el ciclo de apertura y cierre normal (ilustración 78).....	92
Ilustración 86 Espectro de frecuencia de la gráfica descrita por la puerta móvil cuando se realiza el ciclo de apertura y cierre acelerado (ilustración 79).....	93
Ilustración 87 Espectro de frecuencia de la gráfica descrita por la puerta móvil cuando se realiza el ciclo de apertura y cierre con el banco de pruebas (ilustración 81).....	94
Ilustración 88 Comparación de señal de aceleración de puerta móvil original contra la misma filtrada.....	95
Ilustración 89 Gráfica en la que se muestran 10 ciclos de apertura y cierre acelerado para identificación del gradiente de pérdida de función (Señal adquirida a 6250 datos por segundo y realizada por usuario de 1.75 [m] y 68 [Kg])	96
Ilustración 90 Gráfica comparativa entre el primer y el último ciclo	97
Ilustración 91 Gráfica comparativa entre el primer y el último ciclo con sistema automático.....	98



Lista de tablas

Tabla 1 Coordenadas del Centro de gravedad de la puerta del refrigerador	37
Tabla 2 Cargas que debe soportar la puerta durante las pruebas de apertura y cierre (MABE).....	43
Tabla 3 Características físicas de la muestra de usuarios	64
Tabla 4 Características principales del motor	73



I. Resumen

Esta investigación surge a partir de la identificación de una necesidad que repercute en la confiabilidad de un sistema, en particular las puertas de electrodomésticos. Se sabe que la puerta de cualquier sistema evita el flujo de energía entre el interior y el ambiente en que se desempeña, en la mayoría de los sistemas las puertas aseguran la estadía de contenido en algunas partes específicas del interior, sabiendo entonces que las puertas son un elemento importante de los sistemas que las utilizan se decidió diseñar un protocolo que permita identificar el comportamiento, así como la pérdida de la función principal de los elementos. El protocolo diseñado considera la instrumentación de un gabinete montado en un banco de pruebas para monitorear variables como la aceleración, fuerza y posición de los elementos que lo componen. Posteriormente las señales obtenidas se analizan mediante un espectro de frecuencias que permita identificar las componentes frecuenciales de los elementos que componen el subsistema y que influyen directamente en la apertura y cierre de la puerta ya que son los puntos significativos de su trayectoria. Parte del protocolo consiste en someter al refrigerador a pruebas destructivas de apertura y cierre con la finalidad de acortar su ciclo de vida útil e identificar el gradiente de pérdida de función del sistema a través de una prueba de apertura y cierre.

II. Abstract

This research arises from the identification of a need that has repercussions on the reliability of a system, particularly door appliance. It is known that the door of any system avoids the exchange of energy and material between the interior and the environment in which it performs, in most systems the doors ensure the stay of content in some specific parts of the interior, identifying then that the doors are an important element of the systems that use them was decided to design a protocol that allows to identify the behavior as well as the loss of the function of the elements. The protocol designed considers the instrumentation of a cabinet to monitor variables such as the acceleration, strength and position of the elements that compose it. Subsequently the signals obtained are analyzed by a frequency spectrum that allows identifying the frequency components of the elements that make up the system and that directly influence the opening and closing of the door since they are the significant points of its trajectory. Part of the protocol consists in subjecting the refrigerator to destructive opening and closing tests in order to accelerate its life cycle and to identify the system's loss of function gradient.



III. Objetivos

- Analizar los detalles durante la trayectoria de apertura y cierre que describe la puerta de un refrigerador para caracterizar el comportamiento de los elementos que la componen.
- Identificar por medio del análisis frecuencial y temporal el deterioro de los elementos durante el ciclo de vida útil del sistema.
- Diseñar e implementar un prototipo de un sistema que permita realizar la tarea de apertura y cierre de forma automática.
- Diseñar y validar un protocolo que permita identificar de forma sencilla el gradiente de pérdida de función, lo que indicará que existe la posibilidad de un modo de falla.

IV. Hipótesis

Esta investigación vincula diversos conocimientos adquiridos en varias áreas de la ingeniería por lo que debe cumplir con objetivos ambiciosos, considerando los alcances que se pueden concretar la hipótesis que se plantea es:

Si se descompone la señal de vibración que describe la puerta al abrir y cerrar en un espectro de frecuencia se podrá identificar el comportamiento de los elementos de la puerta comparando las componentes frecuenciales obtenidas con el desempeño de la puerta a lo largo de su trayectoria angular de tal forma que se identifique qué es lo que sucede en cada segmento que recorre la puerta.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Importancia del análisis de fallas en los sistemas, principalmente en las puertas.

Los avances tecnológicos de la actualidad han generado en los usuarios un elevado nivel de exigencia en cuanto al funcionamiento de los sistemas que consume, es decir, quieren un dispositivo que funcione adecuadamente pero que a su vez tenga una prolongada vida útil.

Estos sistemas que son afectados con el paso del tiempo son llamados sistemas dinámicos. Mirando desde la perspectiva de la vida cotidiana se puede observar que estamos rodeados de sistemas que realizan labores repetitivas y a los cuales se les exige un buen desempeño. En las casas se cuenta con diversos electrodomésticos, entre ellos los refrigeradores; si se mira en la calle se encuentran los automóviles y externando un poco más está el transporte público. Pero ¿qué tienen en común estos sistemas? además que de cumplen con tareas repetibles, como la refrigeración, la combustión y la transportación, estos tres sistemas tienen un elemento en común y son las puertas.

Si bien es cierto que las puertas de estos sistemas no son el elemento principal, sí contribuyen a que la función principal se desarrolle de forma correcta. Actualmente existen sistemas que prueban la apertura y cierre de las puertas, algunos otros están en desarrollo y buscan probar todos estos elementos sometidos a n ciclos de apertura y cierre con la finalidad de simular de forma acelerada su ciclo de vida, sin embargo, una vez que la puerta falla la prueba se detiene y con ello se arroja un resultado no del todo completo.

Utilizando las puertas de diferentes refrigeradores como objeto de estudio, esta investigación se enfoca en el análisis frecuencial de vibraciones para el desarrollo de un protocolo versátil por medio del cual se pueda identificar de forma dinámica la causa específica de las fallas en las puertas antes de que los refrigeradores salgan a la venta.

Haciendo énfasis en las puertas de los refrigeradores, existe una pequeña parte llamada bisagra que tiene un desempeño relevante sobre el funcionamiento del refrigerador pues conforme pasa el tiempo la bisagra debe cumplir con un mayor número de ciclos de apertura y cierre lo que ocasiona la fatiga de la misma, fenómeno que provoca deformaciones en los pernos guía de la bisagra y disminuye su capacidad de sujeción y carga. El caucho de separación que determina el cerrado hermético de la puerta es otro de los componentes importantes de la misma ya que si ambos



elementos no cumplen correctamente con el cierre de la puerta, el funcionamiento del refrigerador se pone en riesgo.

Hablando de la pérdida de la función se debe considerar la espuma de poliuretano que es un elemento que brinda rigidez al gabinete, además de que cumple con la función de generar una cavidad adiabática, es decir, no permite el intercambio térmico entre el interior y el exterior. La espuma de poliuretano es una mezcla de polioli, isocianato y estabilizadores espumantes que se hacen reaccionar para generar una espuma, en la cual solo el 3% del volumen final es sólido. (Luis Bilurbina, 1990)

Es importante asegurar que la puerta se mantenga en su posición correcta ya que de lo contrario surgen diferentes efectos que modifican el funcionamiento del refrigerador en general, tales como:

- **Enfriamiento**

La primera consecuencia del cerrado incorrecto de la puerta del refrigerador es una disminución en su capacidad para mantener el aire frío en su interior. Si el sello está dañado, influye directamente en el trabajo que tiene que hacer el refrigerador de mantener los alimentos perecederos a temperaturas seguras.

- **Condensación**

Un exceso de escarcha y la acumulación de humedad en el interior del congelador y refrigerador pueden surgir como resultado de una puerta mal cerrada. Cuanto mayor es el ingreso de aire permitido dentro del refrigerador, mayor la humedad que se puede generar.

- **Consumo desmedido de energía**

Cuando el aire frío se escapa por la puerta, el compresor tiene que ejecutar un mayor número de ciclos para mantener la temperatura adecuada en el interior, lo que implica un mayor consumo de energía eléctrica.



- **Pérdida de rigidez**

El gabinete que conforma el refrigerador es una caja con paredes huecas que se unen entre sí con espuma de poliuretano, este material brinda rigidez al sistema en general y da el soporte necesario para que pueda contener el peso, sin embargo, es condicionalmente (dependerá de la densidad del producto) resistente al encogimiento si se somete a los hidrocarburos clorados, por lo que con el paso del tiempo el polímero libera el aire que contiene y el gabinete pierde rigidez.

Los conceptos que se requieren para llevar a cabo este planteamiento están directamente relacionados con las teorías de confiabilidad y con diferentes normas desarrolladas además de conceptos mecánicos y de procesamiento de señales que se detallaran adelante.



1.1 Antecedentes “Confiabilidad”

La confiabilidad es la característica de un elemento que se expresa como la probabilidad de que dicho elemento realice la función establecida bajo condiciones dadas para un intervalo controlado, generalmente se designa por la letra *R*. Desde el punto de vista cualitativo, la confiabilidad puede definirse como la capacidad de un objeto de mantenerse funcionando. Cuantitativamente, la confiabilidad específica es la probabilidad de que no ocurran interrupciones operativas durante un intervalo establecido. Es importante mencionar que esto no significa que las piezas u objetos nunca fallarán si no que pueden fallar y ser reparadas bajo protocolos establecidos, sin embargo, el concepto se puede aplicar tanto a piezas no reparables como a piezas reparables, esto dependerá casi al 100% de la función que desempeñará, las condiciones de operación y el intervalo establecido. (Acuña, 2003)

Ahora bien, es importante mencionar que un elemento es una unidad funcional o estructural de complejidad arbitraria que puede ser considerado como objeto de estudio. Puede abarcar hardware, software o ambos e incluso considerar el recurso humano. (Birolini, 1994)

Con el paso del tiempo las empresas nacionales e internacionales se han visto obligadas a desarrollar estrategias que contribuyan a posicionar sus productos en la punta del mercado, para conseguirlo han tomado como base del proceso cuatro factores importantes: el precio, la calidad, la confiabilidad y el tiempo de entrega. (Acuña, 2003)

Considerando lo antes mencionado se puede aseverar que la ingeniería de confiabilidad incursiona en el desarrollo empresarial bajo la necesidad de anticipar fallas y la probabilidad de que éstas ocurran, razón por la cual se abre la posibilidad de diseñar sistemas robustos capaces de fabricar productos de alta calidad, sin embargo, aunque el diseño de los elementos se realiza considerando estrictos requerimientos y bajo ambientes controlados, la diferencia radica entre idealizar un producto para su diseño y su implementación ya que en el primer caso se obvian variables que influyen directamente en el comportamiento del sistema.

Esto último da pie al planteamiento de este tema de investigación con el cual a partir del análisis frecuencial de vibraciones se busca generar un protocolo que permita identificar las causas de las posibles fallas en las puertas de diferentes sistemas. Sistemas que se estudiarán trabajando bajo condiciones reales de operación de tal forma que se conozcan todas las variables involucradas en el proceso.

1.2 ¿Qué es el Análisis Modal de Fallas y Efectos?

Las siglas AMFE como se conoce en los países de habla hispana proviene del inglés *Failure Modes and Effects Analysis FMEA* y significa *Análisis Modal de Fallas y Efectos*. La AMFE es una técnica ampliamente utilizada para la evaluación de confiabilidad y fue diseñada por las fuerzas armadas de Estados Unidos de América en la década de 1990 para detectar los problemas experimentados con los sistemas de control de armas complejas. Con el paso del tiempo su uso se amplió a otros sectores como el electrónico, eléctrico y mecánico. (Dhillon, 1983)

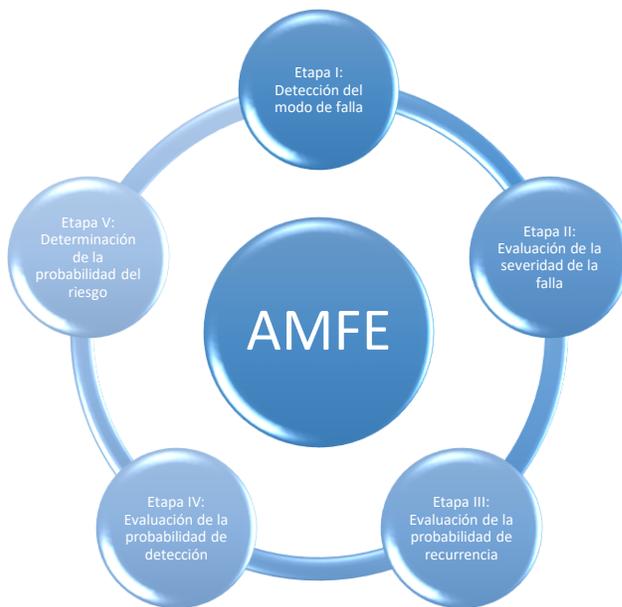


Ilustración 1 Principales etapas para realizar un Análisis Modal de Fallos y Efectos (Biolini, 1994)

Este análisis fue utilizado para el desarrollo de transbordadores, de esta forma se evitaban errores en prototipos muestra para asegurar el correcto funcionamiento del cohete real, un ejemplo de esto es el programa del espacio de Apollo. En la década de 1970, Ford Motor Company® introdujo la AMFE a la industria automotriz para diseñar y mejorar tanto la producción como la seguridad. (Dhillon, 1983)

La AMFE es una herramienta de diseño de gran alcance en la ingeniería ya que facilita la identificación de problemas potenciales durante el proceso de diseño o en general fallas en las primeras etapas de desarrollo. El resultado de este análisis se considera para la toma de decisiones y así poder disminuir la probabilidad de que la falla ocurra nuevamente y disminuir el riesgo si es que la falla se produce.

En ocasiones se consideran los resultados obtenidos para clasificar cada efecto de acuerdo a la gravedad de su fracaso, esto incorpora fallas desde críticas hasta catastróficas y a este análisis se le denomina *Análisis Modal de Fallas, Efectos y Criticidad*.



A pesar de ser un análisis desarrollado hace muchos años, el uso de la AMFE se mantiene vigente ya que brinda la posibilidad de realizar el análisis modal por jerarquía, es decir, se puede analizar cada uno de los elementos de un sistema complejo dependiendo de la importancia de la tarea que cada uno realiza, así como analizar el desempeño del sistema completo como un todo. Por ejemplo, se puede aplicar para determinar las características de rendimiento de un proceso de generación de potencia de una turbina de gas o la probabilidad de fallo funcional de su sistema de protección contra incendios, o la probabilidad de fallo en el funcionamiento de una bomba, hasta una evaluación de los mecanismos asociados a un interruptor de presión. (Birolini, 1994)

1.2.1 Tipos de AMFE y su clasificación

La AMFE puede clasificarse en tres distintas categorías, esta clasificación depende de la etapa que se quiera analizar o en su defecto la etapa en la que se encuentre el sistema. La AMFE permite realizar un análisis localizado del sistema o de sus elementos y éste a su vez se puede aplicar en la etapa de diseño, en la etapa de proceso o en la etapa de desempeño del sistema. A continuación se explican cada una de las variantes.

1.2.1.1 AMFE en la etapa de diseño de detalle

La AMFE se aplica en esta etapa con la finalidad de validar los parámetros de diseño seleccionados para conseguir el desempeño funcional del sistema. La importancia de aplicar la AMFE en este nivel radica en que se pueden identificar los posibles modos de fallo relacionados con el diseño del sistema, subsistema o incluso a nivel de selección de componentes. En este último rubro se consideran las características importantes de un diseño dado, los cambios para guiar el desarrollo de futuros diseños, así como la evaluación de alternativas de diseño durante las fases preliminares y los detalles del diseño de ingeniería de proceso. El *Análisis Modal de Fallas y Efectos* es un enfoque sistemático para reducir la criticidad y el riesgo durante la fase de diseño preliminar.

1.2.1.2 AMFE en la etapa de proceso

Aplicar la AMFE en esta etapa tiene como finalidad el poder identificar las fallas relacionadas con el proceso de manufactura, construcción y montaje. Los beneficios de aplicar la AMFE en este nivel recaen en la posibilidad de identificar potenciales modos de fallo a nivel de equipo, desarrollo de prioridades y la documentación de justificación de cualquier cambio de diseño esencial lo que servirá para guiar el proceso de fabricación y montaje.



1.2.1.3 AMFE en la etapa de pruebas y operación del sistema

En ocasiones las inconsistencias de diseño no son detectadas a tiempo y generan fallas a nivel de sistema. Aplicar la AMFE en este nivel implica un mayor trabajo además de elevados costos ya que se deben jerarquizar las tareas que desempeñan el sistema y subsistemas. En esta etapa la AMFE se aplica para detectar los posibles modos de fallos sistémicos debido a la interacción del sistema de estudio con otros sistemas integrados complejos además de que identifica irregularidades que provienen de las etapas anteriores.

1.2.2 Pasos para el uso de la AMFE en la Ingeniería de Diseño.

Como ya se ha mencionado, la AMFE es un análisis sistemático que requiere de pasos específicos para obtener resultados fiables, cada uno de estos pasos está ligado a conceptos clave como lo son la jerarquización, operaciones realizadas, funciones a desempeñar, modos de fallo, efectos, falla potencial y prevención. Estos pasos se deben llevar a cabo en el siguiente orden:

- Jerarquización del sistema y sus elementos: Identificación de los niveles relevantes dentro del sistema con respecto a sus elementos y funciones que desempeña.
- Operaciones: Establecer normas y fases operativas.
- Funciones: Describir los sistemas y funciones de los equipos, así como de los bloques asociados.
- Modos de fallo: Identificar posibles modos de fallo y sus efectos asociados.
- Efectos: Determinar el efecto de la pérdida de función de cada elemento para cada modo de fallo.
- Falla potencial: Identificación de métodos para detectar posibles fallas y evitar fallas funcionales.
- Prevención: Determinar los cambios de diseño que impidan fallas de función.

1.2.3 Ventajas y desventajas de la AMFE

Existen numerosos beneficios de realiza un *Análisis modal de fallas y efectos* especialmente cuando se trata de detectar fallas en sistemas complejos. El AMFE permite la comparación entre sistemas similares y con ello evitar la repetición de los mismos errores en diseños futuros.

Un análisis sobre los resultados de algunos análisis modales ha arrojado que la mayoría de las fallas no surgen en la etapa de diseño si no en niveles subsecuentes, sin embargo, es preciso evitar errores en niveles inferiores para eliminar altos costos en niveles superiores. (Stapelber, 2009)

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Según el libro “La historia de la tecnología” (T. K. & Williams, 1977), la palabra tecnología se entiende como el conjunto de conocimientos científicamente ordenados que permiten diseñar, crear bienes, así como servicios que facilitan la adaptación del medio ambiente para satisfacer las necesidades esenciales de la humanidad. De forma particular se puede entender la palabra tecnología como un conjunto de actividades diseñadas para generar una solución a partir del conocimiento científico adquirido, de tal forma que se obtenga un resultado tangible.

Es importante mencionar que con el paso del tiempo la tecnología ha evolucionado de tal forma que ha llegado a satisfacer todos los sectores industriales, éstos a su vez ayudan a facilitar la convivencia entre los seres vivos (principalmente humanos) y su entorno de forma segura. Sin embargo, para lograr la seguridad y satisfacción de los seres vivos se debe tener la certeza de que el sistema trabajará de forma adecuada y no perderá su función con el paso de tiempo. Este problema está directamente ligado con la confiabilidad.

Este tema de investigación está enfocado en el diseño de un protocolo que permita conocer la causa específica de la falla en las puertas, tomando un refrigerador como objeto de estudio se realizará un análisis del comportamiento del gabinete durante los ciclos de apertura y cierre. Se sabe que un gabinete está compuesto de más de 100 elementos que cumplen con funciones específicas dentro de un refrigerador, uno de esos elementos son las puertas ya que funcionan como barrera para evitar el intercambio de energía entre el interior y el exterior del gabinete.



Ilustración 2 Ejemplo de prueba de apertura y cierre con fuerza humana (youtube Yuuuchuubu)

Actualmente existen en el mundo diversos sistemas que determinan el ciclo de vida de las puertas lo que permite identificar en qué ciclo deja de funcionar correctamente la puerta, es decir, en qué

momento los componentes pierden su función, la innovación de estos análisis radica en que se pueden tener datos en tiempo real. Sin embargo, aunque existen sistemas sofisticados que se dedican a abrir y cerrar las puertas, aún no existe un sistema que permita la adquisición de datos en tiempo real y que responda con claridad ¿por qué falló la puerta?

2.1 Búsqueda y revisión del trabajo de detección de fallas en el mundo

Con la finalidad de fijar un punto de partida en la investigación, se identificaron los sistemas que se utilizan actualmente para determinar fallas en puertas y se puede ver que el mercado es amplio si se trata de sistemas aplicados a las puertas automotrices, sin embargo, aunque parezca que no existe relación, los principios utilizados en una puerta automotriz se pueden aplicar perfectamente al análisis de detección de fallas en electrodomésticos.

Durante la búsqueda se identificaron dos tipos de sistemas que tienen como tarea principal analizar



Ilustración 3 Robot para analizar ciclos de apertura y cierre en puertas de automóviles (FANUC, America Corporation)

el comportamiento de las puertas, los sistemas físicos de predicción de fallas y los sistemas virtuales de predicción de fallas. A pesar de ser sistemas desarrollados a partir de principios tecnológicos muy avanzados, su tarea consiste en realizar pruebas de fatiga para acelerar la vida útil del objeto de estudio, es decir, realizar ciclos de

apertura y cierre, así como en ocasiones abrir y cerrar vidrios (en caso de que así se requiera). Existen sistemas muy sofisticados que incluso pueden desarrollar la tarea con velocidades y aceleraciones programadas para realizar las pruebas lo más parecido a la realidad como sea posible e incluso cuentan con sistemas de sujeción de puertas que simulan el comportamiento de la mano humana.

Una vez que el sistema ejecuta los ciclos programados, un grupo de expertos verifica de forma manual si la puerta sigue siendo apta para realizar la tarea para la



Ilustración 4 Vista lateral del sistema de apertura y cierre de puertas de automóviles (FANUC, America Corporation)

que fue diseñada, si la puerta cumple con lo estipulado por las normas, es decir, continúa abriendo y cerrando de forma correcta, el auto puede ser comercializado.

Sin embargo, a pesar de existir sistemas que pueden realizar n ciclos de apertura y cierre, ninguno puede realizar el análisis de las fallas del sistema de forma autónoma, es decir, si la puerta llegara a fallar durante el proceso, el sistema de apertura y cierre únicamente se detiene sin arrojar algún resultado que indique cuál es el elemento del sistema que falló.

2.1.1 Sistemas físicos de predicción de fallas

Se les denomina sistemas físicos a los bancos de pruebas que interactúan de forma real con el objeto de estudio, en este caso las puertas. Estos bancos tienen como tarea recrear de forma acelerada el



Ilustración 5 Banco de pruebas para puertas automotrices (Daimler Chrysler, 1996)

ciclo de vida útil del objeto de estudio lo que se traduce como una prueba en la que se aplican cargas repetidas y se detecta si el elemento cumplirá con las tareas para las que fue diseñado, durante el periodo establecido. Un ejemplo claro son las pruebas realizadas a las puertas automotrices en las que se abre y cierra la puerta durante 100 mil ciclos con velocidades y aceleraciones controladas en las que al cabo de la prueba se identifican los elementos desgastados e incluso, si durante la prueba la puerta perdiera su funcionalidad, la prueba se detiene ya

que no puede cumplir con el objetivo general que es la apertura y cierre de la misma.

Dentro de este campo existen sistemas muy complejos que pueden realizar varias tareas de forma simultánea, es decir, abrir y cerrar puertas además de abrir y cerrar vidrios e incluso accionar y liberar seguros. En la ilustración 5 se muestra un sistema creado por la empresa Daimler Chrysler® (1996) para montaje de puertas automotrices, es una estructura formada con perfiles de aluminio que se adapta a la forma de la puerta por medio de almohadillas móviles que simulan el marco de neopreno sobre el que impacta la puerta al cerrar.

Existen sistemas como el que fue creado por la empresa automotriz General Motors® para el estudio del automóvil VoltAGE® (ilustración 6) que realiza 1.5 ciclos por segundo hasta alcanzar los 62,000 ciclos, cada ciclo lo conforman las acciones de apertura y cierre de puertas. Este sistema es un sistema híbrido ya que libera los seguros desde un banco interior y realiza la apertura y cierre con una estructura exterior. (Chevrolet, 2010)



Ilustración 6 Prueba de resistencia de puertas en ambientes a bajas temperaturas para el modelo VoltAGE (Chevrolet 2010)

Un sistema más sofisticado es el desarrollado por Land Rover UK® para probar las puertas de la camioneta Evoque® 2012, éste



Ilustración 8 Sistema robótico de apertura y cierre de puertas automotrices (Land Rover UK)

es un sistema robótico que permite que la tarea se desempeñe de forma precisa además de que se puede variar la fuerza con la que se realiza cada ciclo, haciendo la prueba lo más parecida a la realidad posible. Como se observa en la

ilustración 7, el gripper que se utiliza está diseñado de tal forma que sustituye de forma correcta la acción de la mano humana por lo que se pueden obtener resultados confiables. (Silva, 2014)

Actualmente la empresa Factual Tech Solutions® ha desarrollado un banco de pruebas que permiten realizar pruebas de apertura y cierre de puertas de refrigeradores (Ilustración 8), sin embargo, únicamente brindan información a compradores potenciales por lo que no se sabe qué variables consideren para su diseño. (Solutions, 2016)



Ilustración 7 Banco de pruebas para puertas de refrigeradores (Factual Tech Solutions)

Con respecto a los sistemas que realizan pruebas de fatiga a puertas de refrigeradores, se puede decir que el mercado dirigido al estudio de este sistema es limitado ya que no existen muchas empresas que se dediquen a analizar el comportamiento del mismo. La razón consiste en que existe una asociación llamada AHAM por sus siglas en inglés

“Association of Home Appliance Manufacturers”. La AHAM es una asociación de iniciativa privada que con el tiempo ha ganado la credibilidad de organismos reguladores como el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América además representa los intereses de sus miembros durante el desarrollo de normas por organizaciones externas. Las normas AHAM son adoptadas voluntariamente por sus miembros para establecer un entendimiento común entre los fabricantes y los consumidores. La norma que regula las pruebas efectuadas a los refrigeradores es la “Sustainability Standard for Refrigeration Appliances” (AHAM 7001.2-2014), lo que permite que la prueba se pueda reproducir perfectamente en cualquier empresa que cuente con una cámara de humedad y temperatura o de lo contrario un espacio en el que se tenga un ambiente controlado.

Citando parte de la norma AHAM 7001.2-2014 se puede describir el procedimiento para realizar una prueba real a los refrigeradores.

Partiendo del monitoreo del control de temperatura se sabe que la temperatura ambiente afecta de forma directa el comportamiento de los refrigeradores y pequeñas variaciones pueden generar un sesgo en los resultados de pruebas de rendimiento, por lo que se necesita un ambiente controlado para realizar la prueba, esto nos conduce a una cámara de control climático. (AHAM, 2014)

La cámara debe ser lo suficientemente grande para acomodar cuatro refrigeradores a la vez como



se muestra en la ilustración 9. La idea de colocar los gabinetes tan juntos radica en que en la disposición de las cocinas modernas (en ocasiones, no siempre), únicamente se tiene disponible la parte frontal del refrigerador.

Ilustración 9 Acomodo de refrigeradores dentro de cámara climática, obtenido de norma AHAM 7001.2-2014

La temperatura de la cámara debe fijarse en 76 °F

(24.4 °C) y una humedad de 30%, ambas variables simulan las condiciones ambientales estandarizadas. Posteriormente, cada minuto se toma la lectura de sensores colocados en el centro de la habitación para corroborar que se mantienen los niveles permitidos. (AHAM, 2014)

Para iniciar la prueba se le coloca al refrigerador una carga exacta de masa que varía dependiendo del modelo del refrigerador (en esta investigación se considera dos pruebas, una con 20% y otra con 70% de su capacidad total). La carga se simula con bloques de metal sólidos y frascos rellenos de solución de propilenglicol a los cuales se les coloca en su interior un termopar y el orificio en la tapa por el que sale el cable se sella con resina epóxica.



Ilustración 10 Frasco de propilenglicol y termopar, obtenido de norma AHAM 7001.2-2014

Al ser uno de los principales compuestos de un refrigerante, el propilenglicol se utiliza porque en caso de que el refrigerador no funcione correctamente éste no se congelará y por el contrario servirá para conocer la temperatura que tendrían los productos en su interior. (AHAM, 2014)

Cuando se tienen las condiciones óptimas para realizar la prueba se activa el software de control para comenzar a registrar las temperaturas y humedades cada minuto. Al cabo de 72 horas se tienen miles de mediciones que sirven para conocer el estado del funcionamiento del refrigerador. Sin embargo, en condiciones reales, el refrigerador no permanece cerrado por 72 horas ya que se somete a continuos ciclos de apertura y cierre de puertas o que afecta al funcionamiento del refrigerador. Durante esta prueba en la que se desea obtener resultados de la eficiencia de la máquina en cuanto al sistema de refrigeración se refiere, se simula un ciclo de uso medio, es decir, se abre y cierra la puerta dos veces al día. (AHAM, 2014)

Entonces cada 12 horas se abre la puerta del refrigerador por 30 segundos, luego se cierra y se abre la puerta del congelador durante 30 segundos, se cierra y se espera 30 segundos al cabo de los cuales se vuelve a repetir el ciclo tres veces más. (AHAM, 2014)

Si bien es cierto que todas las puertas comparten características y se componen de elementos similares, hay variables que definen su comportamiento de forma particular, por tal motivo se deben considerar diferentes factores para el análisis de su desempeño. Es importante mencionar que aunque todas las puertas deben de cumplir con estándares de calidad y normas específicas, el diseño y sofisticación del banco de pruebas dependen del perfil de cada empresa. (Manufacturers, 2016)

2.1.2 Sistemas virtuales de predicción de fallas

Un sistema virtual, a diferencia de un sistema físico permite realizar un análisis a partir de una simulación y un modelo tridimensional del objeto de estudio, este tipo de análisis se denomina **VDST** por su nombre en inglés *Virtual Door Slam Test*. En una prueba virtual se pueden recrear todas las condiciones mecánicas bajo las que se desempeña el objeto de estudio y a partir de ello predecir la durabilidad del objeto en función de los ciclos realizados. Generalmente se analizan variables que influyen de forma directa con el comportamiento del sistema, es decir, aceleraciones, velocidades, fuerzas de impacto, deformaciones y desgaste de los elementos, éste último comparándolo con sus propiedades mecánicas que por lo general forman parte de la base de datos del software.

El realizar una prueba virtual se está convirtiendo en tendencia en las empresas a nivel mundial ya que tienen como objetivo realizar una prueba KLT (*Key Life Test*) sin utilizar el producto real lo que aparentemente reduce costos y brinda la posibilidad de modificar de forma casi inmediata el elemento que se ve afectado ya que se obtienen buenas aproximaciones de las fallas de los elementos.

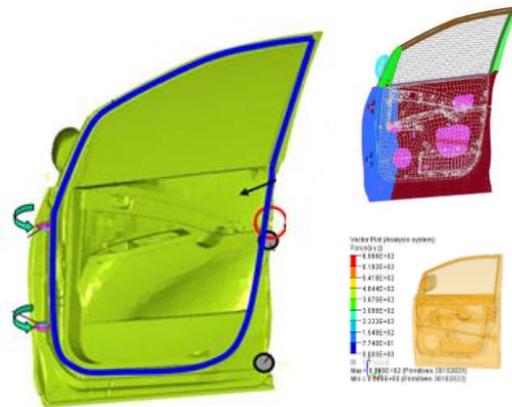


Ilustración 11 VDST realizada por el equipo Toyota Auto Body (2008)

Un VDST brinda la flexibilidad de poder analizar distintos factores importantes en el sistema como lo son:

- Flujo de aire
- Simulación de condiciones de desempeño
- Cargas
- Desplazamientos
- Impactos

Entre las empresas que se han unido a la tendencia de realizar pruebas de forma virtual se encuentra la empresa automotriz Toyota Motor Corporation® para el análisis de las puertas que conforman sus automóviles. En la ilustración 11 se observa parte de la simulación que realiza el equipo de *Toyota Auto Body* presentada en la Segunda conferencia europea de tecnología “HyperWorks” en Estrasburgo, Francia. (Body, 2008)



Existen otras compañías que han preferido el análisis virtual sobre el análisis físico, argumentando mejoras considerables y menos tiempo de operación que impacta de forma directa en los costos del automóvil.

Aunque el VDST es un método que no ha sido explorado a fondo y son pocas las empresas que actualmente recurren a él, existe registro de su desarrollo. En el artículo de nombre *“CAE Virtual Door Slam Test for Plastic Trim Components”* publicado por **SAE Technical Paper Series** y escrito por Hong Su, Chuck Dunn y Alex Krajcirovic (2003) explica el desarrollo de un VDST a detalle, sin embargo por las políticas de derecho de autor no es posible mostrarlo en esta investigación.

Si bien es cierto que las simulaciones son una representación fehaciente del avance tecnológico y brindan la facilidad de ver cómo se comportará el sistema antes de manufacturarlo aún no existe el VDST que arroje datos con un error=0, es decir, un sistema certero que involucre las condiciones ambientales bajo las que trabajará el sistema y considere sus efectos por lo que cada prueba virtual realizada debe correlacionarse con el comportamiento real del sistema para tener una referencia.

2.2 Ventajas del análisis físico comparado con una simulación.

En los apartados anteriores se explicó la diferencia entre un sistema real y un sistema virtual, estos se utilizan en las diferentes industrias dependiendo del perfil de la misma, es decir, los sistemas de lujo, son costosos y los sistemas de uso común son sistemas económicos. A pesar de que el uso de cada sistema depende de muchas variables, existen tres variables que los relacionan entre si y pueden contabilizarse tales como el desempeño, la aplicabilidad y el costo-beneficio que cada uno de ellos implica.

2.2.1 Desempeño

El desempeño de un sistema que realiza pruebas de impacto en puertas suele expresarse en términos de los resultados que se obtienen al monitorear la respuesta dinámica del sistema, así como las vibraciones localizadas en puntos específicos. De tal forma que comparando los resultados obtenidos con los parámetros de diseño se puede obtener el error que tiene el sistema.

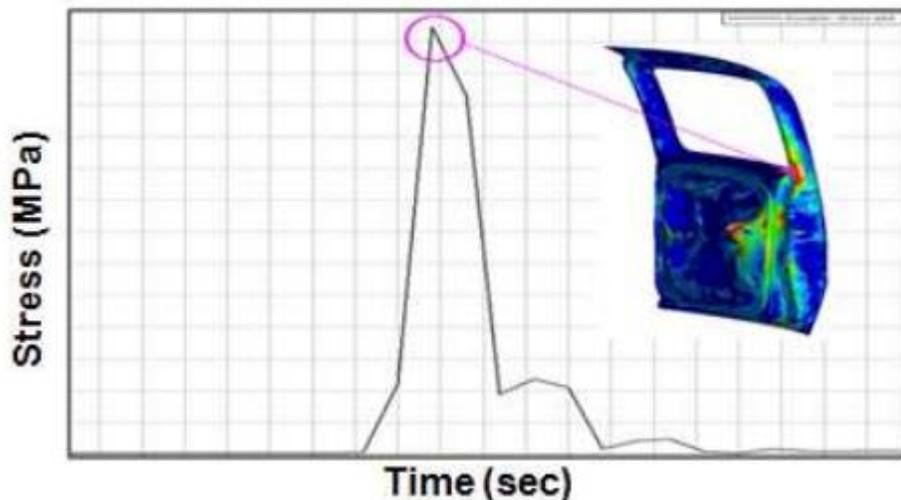


Ilustración 12 Ejemplo de una gráfica que muestra el punto de mayor esfuerzo en una puerta durante el ciclo de apertura y cierre. Obtenida del artículo "Multi-Body Simulation Approach for Evaluating Door Slam Durability, HTC 2010 y Mahindra

Cuando se trabaja con un sistema físico (real) se deben considerar todas las variables que influyen directamente en el comportamiento del sistema. Para generar todas estas variables, el sistema que realiza la prueba al objeto de estudio debe estar provisto de elementos que pueden reproducir casi a su totalidad el comportamiento real del objeto, es decir, actuadores que produzcan movimientos controlados y sensores que permitan monitorear cada etapa. Todos estos elementos con el tiempo fallarán y necesitarán ser reemplazados. Si bien es cierto que poder manipular un sistema real

requiere mayor habilidad para ensamblar o calibrar el objeto, éste brinda la facilidad de observar justo el momento en que ocurre la falla.

Para que un sistema virtual se ejecute, únicamente se requiere una computadora con gran capacidad de procesamiento para poder realizar el análisis a modelos tridimensionales de geometrías complejas, este proceso además de requerir un avanzado desarrollo matemático utiliza grandes bases de datos en las que se almacenan las propiedades mecánicas de los materiales. A pesar de contar con un gran número de parámetros, se realizan idealizaciones que quizá en un sistema real podrían ser la causa de una falla.

2.2.2 Aplicabilidad

La tendencia del avance tecnológico radica en obtener mejores resultados sin tener que realizar un mayor trabajo, es por ello que actualmente las empresas se enfocan en el uso de sistemas virtuales VDST, que pueden predecir alguna falla en etapas tempranas, además de que el uso de una computadora brinda una mayor facilidad de realizar un procedimiento que entender y ejecutar un protocolo para calibración y puesta en marcha de un banco de pruebas.

2.2.3 Costo –Beneficio

La última de las variables que se debe considerar es el costo-beneficio y es la variable más



Ilustración 13 Número de ciclos que debe ejecutar un banco de pruebas de impacto en puertas.

importante ya que todo lo desarrollado en la industria impacta de manera directa la economía de la misma.

La empresa Toyota® asegura que realizar un análisis virtual es mejor ya que al no necesitar que se realicen

miles de ciclos de apertura y cierre se reduce el tiempo (de 10 días a algunas horas) lo que reduce los costos de forma significativa. Además de que se pueden proponer nuevos diseños para solucionar el problema casi de forma inmediata lo que evita que internamente se tenga un área de rediseño adicional.

Por el contrario, un sistema físico que trabaja con un prototipo real requiere aproximadamente 15 días de operación mientras se desarrollan los ciclos que simulan la vida útil de la puerta, al cabo de



este periodo se analiza el desgaste de los componentes para plantear un rediseño de los mismos. Entonces a mayor tiempo de operación, mayor costo para la empresa.

A pesar de la marcada diferencia entre costo y beneficio que existe entre un sistema virtual y un sistema físico se debe considerar que todo análisis virtual sin excepción se coteja contra una prueba real además del tiempo que conlleva el realizar el modelo tridimensional del objeto de estudio (algunas veces es proporcionado por la empresa) lo que implica que además de realizar una prueba virtual se debe realizar una prueba real, entonces el sistema virtual ya no es el más económico.

Concluyendo con las ventajas y desventajas que un sistema tiene frente al otro se observa que existen parámetros que relacionan ambos análisis. Por lo que es mejor conocer las fronteras de operación de cada uno y complementarlo con el otro, de esta forma se puede tener una herramienta con un buen desempeño que permita predecir las fallas antes de que estas ocurran, así como plantear su rediseño inmediatamente y todo esto trabajando bajo condiciones reales.



CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

Análisis frecuencial y mecánico aplicado a la detección de fallas en puertas

En la naturaleza existen un sinnúmero de fenómenos que se pueden modelar de forma física, para generar por medio de ecuaciones constitutivas el modelo matemático del sistema, desde el comportamiento del aire para poder mantener un avión en vuelo, hasta el comportamiento de algunos órganos humanos para diseñar sistemas electrónicos que puedan sustituirlos al estar dañados. Las personas convivimos a diario con sistemas electrónicos que requieren de señales para poder funcionar como los aparatos de sonido, las televisiones, los automóviles e innumerables sistemas biomédicos, sin embargo, entender el funcionamiento de estos elementos es más complejo de lo que parece.

Todas las señales que se encuentran en la naturaleza son señales continuas, esto quiere decir que partiendo de una señal $x(t)$, para cada valor fijo de la variable t existe un valor real. Como ya se mencionó existen múltiples campos de aplicación, pero el área de interés en esta investigación se le conoce como *vibraciones mecánicas*.

Una vibración mecánica se puede definir como un pequeño desplazamiento hacia un lado y a otro de una máquina o parte de ésta, respecto a su posición de equilibrio, entonces las vibraciones son el movimiento de vaivén de los cuerpos provocado por fuerzas asociadas a dicho movimiento. (Santiago, 2015) Como se puede observar a lo largo de este trabajo, las vibraciones mecánicas constituyen un problema común en dinámica e influye directamente en el diseño y funcionamiento de un sistema ya que todos los sistemas en movimiento se encuentran en un estado de constante intercambio de energía.

Existen dos tipos de vibraciones, las vibraciones libres que son las que ocurren cuando un sistema oscila (vibra) bajo la acción de fuerzas inherentes al propio sistema y no hay fuerzas externas aplicadas y las vibraciones forzadas, las cuales suceden cuando existen fuerzas externas que obligan al sistema a vibrar. Las señales emitidas por una vibración mecánica, son señales analógicas o continuas.

Una señal continua puede ser tan sencilla como un escalón o una rampa (ambos unitarios) que se pueden modelar fácilmente con ecuaciones matemáticas hasta señales muy complejas que no siempre es posible representar con modelos matemáticos. Las señales se pueden clasificar de la

siguiente forma (ilustración 14), sin embargo, las señales como las que se analizan en este trabajo son muy complejas ya que pueden cambiar de rubro por diferentes factores.

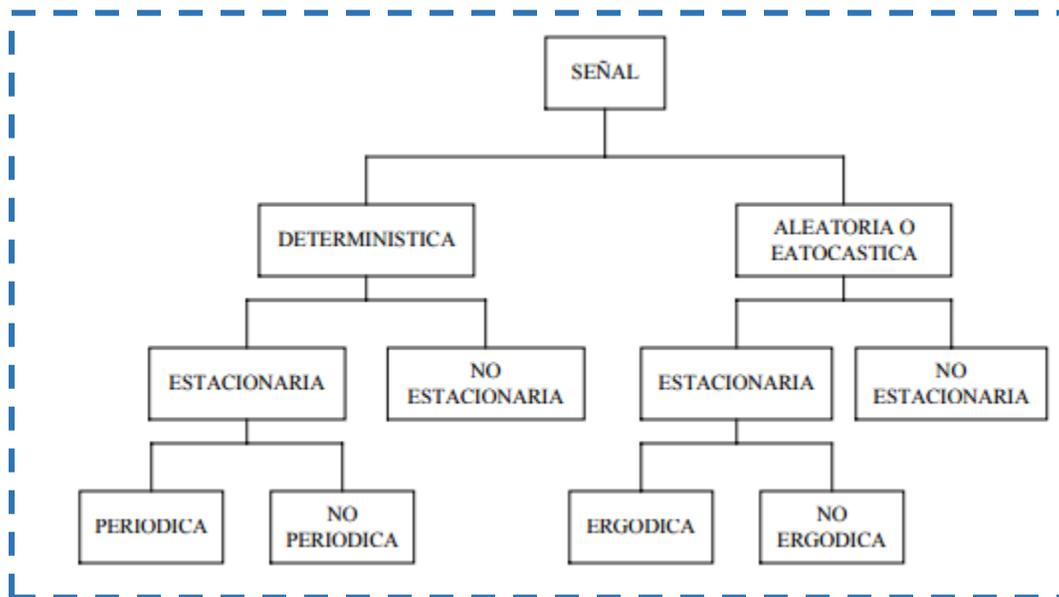


Ilustración 14 Clasificación de las señales

Se sabe que una puerta de refrigerador puede ser manipulada de N formas, en condiciones reales todas ellas dependerán en 100% del usuario ya que no todas las personas poseen las mismas características físicas, tales como estatura, peso, fuerza, etc. Variables que influyen de forma directa en la interacción del usuario con el sistema. Cuando una persona abre y cierra la puerta aplica una fuerza que se transmite en forma de vibración a todos y cada uno de los elementos que la componen

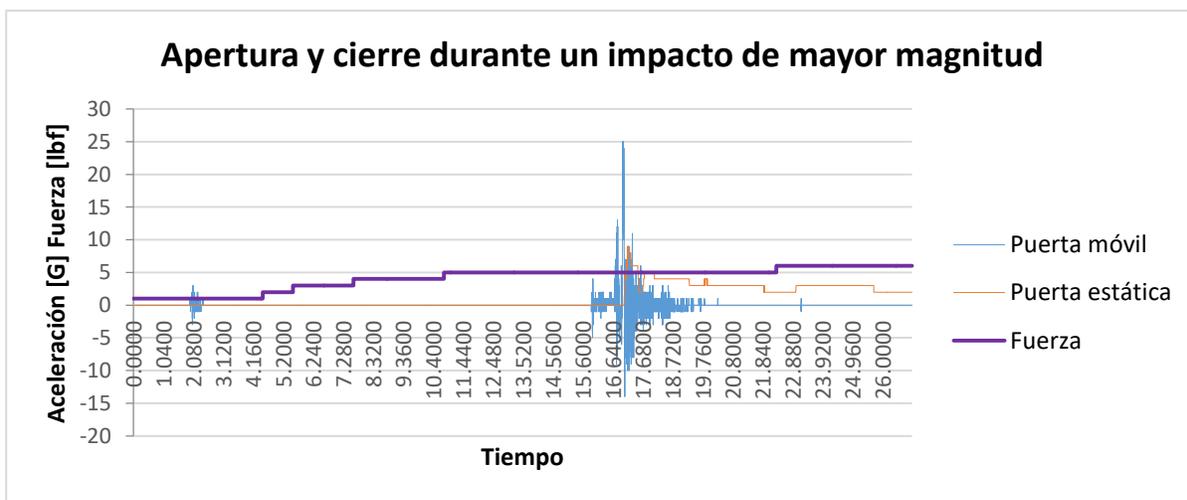


Ilustración 15 Gráfica de apertura y cierre de puerta de refrigerador. Señal adquirida con una tasa de muestreo de 625 datos por segundo (Usuario de 1.60 m y 65 Kg)

(incluso al gabinete), de esta forma la señal de aceleración generada por la puerta en movimiento y la generada por la puerta estática siempre tendrán la misma tendencia, sin embargo las magnitudes de vibración esperadas (G) para cada evento serán diferentes dependiendo del usuario lo que las clasifica como señales determinísticas de variable aleatoria.

Al intentar caracterizar el fenómeno físico, el análisis de estas señales se vuelve complejo ya que cada dato adquirido es un dato de magnitud variable lo que vuelve complejo el proceso. La teoría de procesamiento de señales dicta que se debe generar un modelo que describa un fenómeno físico por partes a través de ecuaciones matemáticas, es decir, identificando comportamientos parecidos y agrupándolos para su análisis.

Existe una forma de evitar el desarrollo de un modelo matemático complejo para ello hay una solución mecánica más sencilla que consiste en diseñar un sistema que permita controlar las variables que influyen en el comportamiento de la puerta, es decir, un sistema que desempeñe la tarea de abrir y cerrar las puertas con la misma velocidad, aceleración y fuerza de impacto. En las ilustraciones 15 y 16 se puede observar la diferencia en el comportamiento de la puerta cuando el ciclo de apertura y cierre lo realiza una persona y cuando es realizado por un sistema controlado.

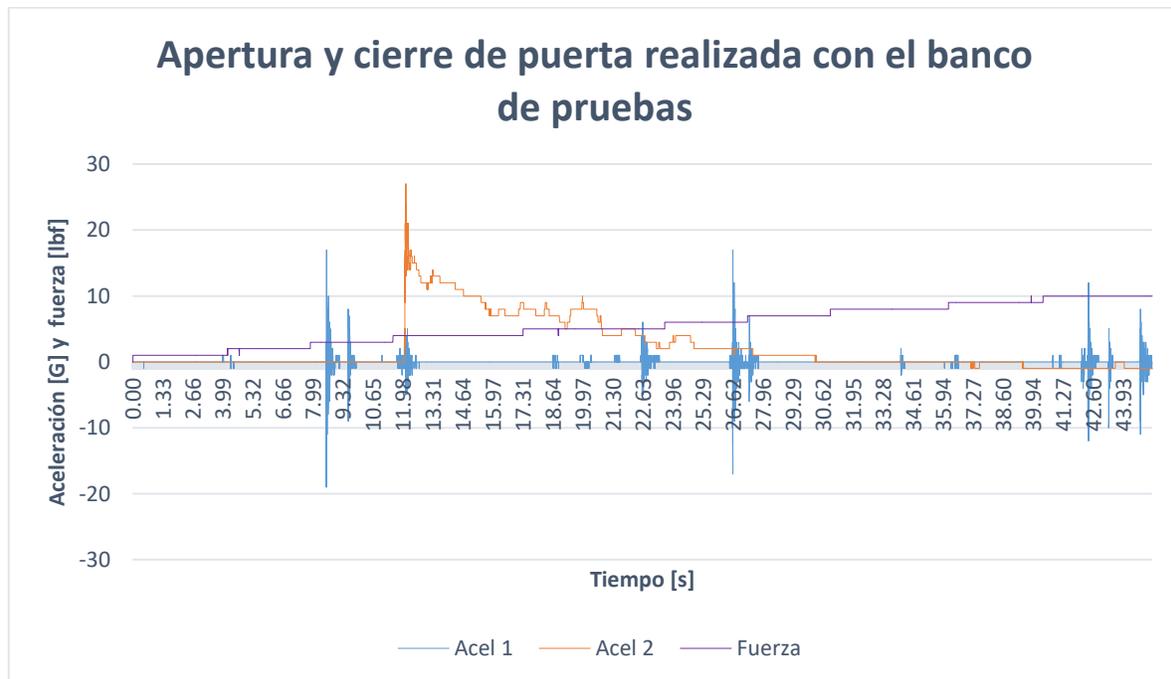


Ilustración 16 Gráfica de apertura y cierre de puerta de refrigerador. Señal adquirida con una tasa de muestreo de 625 datos por segundo (Señal generada con el banco de pruebas)

Es importante mencionar que ambas señales (ilustración 15 y 16) se obtuvieron con la misma tasa de muestreo y a ninguna de las dos se le aplicó ningún tipo de filtro. A diferencia de la señal de la puerta cuando la abre y cierra un usuario, en la señal que se adquirió con cuando la puerta la abre y cierra el banco de pruebas, se pueden apreciar vibraciones inherentes del sistema que con un filtrado correcto se pueden despreciar.

3.1 Análisis dinámico de los sistemas

El sistema que se analiza en esta investigación está compuesto de varios subsistemas que tienen funciones específicas, el conjunto de todas esas funciones hace posible que una persona pueda abrir y cerrar una puerta de refrigerador para acceder a los alimentos de forma sencilla. Mecánicamente este sistema representa un caso de estudio en el campo de las vibraciones.

Como ya se había establecido, la puerta del refrigerador es un sistema masa-resorte-amortiguador de segundo grado pues tiene un elemento inercial que es una masa representada por la puerta, ésta almacena energía cinética y relaciona su momentum angular con su velocidad. También se tiene un resorte que almacena energía potencial y relaciona la fuerza de torsión ejercida sobre la puerta y su desplazamiento. Un amortiguador no conservativo disipa la energía existente en el sistema y todos estos elementos a su vez son excitados por una fuerza que ocasiona la vibración del sistema, matemáticamente puede modelarse de la siguiente forma:

Modelado por Euler-Lagrange

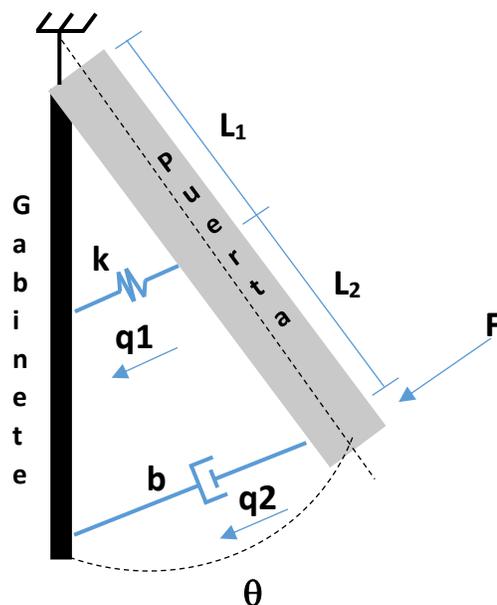
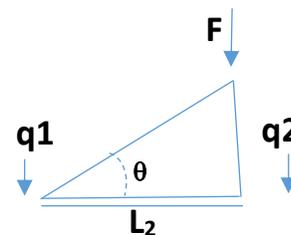


Ilustración 17 Diagrama del sistema masa-resorte-amortiguador aplicado a la puerta del refrigerador.

Sistema completo: $q_1 = F, q_2 = F_b, \theta$

A partir del comportamiento de las fuerza en el sistema se pueden establecer las restricciones que tiene.

Restricciones: $\tan \theta = \frac{q_1 - q_2}{L_2}$



Coordenadas generalizadas: q_1, θ



Ecuaciones constitutivas:

$$U^* = \frac{1}{2}mV_m^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

$$T = \frac{1}{2}k(q_1 - q_2)^2$$

$$J = \frac{1}{2}b(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)^2$$

$$V_m = q_1 - q_2$$

Sustituyendo:

$$U^* = \frac{1}{2}m(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2$$

$$L = \frac{1}{2}m(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 - \frac{1}{2}k(q_1 - q_2)^2$$

Realizando las derivadas:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1}\right) = M(\ddot{q}_1 - \ddot{q}_2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_1} = -k(q_1 - q_2)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \dot{q}_1} = b(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)$$

$$F = M(\ddot{q}_1 - \ddot{q}_2) + k(q_1 - q_2) + b(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) = I\ddot{\theta}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial \dot{\theta}} = 0$$

$$F_b = I\ddot{\theta}$$

El modelo matemático que representa al sistema físico permite identificar y modificar la influencia de los elementos dentro del comportamiento dinámico del mismo. Al analizarlo como un sistema masa resorte amortiguador se pueden detectar fácilmente los posibles modos de vibración en los que no se debe obviar que el efecto de amortiguación es sinónimo de la pérdida de la energía en sistemas vibratorios.

El uso de las vibraciones es un campo complejo pero que tiene múltiples aplicaciones, entre ellas se encuentra:

- Ensayos de vibración.
- Mantenimiento predictivo.
- Vibraciones en el cuerpo humano.
- Limpieza por ultrasonidos
- Vibraciones en edificios
- Modelos mecánicos.

El modelo generado permite analizar el comportamiento de cada uno de los componentes y observar la influencia que tienen en el sistema total (puerta) de tal forma que modificando los

parámetros de los elementos se pueda detectar el cambio en el comportamiento del mismo. Existe otro concepto importante que considerar para el estudio de este sistema en especial, y se llama **momentum angular**.

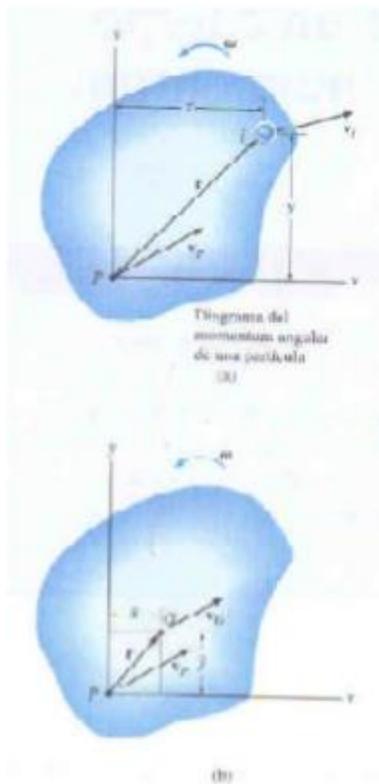
Considerando la puerta como un cuerpo rígido se sabe que el fenómeno físico que se analiza en esta investigación se basa en un movimiento rotatorio que describe alrededor del eje de rotación de las bisagras por lo que se debe aplicar el concepto de impulso y momentum angular y se explica de la siguiente forma.

Se tiene un cuerpo sometido a un movimiento plano general como se muestra en la ilustración 18a. En el instante que se muestra, el punto arbitrario **P** tiene la velocidad **V_p** y el cuerpo tiene velocidad angular **ω**. Si la velocidad de la partícula *i*-ésima del cuerpo debe ser

determinada como se muestra en la ilustración 18b, entonces:

$$V_f = V_p + V_{i/p} = V_p + \omega \times r$$

Ilustración 18 Diagrama de momentum angular de una partícula (Mecánica para ingenieros, Dinámica. R.C. Hibbeler)





El momentum angular de la partícula i con respecto al punto P es igual al “momento” del momentum lineal de la partícula con respecto al punto P . Así:

$$(\mathbf{H}_P)_i = \mathbf{r} \times m_i \mathbf{v}_i$$

Expresando V_i en términos de V_P y usando vectores cartesianos se obtiene:

$$(\mathbf{H}_P)_i \mathbf{k} = m_i(x_i \mathbf{i} + y_i \mathbf{j}) \times [(V_P)_x \mathbf{i} + (v_P)_y \mathbf{j} + \omega \mathbf{k} \times (x_i \mathbf{i} + y_i \mathbf{j})]$$

$$(\mathbf{H}_P)_i = -m_i y_i (v_P)_x + m_i x_i (v_P)_y + m_i \omega r_i^2$$

Haciendo que m_i tienda a $d\mathbf{m}$ e integrando sobre toda la masa del cuerpo, se obtiene:

$$\mathbf{H}_P = -\left(\int_m y \, d\mathbf{m}\right)(v_P)_x + \left(\int_m x \, d\mathbf{m}\right)(v_P)_y + \left(\int_m r^2 \, d\mathbf{m}\right)\omega$$

Aquí \mathbf{H}_P representa el momentum angular del cuerpo con respecto al eje Z que es el eje perpendicular al plano del movimiento y pasa por el punto P . Como $\bar{y}m = \int y \, d\mathbf{m}$ y $\bar{x}m = \int x \, d\mathbf{m}$, las integrales de los términos se usan para ubicar el centro de masa G del cuerpo con respecto a P . además, la última integral representa el momento de inercia del cuerpo calculado con respecto al eje Z , esto es $I_P = \int r^2 \, d\mathbf{m}$. Entonces:

$$\mathbf{H}_P = \bar{y}m(v_P)_x + \bar{x}m(v_P)_y + I_P \omega$$

Esta ecuación se reduce a una forma más simple si el punto P coincide con el centro de masa G del cuerpo en cuyo caso $\bar{x} = \bar{y} = 0$. Por consiguiente,

$$\mathbf{H}_G = I_G \omega$$

Esta ecuación establece que el momentum angular del cuerpo calculado con respecto a G es igual al producto del momento de inercia del cuerpo con respecto a un eje que pasa por G y la velocidad angular del cuerpo. Sin embargo, para analizar el fenómeno planteado en este trabajo de investigación es necesario relacionar el concepto de movimiento sumado al momentum lineal de tal forma que, si el cuerpo tiene un movimiento plano general, se puede escribir:

$$\sum \mathbf{M}_G = I_G \alpha = I_G \left(\frac{d\omega}{dt}\right)$$

Como el momento de inercia es constante, la ecuación podría simplificarse de la siguiente forma:

$$\sum \mathbf{M}_G = \frac{d}{dt} I_G \omega \dots \dots \dots (1)$$



Multiplicando ambos lados por dt e integrando a partir de $t=t_1, \omega=\omega_1$ a de $t=t_2, \omega=\omega_2$, se obtiene:

$$\int_{t_1}^{t_2} M_G dt = I_G \omega_2 - I_G \omega_1 \dots\dots(2)$$

De manera similar, para rotación alrededor de un eje fijo que pase por el punto O , cuando se integra la ecuación anterior resulta:

$$\sum \int_{t_1}^{t_2} M_O dt = I_O \omega_2 - I_O \omega_1 \dots\dots(3)$$

Las ecuaciones 2 y 3 son llamadas principio del impulso y momentum angular. Ambas establecen que la suma de los impulsos angulares que actúan sobre el cuerpo durante el intervalo de tiempo t_1 a t_2 es igual al cambio en el momentum angular del cuerpo durante el mismo intervalo. En particular, el impulso angular se determina integrando los momentos con respecto al punto G u O de todas las fuerzas externas y momentos de par aplicados al cuerpo. (Hibbeler, 2006)

3.2 Detección de variables mecánicas de forma experimental

Con respecto a las ecuaciones desarrolladas en el apartado anterior, se puede deducir que existen variables que influyen en el comportamiento del sistema, sin embargo, por la naturaleza y geometría del mismo es complicado obtenerlas de forma analítica, para ello se diseñaron algunos experimentos que ayudan a obtener el valor de la variable buscada de forma sencilla. Estos experimentos se describen a continuación.

3.2.1 Detección experimental del centro de gravedad

El centro de gravedad o centroide es el punto en el que se considera que actúa la fuerza de gravedad, en un cuerpo regular el centro de gravedad, si se encuentra en el mismo campo gravitatorio éste coincide con el centro de masa que es el punto en donde se concentra la masa de un cuerpo siempre y cuando se trate el sistema como un cuerpo rígido, como es el caso de estudio. (Forner Gumbau, 2006)

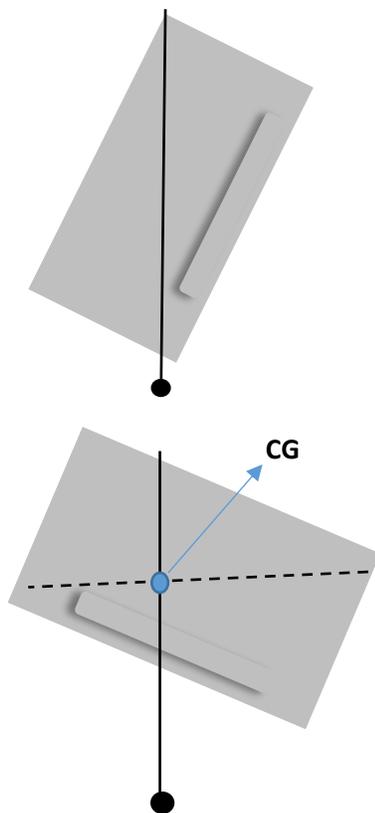


Ilustración 19 Diagrama de detección experimental del CG

Para esta investigación es importante identificar el centro de gravedad ya que es el punto sobre el que se colocarán los sensores posteriormente. Para ello se deben seguir los siguientes pasos:

1.- **Montaje del sistema:** El modelo de refrigerador que se está analizando consta de dos puertas iguales que resguardan los alimentos, por tal motivo es suficiente si se obtiene el centro de gravedad de una puerta. Para comenzar se debe desmontar la puerta del gabinete cuidando de no dañar sus piezas.

2.- **Sujeción de la plomada:** El siguiente paso consiste en colgar la puerta de cualquiera de sus vértices o aristas, se puede observar que la línea de acción del arnés o la cuerda que la sujeta es paralela al eje de acción de la fuerza de gravedad, sobre este mismo eje se debe colocar la plomada.

Cuando se haya colocado la plomada se debe esperar a que ésta se estabilice de tal forma que el hilo que sujeta la plomada se refleje sobre la superficie de la puerta. Entonces con un marcador se repetirá

la línea de acción de la plomada sobre la puerta.

3.- **Identificación del CG:** Para identificar de forma correcta el centro de gravedad, se debe repetir el paso 2 al menos dos veces más pero colgando la puerta de diferentes puntos con el objetivo de generar diferentes líneas de acción (siempre paralelas al eje de acción de la fuerza de gravedad). El punto en que se intersectan todas estas líneas es la ubicación del centro de gravedad.

Llevando a cabo los pasos mencionados anteriormente se puede obtener una buena aproximación de la ubicación del centro de gravedad. Existen muchos factores que hacen que las coordenadas no sean exactas sin embargo el error que puede existir es siempre el mismo para todas las mediciones. Considerando que el sistema de referencias se encuentra en la esquina inferior izquierda de la puerta, las coordenadas son:



Ilustración 20 Aplicación del protocolo para la identificación del CG en la puerta del refrigerador.

Tabla 1 Coordenadas del Centro de gravedad de la puerta del refrigerador

Eje de referencia	Longitud
x	22.50 [cm]
y	48.00 [cm]

3.3 ¿Qué es la transformada de Fourier y como se aplica?

De forma general la transformada de Fourier es una serie de ecuaciones matemáticas que permiten transformar señales que se encuentran en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, la transformación es reversible por lo que tiene la bondad de pasar de un dominio a otro dependiendo del análisis que se quiera realizar a la función.

La transformada de Fourier debe su nombre a Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) quien fue un matemático y físico francés conocido por sus trabajos sobre la descomposición de funciones periódicas en series trigonométricas convergentes llamadas Series de Fourier.



Ilustración 21 Retrato de Jean Baptiste Joseph Fourier creador de la transformada de Fourier

La serie de Fourier tiene una característica importante y esta es que puede expresar cualquier señal periódica en función del contenido de frecuencia dado por las componentes sinusoidales, sin embargo, ¿se podrá expresar una señal no periódica como una vibración mecánica en términos de su contenido frecuencial? La respuesta es sí, y la forma de expresarla es la transformada de Fourier.

En una señal no periódica las componentes de frecuencia están definidas para todos los valores de la variable ω , en otras palabras el espectro de una señal no periódica no es el espectro de línea. Entonces, dada una señal $x(t)$, la transformada de Fourier $X(\omega)$ de $x(t)$ está definida de la siguiente forma:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \quad -\infty < \omega < \infty \quad \dots (1)$$

Donde ω es la variable continua de la frecuencia. Se puede observar que en la ecuación 1 debido a la presencia de la exponencial compleja $e^{-j\omega t}$ los valores de $X(\omega)$ pueden ser complejos por lo que de forma general la transformada de Fourier $X(\omega)$ es una función valuada en complejos por lo que para especificarla de forma correcta, ésta se debe expresar en función de su amplitud y su fase. El espectro de amplitud de una señal $x(t)$ está definido para que sea la función de magnitud $|X(\omega)|$ de la transformada de Fourier $X(\omega)$, y el espectro de fase de $x(t)$ está definido para que sea la función ángulo $\angle X(\omega)$.

Finalmente se dice que una señal $x(t)$ tiene transformada de Fourier si la integral (ecuación 1) converge, es decir, existe y esta convergerá si $x(t)$ es completamente integrable, de forma matemática esto significa que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)| dt < \infty \dots\dots (2)$$

Se dice que una señal tiene buen comportamiento si tiene un número finito de discontinuidades, dentro de un intervalo finito de tiempo por lo que es importante mencionar que todas las señales reales se comportan bien y satisfacen la ecuación 2. (Kamen, 2008)

Como ya se mencionó la transformada de Fourier permite determinar el contenido espectral de una señal, esto es descomponer la señal en sus diversas componentes del dominio frecuencial. Sin embargo, cuando se tiene una señal determinística de variable aleatoria como es el caso de una vibración mecánica es complicado obtener su espectro de forma analítica y más si se trata de encontrar una señal que está contaminada por otras señales o por ruido.

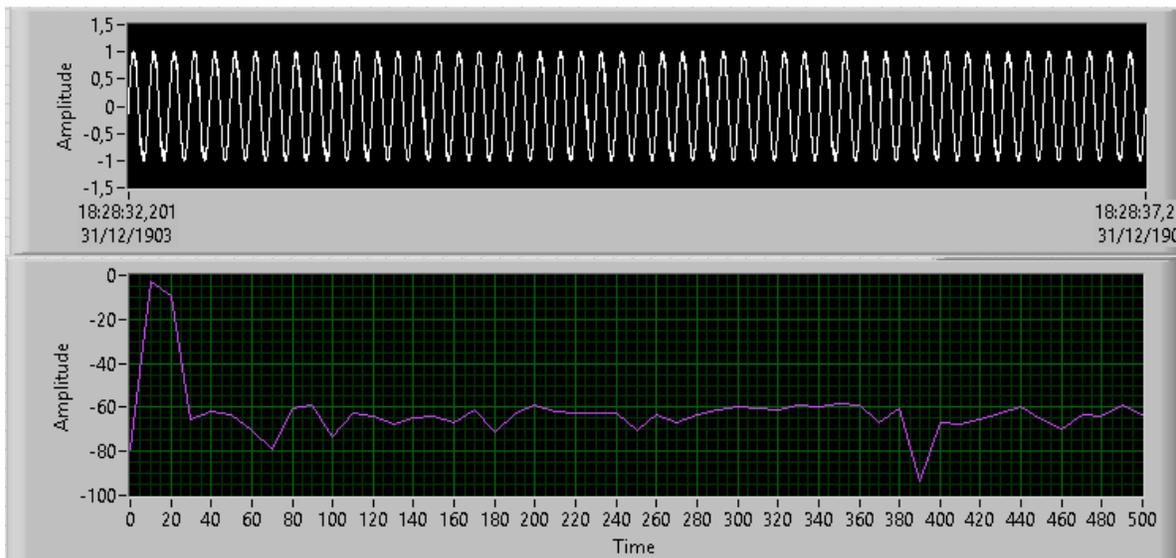


Ilustración 22 Ejemplo del espectro de frecuencia de una señal senoidal simple (Interfaz desarrollada en NI LabView, 2014)

En la ilustración 22a se muestra un ejemplo de una señal senoidal a una frecuencia de 10 [Hz] y amplitud unitaria y en la ilustración 22b se puede observar su espectro de frecuencia, en el que se puede ver una componente en 10 [Hz] ya que es la frecuencia en la que está trabajando la senoidal. En este caso es muy sencillo descomponer una señal en su espectro de frecuencia pues no está trabajando en conjunto con ninguna otra y mucho menos describe un fenómeno real, sin embargo, con una señal de vibración el espectro de frecuencia se vuelve mucho más complejo y no sólo por la matemática empleada para obtenerlo si no por la interpretación del mismo ya que se mezclan los comportamientos de múltiples elementos. En la ilustración 23 se muestra el espectro de frecuencia de la señal de aceleración adquirida mientras la puerta móvil se abre y cierra.

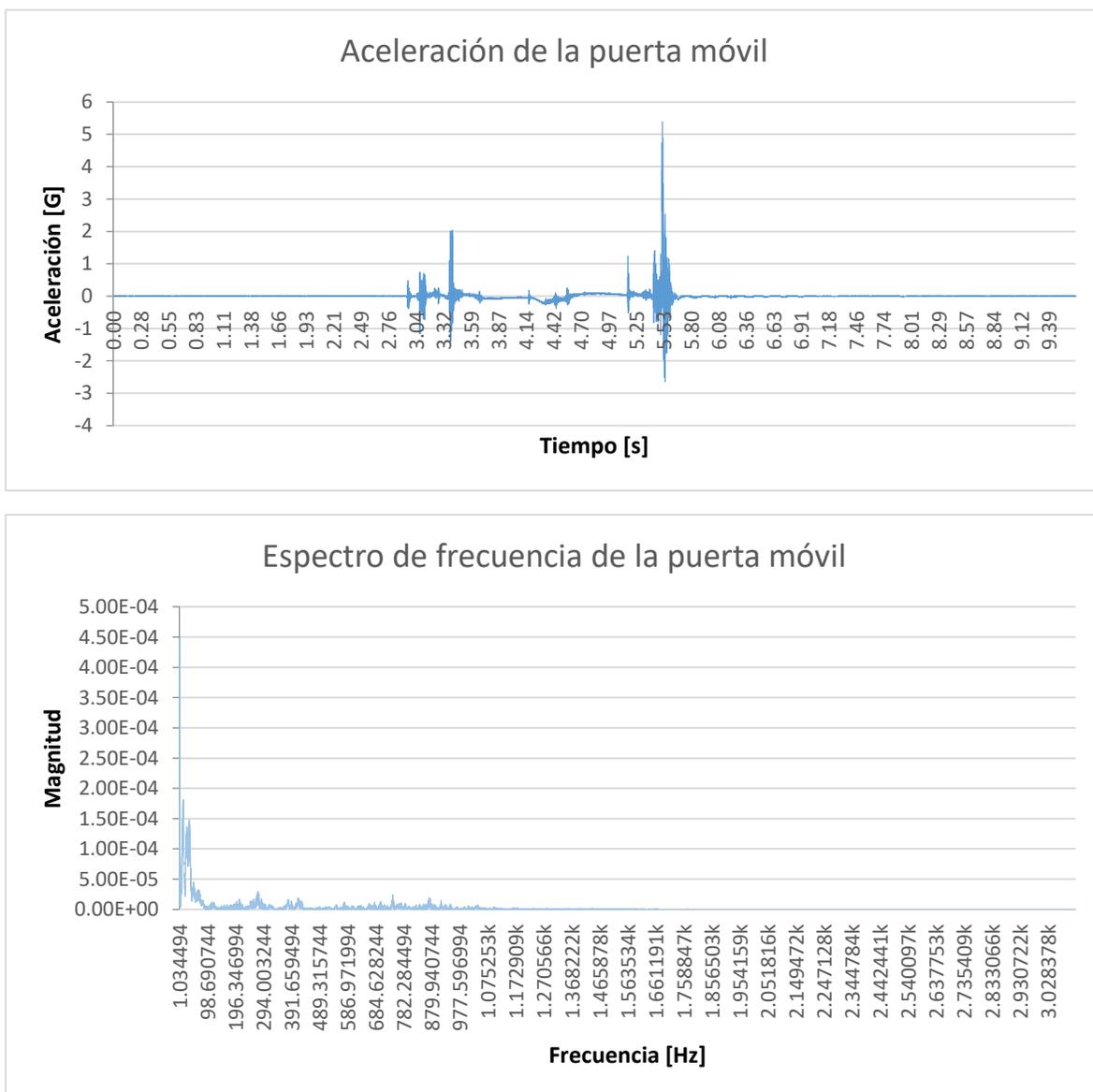


Ilustración 23 Graficas de una señal de aceleración de puerta móvil del refrigerador (usuario de 1.60 [m] y 65 [Kg])



La primera gráfica muestra la señal de aceleración obtenida sin aplicar ningún filtro por lo que el espectro de frecuencia considera las componentes frecuenciales inducidas por el comportamiento de la estructura, así como todos los elementos de la puerta. Es importante mencionar que la componente en 0[Hz] que es de mayor magnitud que el resto de las componentes corresponde a la señal de aceleración igual a 0[G] lo que significa que no hay muestras significativas en los tiempos muertos. Aunque los demás componentes vibran a bajas frecuencias tienen magnitudes significativas en el fenómeno.

Si bien es cierto que una vibración mecánica es una señal continua, cuando se adquiere por medio de un sistema de cómputo es forzoso tener que discretizarla, entonces la transformada de Fourier continua ya no se aplica para su análisis, en su lugar se debe analizar la señal con la transformada de Fourier en tiempo discreto.

Dada una señal de tiempo discreto $x[n]$ donde n es el número de muestras, la transformada de Fourier de tiempo discreto DFTF de $x[n]$ se define como:

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\Omega n} \dots\dots\dots(3)$$

La DFTF $X(\Omega)$ es, en general una función valuada en complejos de la variable real Ω (variable de frecuencia). La DFTF es una contraparte natural de la ecuación 2 pues ahora la integral se reemplaza por una sumatoria. La omega mayúscula (Ω) se utiliza para que la variable de frecuencia se distinga entre un caso de tiempo continuo y un caso de tiempo discreto.

Matemáticamente se dice que una señal en tiempo discreto $x[n]$ tiene un DFTF en el sentido ordinario, si la sumatoria (ecuación 3) converge, es decir, si es finita para todos los valores de Ω . Esta condición se expresa de la forma:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]| < \infty \dots\dots\dots(4)$$

Si $x[n]$ es una señal de tiempo discreto limitada en el tiempo, es decir, existe un entero positivo N , tal que $x[n]=0$ para toda $n \leq -N$ y $n \geq N$, entonces la suma es finita y tiene una DFTF. (Kamen, 2008)

En los siguientes capítulos se ejemplificará la utilización de la transformada de Fourier aplicando el concepto a las señales de vibración de las puertas de refrigeradores.

CAPÍTULO 4. ENTENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS

Así como en capítulos anteriores se habló de la importancia de considerar todas las variables que influyen en el comportamiento del sistema, es importante saber cómo se comportan los elementos que producen estas variables. El sistema que se analiza en esta investigación se compone de elementos sencillos pero que son muy complejos de estudiar por lo que se agrupan dependiendo de la función principal que desempeñan, existen los elementos de sujeción, de amortiguamiento y de soporte. Si observamos el comportamiento de las puertas de un automóvil y las puertas de un refrigerador se puede asegurar que a pesar de ser sistemas completamente diferentes realizan la misma función (evitar el intercambio entre el interior y el exterior) por lo que ambos tienen los mismos elementos, la diferencia radica en el ambiente en que se desempeñan y ésta es la razón principal que provoca el rediseño y adecuaciones a sus elementos.

En esta investigación se consideró el refrigerador como objeto de estudio, partiendo de la idea de que es un electrodoméstico muy común y mayormente utilizado en la vida cotidiana ya que sin éste es muy difícil conservar y mantener en buen estado los alimentos. Uno de los subsistemas más importantes para asegurar el funcionamiento del ciclo de refrigeración son las puertas, si éstas no cumplen con su función se traduce como incumplimiento de las normas.

A lo largo del tiempo se han rediseñado los elementos de una puerta de refrigerador un sin número de veces para asegurar que ésta cerrará de la forma correcta, sin embargo, a pesar del exhausto trabajo de ingenieros y diseñadores involucrados en el proceso, siguen existiendo problemas con la forma de cerrar de la puerta.

A continuación se explica a detalle el comportamiento de los elementos que forman una puerta de refrigerador para conocer cuáles son sus funciones principales y para entender por qué en ocasiones se requiere de aplicar mayor fuerza para abrir el refrigerador que para cerrarlo, evidentemente este



Ilustración 24 Refrigerador de prueba montado sobre un prototipo de banco de pruebas.

parámetro depende en su totalidad del diseño del sistema y el mecanismo implementado para mantener la puerta herméticamente cerrada.

4.1 Elementos que componen el sistema

Un refrigerador está compuesto de una gran cantidad de elementos, desde tornillos y tuercas hasta un sistema de refrigeración que, si bien es cierto no ha sido modificado termodinámicamente desde su creación, si se han implementado mejoras para hacerlo más eficiente. Todos estos elementos tienen funciones particulares que contribuyen al comportamiento correcto del refrigerador.



Ilustración 25 Refrigerador 33" configuración "French door" (GE, GNS23GMHES)

El refrigerador que se utilizó durante esta investigación para probar el protocolo y demostrar la hipótesis propuesta, es un refrigerador modelo GNS23GMHES de 33 pulgadas de ancho y configuración "french door" lo cual significa que tiene el congelador en la parte inferior (ilustración 25). Es importante mencionar que la puerta del cajón del congelador no se considera parte de esta investigación, pero sí lo son ambas puertas que cubren el gabinete del refrigerador.

Una variable importante que se debe considerar para el análisis de las puertas del refrigerador es sin dudarle el peso, lo que conlleva a saber la carga máxima que pueden soportar, este dato por lo general es proporcionado por la empresa ya que se debe cumplir con las especificaciones de diseño. De forma experimental se identificó el peso de las puertas, así como la carga que es capaz de soportar según el diseño.

Tabla 2 Cargas que debe soportar la puerta durante las pruebas de apertura y cierre (MABE)

Peso de la puerta	8.00Kg
Carga total que soporta	17.92 Kg
Carga al 70%	12.50 Kg
Carga al 20%	3.58 Kg

De forma analítica se considera a la puerta como un sistema MRA (masa-resorte-amortiguador) en el que la puerta es una masa que tiene un momento de inercia, velocidad y aceleración amortiguada por un sello de goma, en ocasiones de neopreno, que se comporta como un resorte que almacena la energía y la devuelve al sistema durante el impacto, originalmente debería disipar la energía para evitar daños secundarios como deformaciones en el marco del gabinete y una precarga (resorte) en las bisagras para ayudar a que la puerta se mantenga cerrada.

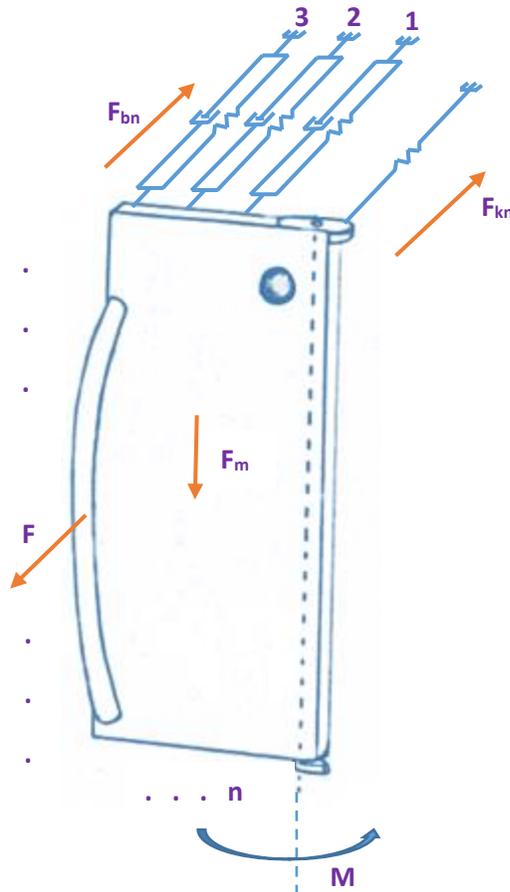


Ilustración 26 Diagrama de cuerpo libre de una puerta del refrigerador de estudio

En la ilustración 26 se representa el sistema MRA en el que el sello de goma de la puerta se modela como un conjunto de n resortes y amortiguadores trabajando en paralelo alrededor de la puerta para disipar la fuerza del impacto. A una distancia d del centro de giro se ubica un resorte que representa la precarga en la bisagra, este resorte produce una reacción F_k cada vez que a la puerta se le aplica una fuerza F para conseguir separarla del sello hermético. El conjunto de fuerzas que



interactúan en el sistema permiten que se realice la trayectoria de apertura y cierre además de que la fuerza F genera un momento alrededor del eje de giro de la bisagra.

Para el análisis de este sistema se desprecian las cargas laterales que influyen en su comportamiento ya que son de magnitudes insignificantes comparadas con la fuerza que se aplica al abrir y cerrar la puerta. Un punto importante que queda por mencionar es que todas las puertas de los refrigeradores cuentan con un sistema de cierre hermético que evita el intercambio del aire frío con el medio ambiente. Generalmente el cierre hermético está compuesto de un imán con las mismas dimensiones que la longitud vertical de la puerta para mantener ambas puertas unidas entre sí, este sistema cuenta con un perno que se desliza por un canal que guía, así como algunos tornillos que mantienen alineadas las puertas.

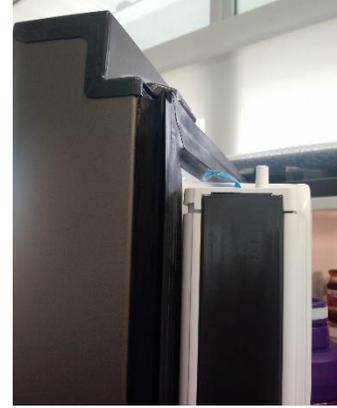


Ilustración 27 Fotografía del sello hermético de una puerta (objeto de estudio)

4.1.1 Elementos de sujeción

Las puertas de un refrigerador están compuestas de diferentes elementos que aseguran su función, el principal de sus elementos son las bisagras pues son el elemento que permite que la puerta tenga movilidad, es decir, se pueda abrir y cerrar. Otra función de las bisagras es colocar la puerta en su posición correcta lo cual se vuelve complicado a medida que se incrementa el peso en la puerta (debido a los alimentos) ya que la superficie sobre la que se sujeta la bisagra pierde rigidez conforme pasa el tiempo (problema originado por la degradación de la espuma de poliuretano).

Observando el comportamiento de la puerta durante el ciclo de apertura y cierre se puede identificar que la bisagra superior forma parte del sistema de sujeción de la puerta junto con cada uno de sus tornillos. Se puede asegurar esto último debido a que en la superficie sobre la que se fija la bisagra superior es el punto en el que se genera mayor esfuerzo, esfuerzo que es proporcional a la carga que se le coloca a la puerta.



Ilustración 28 Bisagra superior de refrigerador GNS23GMHES

En la ilustración 28 se puede observar que la bisagra superior se compone de 7 elementos de los cuales tres son piezas de acero y forman la bisagra, un eje que se comporta como fuelle para el brazo de palanca, dos tornillos que sujetan la bisagra al gabinete y un resorte que actúa como precarga para que el brazo de palanca guíe la puerta durante su recorrido.

Si bien es cierto que en un principio las bisagras fueron creadas para brindar la movilidad a las puertas, con el paso del tiempo su diseño se ha vuelto más complejo al integrar más funciones. En el caso de la bisagra del refrigerador, específicamente la superior, se observa que su funcionamiento obedece al principio del brazo de palanca que analizado de forma matemática se comporta como un convertidor de energía.

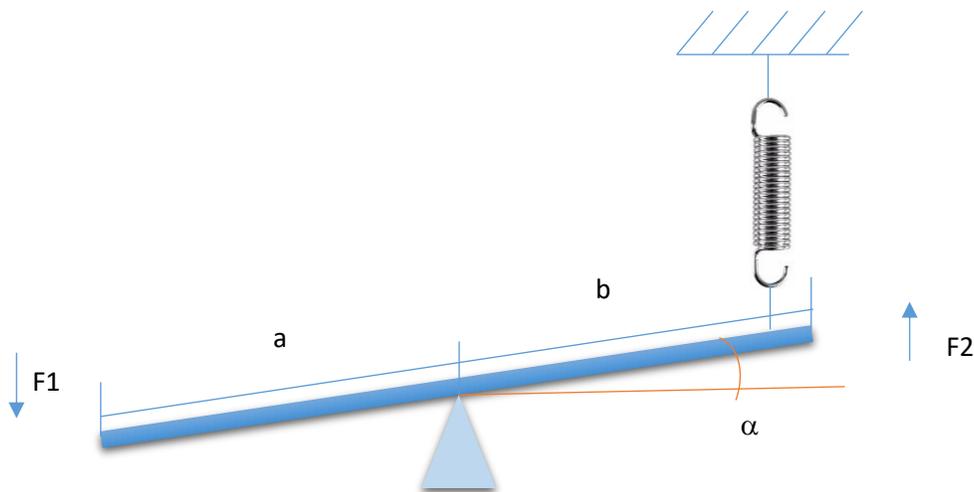


Ilustración 29 Diagrama de cuerpo libre de la bisagra superior

Para entender el comportamiento de la bisagra superior se deben establecer ecuaciones de equilibrio:

$$\sum M_0 = 0 ;$$
$$F_1 * a * \cos\alpha = -F_2 * b * \cos\alpha; \quad F_1 * a = -F_2 * b; \quad \boxed{F_2 = \frac{a}{b} F_1}$$

Concluyendo se puede afirmar que la fuerza dos (F_2) que corresponde a la precarga debe ser mayor a la fuerza que aplica una persona al abrir la puerta (F_1) para mantenerla en su posición correcta y mantenerla cerrada. Al ser F_2 mayor que F_1 se explica por qué se requiere mayor fuerza para abrir que para cerrar.

4.1.2 Elementos de amortiguación



Ilustración 30 Imagen representativa del sello de goma de un refrigerador (obtenida del sitio soluciones prácticas para tu hogar)

La palabra amortiguar significa disipar el efecto de una fuerza, si se aplica este concepto al comportamiento de un refrigerador se puede identificar un grupo de elementos que tienen como tarea principal reducir la fuerza de impacto cada que la puerta se cierra de tal forma que evite deformaciones en el gabinete que se traduzcan en transferencia de calor entre el interior y el exterior del gabinete.

El principal elemento de amortiguación en un refrigerador es el sello de neopreno o goma¹¹ que se encuentra alrededor de la puerta y del lado interior de la misma, así como en el marco del gabinete. Este sello cumple con dos funciones importantes, reducir el impacto y sellar de forma hermética.

Para reducir la fuerza de impacto el sello de goma se ayuda de su geometría para disipar la energía que le imprime la puerta al impactar sobre el mismo, en la ilustración 31 se puede observar la sección transversal del sello de goma. La geometría le permite comportarse como una pequeña cámara de aire que reduce el impacto en el instante en que la puerta toca el gabinete, posteriormente y hasta que la puerta llega a su posición final el aire contenido comienza a escapar lentamente y permanece comprimido hasta que la puerta se vuelva a abrir. Si bien es cierto que el reducir la fuerza de impacto es un parámetro importante para prevenir deformaciones en el gabinete, no es la función más importante que desempeña este elemento.

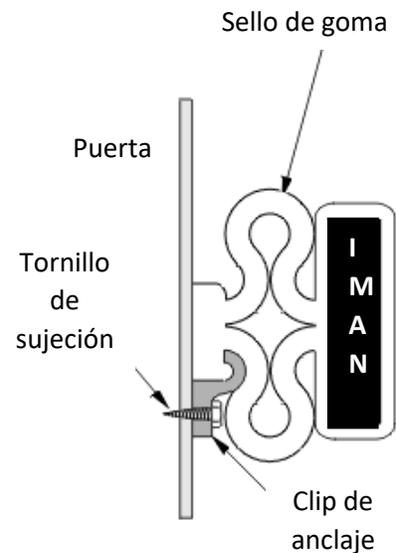


Ilustración 31 Sección transversal del sello de goma

Al ser una máquina térmica, el refrigerador extrae calor de un cuerpo a cierta temperatura para cederlo a otro que se encuentra a una temperatura superior y esto lo logra con una serie de transformaciones termodinámicas, pero ¿qué pasa si la puerta no cierra bien?, la respuesta a este

¹¹ La goma pertenece al grupo de los elastómeros que tienen la propiedad mecánica de devolver la energía almacenada durante un impacto.

problema parece obvia, pero durante mucho tiempo se ha tratado de corregir este problema con complejos sistemas de cierre hermético sin conseguir una solución adecuada.

En los refrigeradores “french door” que existen actualmente, el cierre hermético se logra insertando un imán dentro del sello de goma o caucho en algunos modelos (ilustración 31), que hace contacto con un poste abatible colocado a lo largo de una de las puertas, al hacer contacto con el gabinete, este poste se desliza por una guía que lo obliga a colocarse de forma horizontal (paralelo a las puertas) de tal forma que pueda mantener ambas puertas cerradas. En la ilustración 32 se muestra el poste y el imán que se encuentran en el refrigerador, así como la guía sobre la que desliza el poste abatible.



Ilustración 32 Sello hermético, imán y guía.

Como se puede ver en la ilustración 32 el poste abatible es un imán de aproximadamente 5 cm de ancho y del largo de la puerta que se desliza por el pequeño riel curvo para cambiar su posición y hacer contacto con la segunda puerta, esto sin importar el orden de apertura de las puertas. Sin embargo, cuando un usuario cierra la puerta con una fuerza mayor incrementa también la velocidad y el poste no tiene tiempo de posicionarse y deslizarse por la guía.

Cabe destacar que el diseño de un refrigerador es una labor de ingeniería muy compleja pues además de satisfacer las necesidades de los usuarios mediante el correcto funcionamiento del sistema de refrigeración, también se debe asegurar una prolongada vida útil del sistema, para ello con el paso del tiempo se van colocando pequeños elementos adicionales que corrigen los comportamientos que no se consideran en la etapa inicial de diseño. En las puertas de los refrigeradores la mayor parte de los elementos se colocan para guiar la puerta y cierre de forma correcta y para evitar fuertes impactos. En la siguiente ilustración se muestran dos de los elementos más visibles en el sistema.

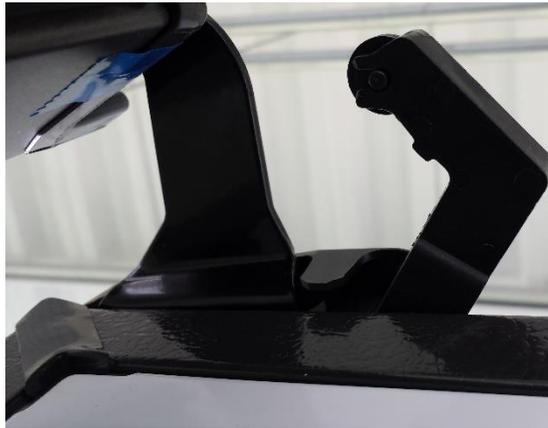


Ilustración 33 Pequeño rodillo colocado para guiar la puerta a un cierre correcto.

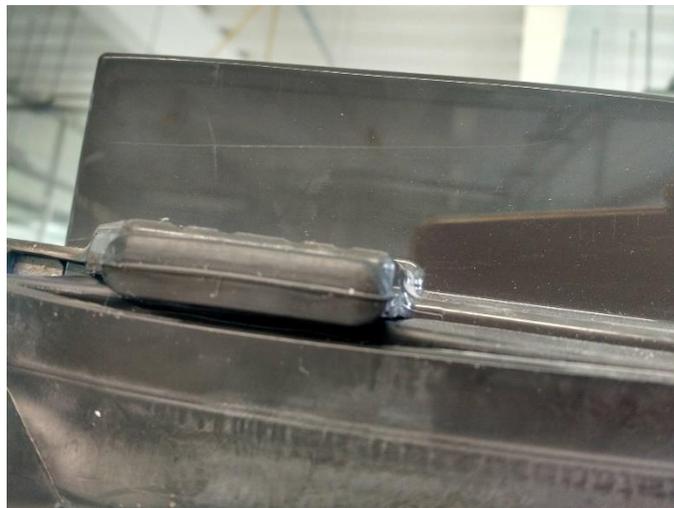


Ilustración 34 Reductor de impacto colocado en la esquina superior externa de la puerta

4.1.3 Elementos de soporte

El tercer sistema en las puertas del refrigerador está formado por los elementos de soporte, la función de estos elementos es mantener el resto de los componentes en el lugar correcto. Entre estos elementos se encuentran la bisagra inferior y la espuma de poliuretano.



Ilustración 35 Bisagra inferior del refrigerador de estudio

Al igual que la bisagra superior, la bisagra inferior está manufacturada de acero de 5 mm de espesor, generalmente es una pieza de geometría sencilla. Analíticamente la bisagra debe ofrecer una fuerza mayor a la carga total que soporta la puerta más el

peso de la misma. Trabajando en conjunto con la bisagra superior, consiguen mantener la puerta en su posición correcta, la ilustración 35 muestra una fotografía de la bisagra inferior del refrigerador que se utilizó como objeto de estudio.

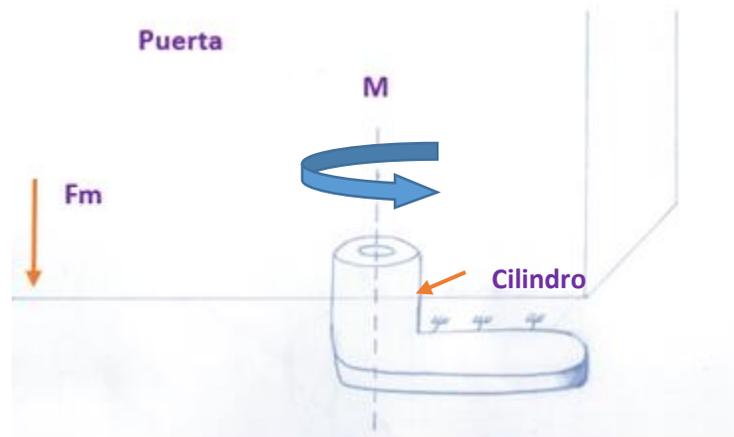


Ilustración 36 Fuerzas que influyen en la bisagra inferior

La ilustración 36 muestra las diferentes fuerzas que afectan el comportamiento de la bisagra inferior, si bien es cierto que su diseño se pensó para soportar la carga generada por la puerta del refrigerador, en ocasiones los usuarios rebasan el límite de capacidad establecido por lo que la fuerza F_m genera un momento que puede fracturar el cilindro que sujeta la puerta.

Existe otro elemento que brinda soporte al refrigerador y compone un gabinete en más del 80% de su totalidad, la espuma de poliuretano como se conoce comúnmente es un compuesto de polioles con catalizadores, ignifugantes, expandentes y agentes estabilizadores de la espuma. Este elemento rellena todas y cada una de las paredes del refrigerador, así como los volúmenes que se generan entre las cavidades de los accesorios en las puertas.

La espuma de poliuretano brinda rigidez al gabinete ya que, de no tener espuma, un gabinete simplemente no tendría forma, cabe mencionar que además de la rigidez que le proporciona al sistema, se utiliza espuma de poliuretano por la alta capacidad de aislamiento térmico, esta característica se debe a la muy baja conductividad térmica que posee el gas espumante atrapado en el interior de las celdas cerradas. (UNE-EN 12667:2002)

Para asegurar el correcto funcionamiento de la espuma, se debe seleccionar la densidad adecuada de la misma, en la ilustración 37 se muestran las gráficas de caracterización de la espuma, obtenidas de ensayos de tracción y compresión en función de la densidad, lo que indica que a mayor densidad tienen mayor rigidez. (UNE 92-120)

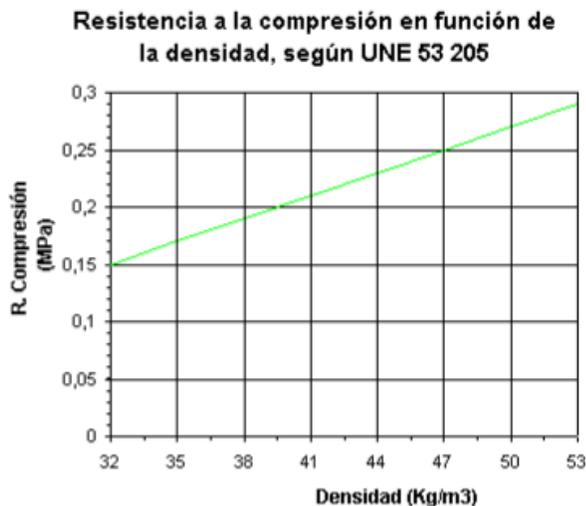


Ilustración 37a Gráfica de la espuma de poliuretano sometida a un ensayo de compresión.

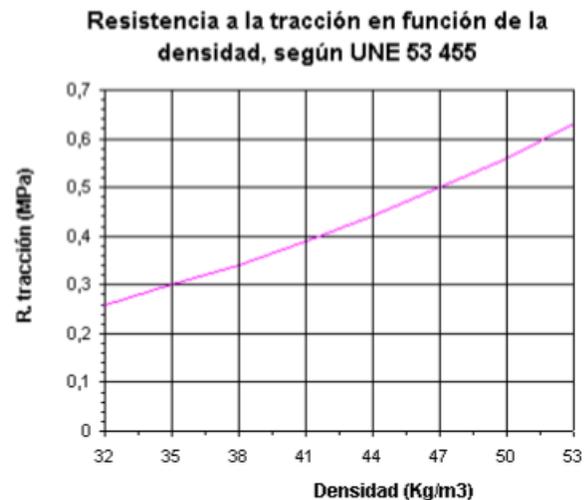


Ilustración 37b Gráfica de la espuma de poliuretano sometida a un ensayo de tracción

En la ilustración 37a se observa la curva que describe la espuma de poliuretano en un ensayo a compresión, lo cual denota que el incremento de la densidad es proporcional a la presión que puede resistir. En la ilustración 37b se puede ver de igual forma la curva que describe la espuma de poliuretano cuando se somete a un ensayo de tracción en el que nuevamente la relación entre presión y densidad es proporcional. Aplicando este concepto a los refrigeradores se puede concluir

que es mejor una espuma de alta densidad ya que tiene mayor capacidad de soportar grandes presiones generadas por el peso de los alimentos que contiene un refrigerador.

4.2 Principales Problemas Detectados en las Puertas de Refrigeradores

Aplicando el Análisis Modal de Fallas y Efectos (AMFE) se han detectado tres modos de fallo persistentes en las puertas de los refrigeradores, casualmente cada una de estas fallas está ligada a la dinámica de cada uno de los sistemas que componen las puertas.

Si bien es cierto que la tecnología de los electrodomésticos se actualiza paulatinamente, existen problemas que no se han podido resolver desde su invención tales como la desalineación paulatina de las puertas o la fractura del cilindro sobre el que se coloca la puerta. En ocasiones se trata de modificar la dinámica de los elementos cambiando la geometría e incluso manufacturándolos con materiales y procesos diferentes, sin embargo, a pesar de todas las modificaciones, la principal causa por la que las puertas pierden su posición original sigue siendo el desgaste de las bisagras.

Las bisagras de los refrigeradores son pequeños elementos que deben cumplir con un gran número de ciclos de apertura y cierre (aproximadamente 1 millón) lo que ocasiona la fatiga de la misma, fenómeno que deriva en deformaciones en los pernos guía de la bisagra y disminuye su capacidad de carga o soporte. En la ilustración 38 se puede observar el fenómeno ocurrido cuando uno de los pernos guía se deforma y éste deforma a su vez el orificio plástico que lo contiene, ocasionando así la desalineación de la puerta. Cabe mencionar que esta falla surge cuando la carga que debe soportar la puerta es mayor que la prevista por tal motivo la AMFE lo cataloga como un fallo en la etapa de diseño (diseño de las bisagras) que se extiende hasta la etapa de proceso (mayor carga en las puertas), específicamente por operación.



Ilustración 38 Ejemplo de falla en las bisagras de los refrigeradores lo que produce desalineación de las puertas (Ilustración obtenida del sitio reparatumismo.org)

Una vez que la puerta no cierra de forma correcta debido a que está desalineada, el aire frío del interior del gabinete escapa hacia el ambiente, provocando un choque térmico que ocasiona la segunda falla que es la deformación del sello de goma. Esto ocurre debido a que el sello está hecho de un material formado por la unión química de varios polímeros adquiriendo una estructura reticulada llamada elastómero. Específicamente el sello de los refrigeradores está hecho de un elastómero termoplástico pues al sufrir cambios bruscos de temperatura puede fundirse o deformarse. En la ilustración 39 se muestra un ejemplo en el que el sello de goma se deformó, provocando de esta forma que la puerta no cierre de forma correcta; aunado a este fenómeno se sabe que cuando la puerta está desalineada la presión que ésta ejerce al cerrar no se distribuye de manera uniforme a lo largo del marco del gabinete y por ende tampoco se ejerce la misma presión en el marco de goma lo que incrementa su deformación.



Ilustración 39 Ejemplo de deformación del sello térmico (imagen obtenida del refrigerador de un voluntario)

Los modos de falla que se han mencionado hasta el momento están relacionados con el diseño y funcionamiento de las puertas del refrigerador, sin embargo, aunque las puertas son la principal barrera para evitar el intercambio de calor no son la única. Al ser el refrigerador una máquina térmica basa su funcionamiento en extraer calor de los alimentos y expulsarlo al exterior, por esta razón es necesario que el gabinete sea una cavidad adiabática. Los materiales con los que está fabricado el exterior del gabinete por lo general son aceros, los cuales tienen una baja resistividad térmica², ésta es la razón por la que las paredes del gabinete se rellenan con un polímero conocido como “espuma de poliuretano” y es precisamente este componente el que origina la tercera falla en los refrigeradores.

² Resistividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de oponerse al paso del calor. Ziman, J., “The Thermal Properties of Materials”, Scientific American, vol. 217.

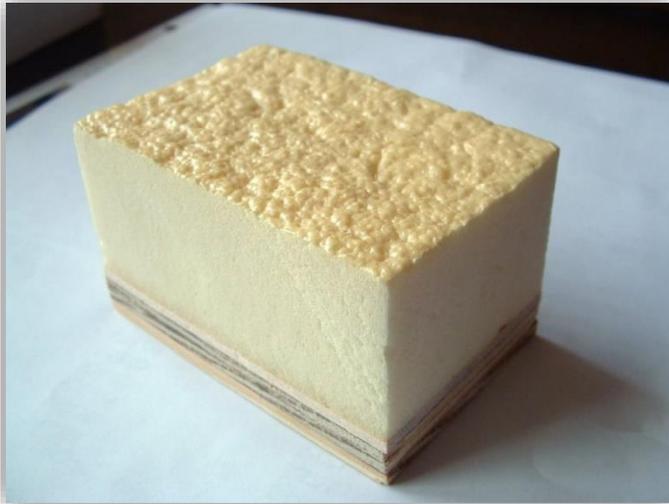


Ilustración 40 Sección de la espuma de poliuretano de un refrigerador

La espuma rígida de poliuretano es un material sintético, altamente reticulado y con estructura celular predominantemente cerrada (el porcentaje de celdas cerradas se encuentra por encima del 90%). La densidad de la espuma de poliuretano que se utiliza para aislamiento térmico se encuentra generalmente en el rango de 30-100 [kg/m³] (UNE-EN 12667:2002).

A pesar de ser un polímero de ingeniería y ser resistente al envejecimiento, la falla se origina cuando la espuma contenida entre las paredes libera el aire encapsulado en sus celdas, lo que origina que el refrigerador pierda rigidez.

Pero ¿Por qué afecta esta falla al funcionamiento de las puertas? La respuesta es sencilla, la falla que se genera en la espuma de poliuretano impacta de forma directa en la vida útil de un refrigerador ya que si el gabinete pierde rigidez es seguro que el punto sobre el que se apoya la bisagra superior (apoyo en el gabinete) no ofrezca la resistencia necesaria para soportar la carga de la puerta completa. Es interesante observar el comportamiento de los elementos de las puertas pues todos los sistemas dependen del funcionamiento de otro y a pesar de ser estas las fallas más importantes es probable que no sean las únicas.

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN



Ilustración 41 Secuencia de apertura y cierre de puerta

Una parte importante de esta investigación consiste en llevar a la práctica los conceptos que se han mencionado hasta ahora, con la finalidad de generar un protocolo de pruebas que permita predecir el comportamiento de los elementos que componen una puerta de refrigerador.

El caso de estudio da inicio desde el momento en que la puerta del refrigerador es liberada del sello térmico, se abre hasta el límite que es aproximadamente 160° y se vuelve a cerrar, el ciclo concluye una vez que ya puerta vuelve a hacer contacto con marco del gabinete. La trayectoria que describe este movimiento genera una vibración mecánica provocada por la fuerza con la que el usuario abre y cierra la puerta, cada persona desarrolla este movimiento de forma distinta es por esta razón que se debe diseñar un sistema que realice esta trayectoria de forma automática y con variables controladas, de otra forma no se podría caracterizar el comportamiento de los elementos ya que siempre sería aleatorio y generar un modelo matemático que lo describa sería en extremo complicado.

El primer paso para el desarrollo de un protocolo es caracterizar el comportamiento del sistema en condiciones reales y esto se consigue caracterizando la interacción del ser humano con el refrigerador, de esta forma se obtienen los parámetros para el diseño del banco de pruebas. El análisis predictivo de un sistema puede resolverse considerando las vibraciones que éste genera y para la detección de las vibraciones existen dos principios importantes, el primero es el sonido y el segundo la aceleración.

En esta investigación se decidió profundizar en el campo de la aceleración para detección de vibraciones mecánicas ya que en el trabajo previo a se identificaron las ventajas de trabajar con este instrumento.

5.1 Acelerómetros

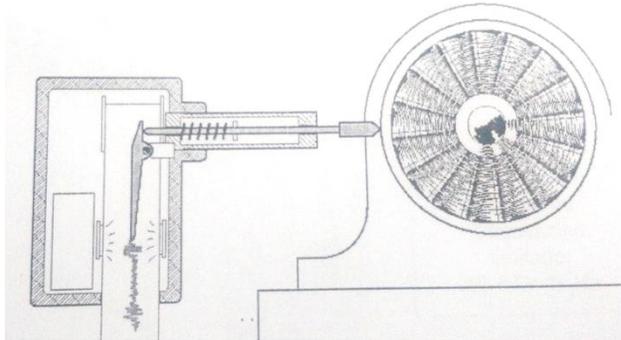


Ilustración 42 Imagen que muestra un modelo de una sonda de apoyo mecánico (Manual Brüel & Kjaer)

La tecnología para medir la aceleración de los cuerpos ha evolucionado con el paso del tiempo, hace años las vibraciones se medían con una sonda de apoyo mecánico que transforma el movimiento a una señal expresada de forma gráfica. Con el paso del tiempo la evolución de la tecnología permitió aplicar el concepto a nuevos instrumentos como las sondas de

proximidad. Las sondas se introducen a la máquina hasta que hace contacto con la superficie que se quiere monitorear y arroja una señal producto de una diferencia de potencial medida entre sus terminales como se muestra en la ilustración 43.

En la actualidad existen muchos tipos de instrumentos con los que se puede medir la vibración de un sistema, incluso puede medirse con sofisticados micrófonos. Como ya se ha mencionado, en esta investigación se optó por utilizar acelerómetros.

Pues bien, un acelerómetro es un instrumento sísmico lineal que utiliza elementos piezoeléctricos de tal manera que se genera una carga electrostática proporcional a la aceleración aplicada al instrumento. Se entiende por instrumento sísmico a aquél, en el cual el movimiento vibratorio es medido de forma relativa, respecto a la masa de un sistema elástico fijo a la base oscilante.



Ilustración 43 Modelo de sonda de proximidad (Manuel Brüel & Kjaer)

Internamente un acelerómetro está compuesto por tres partes importantes, una base, un cerámico policristalino o mejor conocido como cristal piezoeléctrico y una masa sísmica. Estas tres partes trabajan en conjunto para reproducir la vibración de un sistema. El cristal se encuentra en medio de la base y la masa sísmica de tal forma que cuando se le aplica una aceleración a la base ésta hace variar las tensiones en el cristal dando origen a pequeñas deformaciones que producen un movimiento de vaivén en la masa sísmica. El movimiento acelerado aplicado a la base, hace que se desplace una magnitud λ provocando la deformación ϵ en el muelle (cristal). El desplazamiento relativo de la masa sísmica respecto a la base es función de la aceleración aplicada, la rigidez del muelle, la propia masa, y el coeficiente de amortiguamiento entre la base y la masa (Mosquera, 2001). En la ilustración 44 se puede observar la configuración interna de un acelerómetro y el funcionamiento del mismo.

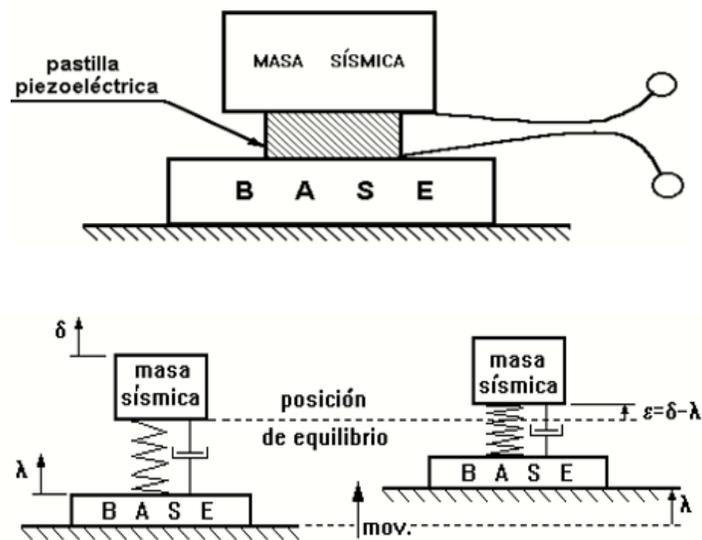


Ilustración 44 Configuración y funcionamiento de un acelerómetro piezoeléctrico

Para poder adquirir la señal de aceleración que describe la puerta durante su trayectoria de apertura y cierre, se considera la puerta como un cuerpo rígido y se colocan los acelerómetros en el centro

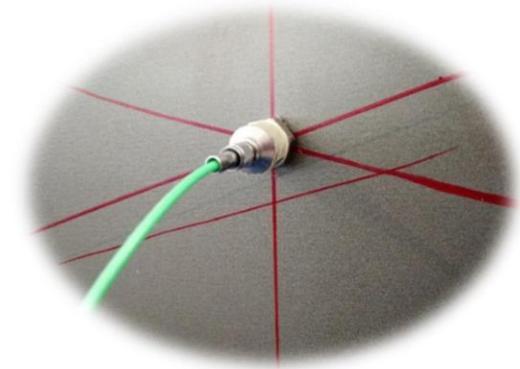


Ilustración 45 Imagen que muestra la colocación del acelerómetro en el centro de gravedad de la puerta.

de gravedad de la puerta (apartado 3.2). A partir de las observaciones realizadas durante el reconocimiento del sistema se decidió utilizar dos tipos de acelerómetros, dos acelerómetros piezoeléctricos y un acelerómetro de carga. Este último tiene la misma configuración que se mencionó anteriormente sólo que entrega a la salida una señal de capacitancia [pC] y no de voltaje.

Los acelerómetros se adhieren a la superficie con cera de abeja pues permite colocarlos con facilidad y sin modificar la naturaleza del sistema.

Los acelerómetros que se utilizaron en esta investigación son los siguientes:

- Acelerómetro piezoeléctrico³

Rango de aceleración	500 [G]
Rango límite de aceleración	± 1000 [G]
Sensibilidad	10 mV/g
Frecuencia de respuesta	±1-10000 [Hz]
Rango de temperatura	-54 a 120 °C



Ilustración 46 Acelerómetro piezoeléctrico (Kistler 8704B500)

- Acelerómetro de carga



Ilustración 47 Acelerómetro de carga (Kistler 8044)

Rango de aceleración	-20K a 30K [G]
Rango límite de aceleración	-30K a 100K [G]
Sensibilidad	0.3 pC/g
Frecuencia de respuesta	±0 a 8000 [Hz]
Rango de temperatura	-195 a 200 °C

³ Las especificaciones completas de los acelerómetros se encuentran en el Apéndice A "Instrumentación"

5.2 Celdas de carga

Una celda de carga es un sensor que detecta pequeños cambios eléctricos provocados por una variación en la intensidad de un peso aplicado sobre la misma. Generalmente las celdas de carga se componen de cuatro galgas extensiométricas (strain gauge) conectadas en una configuración que se conoce como puente de Wheatstone.

Para entender correctamente el funcionamiento de una celda de carga se debe comprender qué es una galga extensiométrica. Pues bien, una galga es una resistencia eléctrica conformada por hilos metálicos muy delgados dispuestos a lo largo de una membrana elástica, la resistencia eléctrica del hilo es directamente proporcional a su longitud o lo que es lo mismo, su resistencia aumenta cuando éste se alarga. Aunque la función principal de las galgas extensiométricas es medir la deformación de la superficie sobre la que está adherida, el conectarlas en forma de puente de Wheatstone permite obtener un voltaje proporcional a la deformación de las galgas y con ello la carga que provoca dicha deformación.

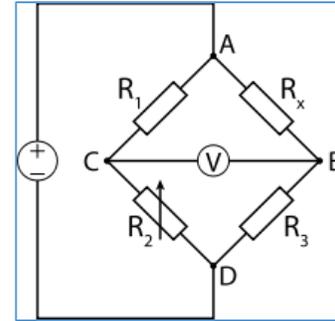


Ilustración 48 Galgas conectadas en forma de puente de Wheatstone

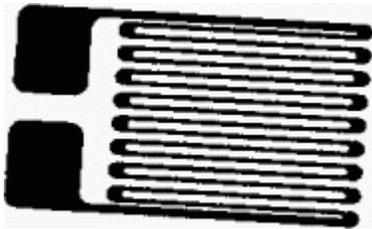


Ilustración 49 Ejemplo de galga extensiométrica unidireccional

Al igual que los acelerómetros, las celdas de carga pueden ser de dos tipos, piezoeléctricos y de carga. Los más comunes son los piezoeléctricos por ser más sensibles al detectar fuerzas pequeñas provocadas por diferencias de potencial mínimas.

La celda de carga que se utilizó en esta investigación, es una celda piezoeléctrica con la capacidad de medir el progreso de la fuerza aplicada durante el evento de apertura y cierre, por su naturaleza se le conoce como celda dinámica ya que es capaz de registrar variaciones rápidas de fuerza sin tener que restituir su valor de equilibrio.

Durante este proceso las celdas se utilizaron para medir dos fenómenos diferentes, el primero, la fuerza requerida para romper la inercia de la puerta y lograr abrirla y el segundo, la fuerza con la cual la puerta impacta sobre el marco del gabinete. Para realizar este registro, la celda de carga se colocó sobre el eje de acción del centro de gravedad (componente horizontal) y específicamente debajo de la manija de la puerta.

La posición elegida se debe a que al ejercer la puerta un momento alrededor del eje de giro de la bisagra, es ese punto (debajo de la manija) la mayor distancia y sobre la que se llevará a cabo el impacto de mayor magnitud provocado por el brazo de palanca (ancho de la puerta).



Ilustración 50 Posición de la celda de carga durante la prueba

La celda de carga⁴ utilizada es la siguiente:

Rango de compresión	500 [lbf]
Rango de tensión	500 [lbf]
Sensibilidad	10.94 mV/lbf
Límite de impacto	< 10000 [G]
Rango de temperatura	-51 a 121 °C



Ilustración 51 Celda de carga (Kistler 9712B250)

⁴ Las especificaciones completas de la celda de carga se encuentran en el Apéndice A "Instrumentación"

5.3 Sensor de desplazamiento angular

El fenómeno que se analiza en esta investigación corresponde al movimiento angular que desempeña un cuerpo rígido (puerta) alrededor de un eje de rotación, es decir, el eje de giro de la bisagra, por tal motivo es necesario saber en qué momento de su trayectoria ocurren los distintos fenómenos detectados, sin embargo identificar estos fenómenos a lo largo del tiempo no es una opción viable ya que no todas las personas realizan el movimiento al mismo tiempo e incluso realizando el desplazamiento con una máquina el tiempo variará a medida que los elementos comienzan a desgastarse, es por esta razón que surge la necesidad de identificar la posición angular de la puerta durante el desplazamiento. Para ello se utiliza un potenciómetro de precisión.

Un potenciómetro es una resistencia variable que se puede alterar de forma mecánica girando una perilla o cursor para identificar la diferencia de potencial entre sus terminales. Con una programación sencilla se puede caracterizar el voltaje total suministrado de forma que se adquiera cierto valor de voltaje por cada grado recorrido.

Físicamente se detectó el ángulo de apertura de la puerta y el ángulo que era capaz de abrir el brazo del banco para cotejarlo con la señal del ángulo obtenida, en la ilustración 52 se puede observar la trayectoria angular que describen los elementos antes mencionados.

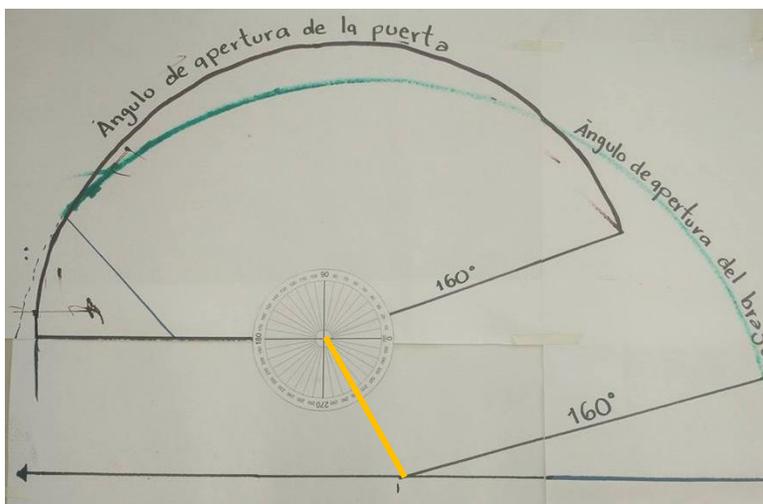


Ilustración 52 Trayectoria angular descrita por la puerta del refrigerador y el brazo del banco (prueba realizada en laboratorio)

En esta ilustración se observa una trayectoria en color verde que corresponde al ángulo de apertura del brazo del banco y de color negro se muestra el ángulo de apertura de la puerta del refrigerador. La línea anaranjada es el desfase que existe entre el eje de giro de la bisagra y el eje de giro del brazo del banco, idealmente

ambos ejes de giro deberían ser colocados en la misma línea de acción y este desfase no existiría, pero debido a las limitaciones mecánicas del banco se debe considerar esta distancia para el análisis.



El potenciómetro se colocó alineando la flecha del mismo sobre la misma línea de acción de la flecha del motor. De esta forma el potenciómetro detectaría únicamente el giro del brazo del banco que intenta imitar el giro de la puerta durante la apertura y cierre.

El sensor utilizado es el siguiente:

Rango de medición	0-5 [V]
Sensibilidad	0.014 [V/°]



Ilustración 53 Potenciómetro de precisión (Omega)

5.4 Mapa sensorial: Análisis introductorio biorrobótico aplicado al tren superior

Uno de los propósitos de la investigación consiste en identificar el comportamiento de los elementos del refrigerador trabajando bajo condiciones reales para que de esta forma se pueda replicar dicho comportamiento para realizar pruebas de forma automática y apegadas a los parámetros reales.

Un mapa sensorial es una prueba instrumentada en la que se puede monitorear la interacción del usuario con el sistema de estudio con la finalidad de obtener los valores de las variables que influyen de forma directa en el comportamiento del mismo. Esta prueba se llevó a cabo para identificar el ángulo que describe el brazo humano al abrir y cerrar las puertas ya que es un valor importante en el análisis pues permite verificar la dirección en la que las personas aplican la fuerza durante el proceso.

La prueba se realizó con una muestra de 5 personas de las cuales 3 fueron hombres y dos mujeres; todas las personas eran diestras y cada una de diferente peso y estatura con el objetivo de identificar comportamientos radicales en la población. La tabla 2 muestra las características físicas de las personas.

Sujeto	Edad	Peso [Kg]	Estatura [cm]
Mujer 1	25	67	160
Mujer 2	25	56	155
Hombre 1	26	80.2	184
Hombre 2	26	92	187
Hombre 3	24	80	166

Tabla 3 Características físicas de la muestra de usuarios

Existen dos formas de realizar una prueba como esta para obtener mediciones correctas, la primera consiste en distraer al usuario realizando tareas previas a la tarea que se quiere supervisar para que de esta forma no realice la tarea de interés de manera forzada, la segunda consiste en recrear un escenario en el que la persona interactúe de formas diferentes con el sistema, sin embargo, por facilidad se eligió la primera opción.

El ambiente de trabajo se recreó en un área de aproximadamente 40 metros cuadrados en la cual había distintos sistemas en los que se debían utilizar los brazos para realizar la acción, se colocaron cámaras que simulaban grabar todas las pruebas para confundir a las personas y de esta forma no

realizaran movimientos forzados. En la ilustración 54 se muestra el ambiente recreado para la prueba.

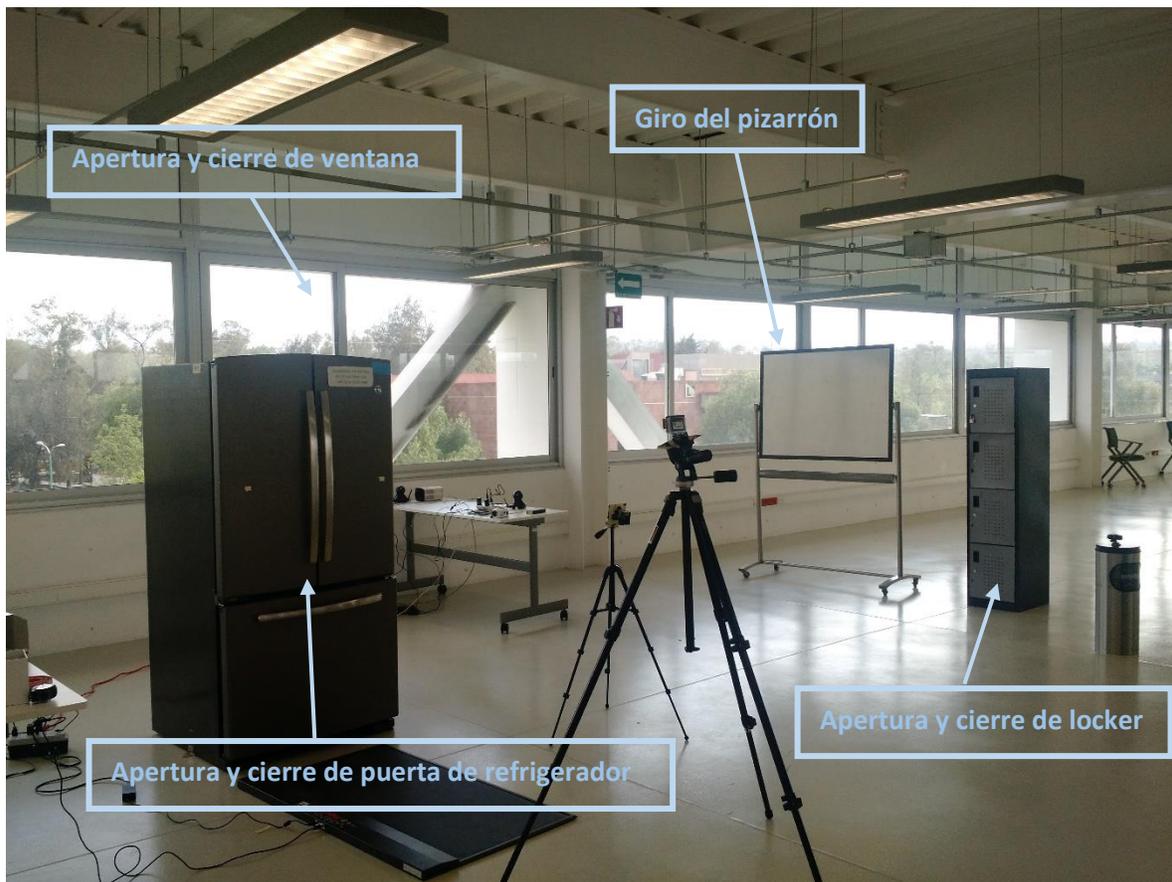


Ilustración 54 Ambiente recreado para mapa sensorial

La parte medular de esta prueba consiste en identificar el ángulo de flexión y extensión del brazo



Ilustración 55 Marcadores de luz difusa colocados en las articulaciones del tren superior.

humano, para ello fue necesario realizar un “Análisis introductorio biorrobótico aplicado al tren superior” (Hernández, 2016). Este protocolo está basado en la tesis de maestría *Diseño de una órtesis compensatoria para desgaste en cartílago en rodilla desde un enfoque biomecánico*. De forma general el protocolo consiste en colocar marcadores de luz difusa en las articulaciones del brazo, posteriormente se graba a las personas realizando la acción desde el plano superior y desde el plano lateral paralelo al brazo que realiza la acción, esto con el fin de regenerar la trayectoria descrita e identificar el ángulo. Adicional a esto se colocó una plataforma de fuerzas con la que se puede identificar la distribución del peso del

usuario en el piso, es decir, la forma en que se posiciona mientras realiza la tarea de abrir y cerrar el refrigerador. En la ilustración 55 se observan los marcadores de luz difusa colocados en el brazo de los usuarios.

Una vez colocados los marcadores, las personas debían realizar todas y cada una de las pruebas de forma continua, siendo la apertura y cierre del refrigerador la última en ejecutarse. Es importante mencionar que las cámaras permitían grabar con una resolución de 120 cuadros por segundo lo que significa que se obtuvieron 120 puntos por segundo para reestructurar la trayectoria realizada por los diferentes usuarios.

Las gráficas que arroja el análisis después del procesamiento de la información permite conocer el ángulo descrito por el hombro y el codo de los usuarios mientras abren y cierran la puerta, el valor del ángulo influye de forma directa en el sentido de la fuerza que el usuario aplica a la puerta, esto se puede utilizar para dos procesos:

- Recrear una prueba con parámetros reales
- Plantear el rediseño de los elementos dependiendo del trabajo desempeñado por el usuario

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas para cada usuario, reconstruidas desde el plano lateral y paralelo al brazo que realiza la acción (plano sagital).

Mujer 1

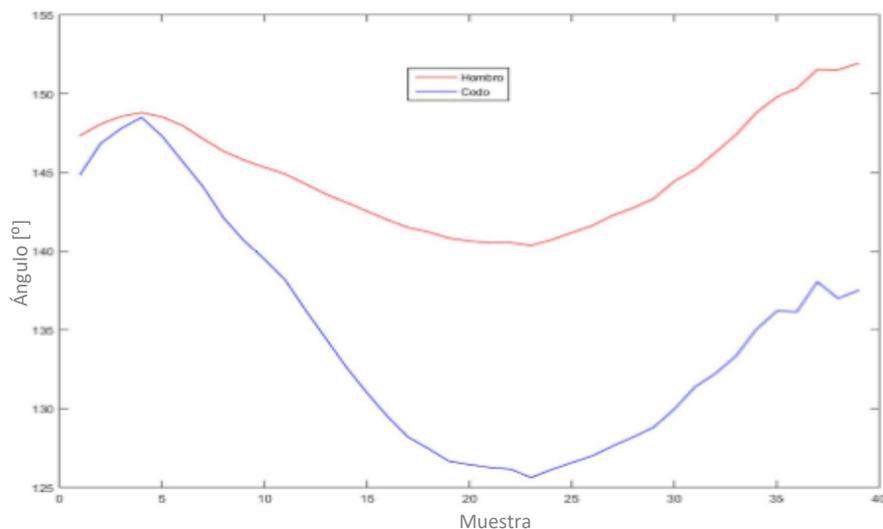


Ilustración 56 Ángulo de flexión y extensión de Mujer 1

En la ilustración 56 se puede observar el ángulo que describe el primer sujeto de pruebas al realizar el ciclo de apertura y cierre de la puerta. Este primer usuario requiere un mayor ángulo de extensión

del codo tomando aproximadamente los mismos valores que el hombro en su estado de reposo, mecánicamente este fenómeno indica que el hombro no se desplaza durante el movimiento ya que es el codo el que realiza una mayor extensión y flexión. Alrededor de la muestra 37 se puede ver una perturbación que corresponde al paso de la puerta por el sello térmico.

Un dato relevante que se debe considerar es que el sujeto uno necesita encoger su brazo para poder abrir la puerta mientras que cuando la puerta está abierta en su totalidad es cuando realiza la mayor extensión de las articulaciones.

- **Mujer 2**

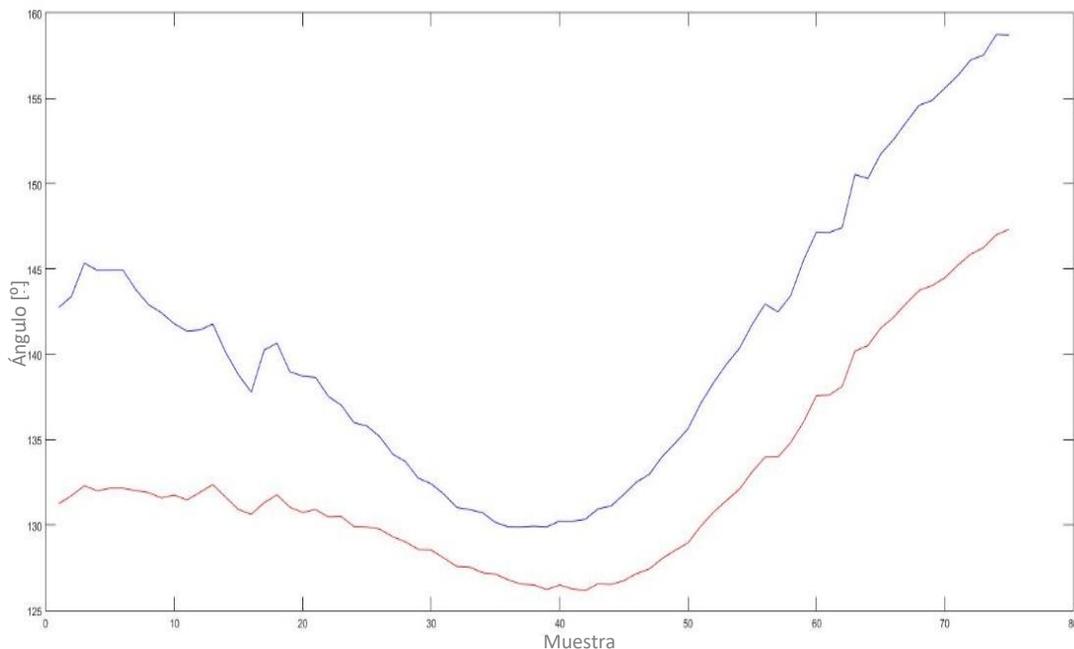


Ilustración 57 Ángulo de flexión y extensión de Mujer 2

La gráfica que describe el sujeto dos se muestra en la ilustración 57, en ella se puede observar que el movimiento que describe el codo y el hombro siguen la misma trayectoria, pero cambia la magnitud del ángulo. Los valores que arroja la gráfica indican que este usuario requiere un mayor ángulo de extensión del codo (azul) a comparación del ángulo que describe el hombro (rojo). El motivo por el que el ángulo del codo es de mayor magnitud que el ángulo del hombro se debe a que el sujeto 2 tiene una estatura de 155 [cm] por lo que necesita subir el brazo para poder abrir y cerrar la puerta. Lo importante de este sujeto es que, al abrir y cerrar la puerta, realiza el movimiento más lento que el sujeto número uno y por tal motivo se puede ver en la muestra 15 y en la muestra 60

aproximadamente, las perturbaciones que surgen cuando la puerta se libera del sello térmico al abrir y cuando hace contacto nuevamente al cerrar.

- **Hombre 1**

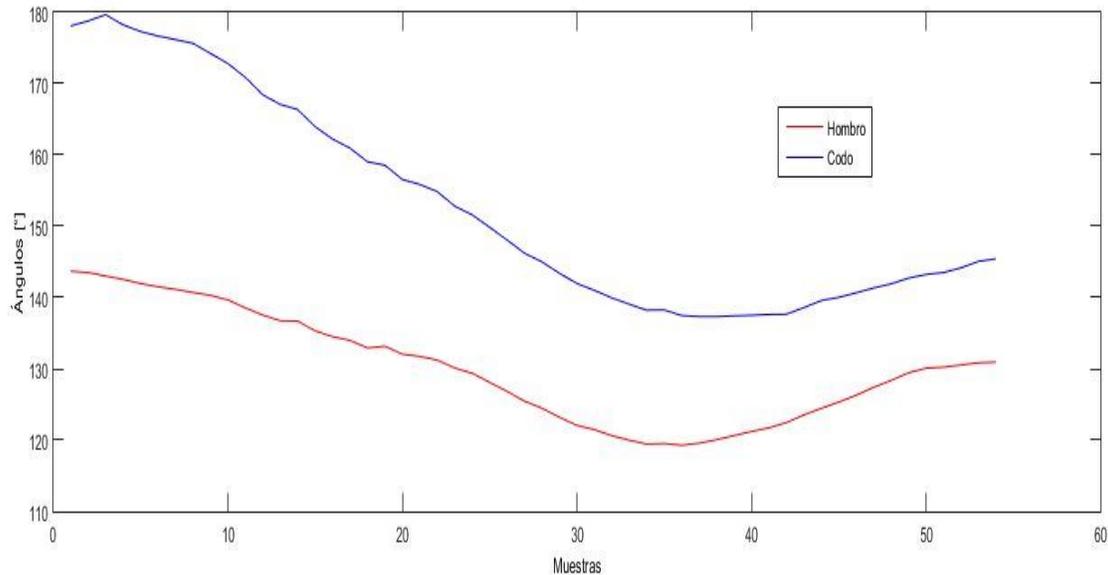


Ilustración 58 Ángulo de flexión y extensión de Hombre 1

El sujeto 3 (Hombre 1) realiza el movimiento de apertura y cierre muy parecido al sujeto dos, ya que estira el brazo para abrir alcanzando ángulos de extensión de hasta 180° en el codo y 145° en el hombro lo que significa que posiciona su brazo casi de forma horizontal (mayor extensión) para tener fuerza suficiente y poder liberar la puerta del sello térmico; posteriormente alrededor de la muestra 35 se puede observar el ángulo de flexión de las articulaciones ya que es el momento en que la puerta se encuentra abierta y requiere replegar su brazo contra el torso para sujetarla. Finalmente se puede observar que cuando requiere cerrar la puerta, nuevamente extiende el brazo para cerrarla.

La naturaleza de este movimiento se debe a la estatura del sujeto 3 (184 [cm]) pues al tener brazos más largos requiere adaptar su movimiento a la longitud de la puerta y conseguir realizar el movimiento.

- **Hombre 2**

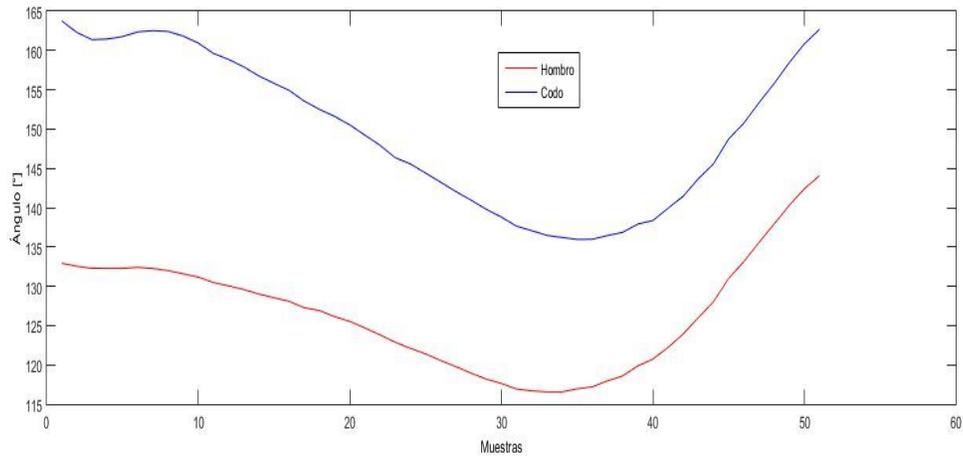


Ilustración 59 Ángulo de flexión y extensión de Hombre 2

De forma general el movimiento que describe el sujeto cuatro (Hombre 2) es muy similar al que describe el sujeto tres ya que al ser de estaturas similares podrían tener las mismas limitaciones o ventajas para abrir la puerta de refrigerador. También posiciona el brazo casi de forma horizontal para abrir y cerrar mientras que cuando la puerta está abierta requiere replegar su brazo para mantener una posición cómoda.

- **Hombre 3**

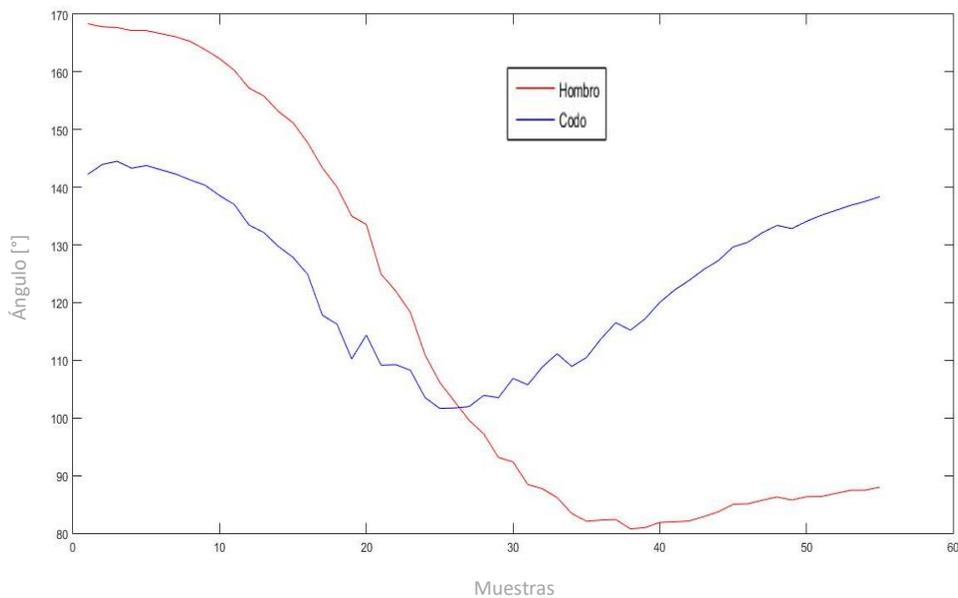


Ilustración 60 Ángulo de flexión y extensión de Hombre 3

El sujeto cinco presenta un comportamiento peculiar en la trayectoria que describe para abrir y cerrar la puerta del refrigerador ya que durante la apertura de la puerta el hombro necesita una mayor extensión que el codo para liberar la puerta del sello térmico, sin embargo, cuando la puerta está abierta en su totalidad el ángulo que describe su hombro y codo es el mismo. Finalmente, para cerrar la puerta requiere una mayor extensión del codo que del hombro (contrario al momento de apertura). Mecánicamente esta trayectoria brinda un indicio de cómo aprovechar la inercia de la puerta para que el cuerpo realice un menor trabajo ya que el hombro brindará soporte mientras se ejecute el movimiento y el codo realizará la acción de guiar la puerta. Las vibraciones observadas en la gráfica (ilustración 60) se deben a que el brazo siguiendo el patrón antes mencionado no tiene el suficiente apoyo para realizar un movimiento preciso.

Después de analizar el comportamiento de las cinco personas que realizaron la prueba se puede observar que si bien es cierto que cada persona realiza la apertura y cierre de la puerta de forma diferente, existe un rango de movimiento que se debe cumplir ya que por la estructura anatómica no podría ser rebasado. Para identificar este ángulo se colocaron goniómetros (instrumentos que sirven para medir ángulos a partir de un punto de referencia) en las articulaciones de un sujeto de pruebas diferente a las personas que realizaron la prueba anterior, el rango de movimiento angular es el que se muestra en la ilustración 61.

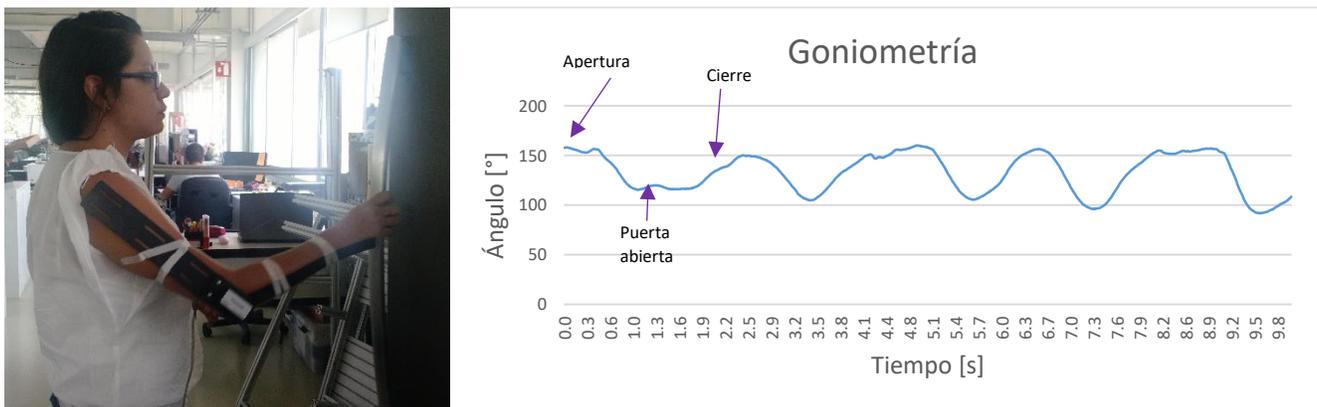


Ilustración 61 Ángulo de flexión y extensión obtenido a través de un estudio de goniometría (sujeto de 163[cm] y 57[Kg])

Como se puede ver el ángulo de flexión y extensión va de los 95° (valle más bajo de la gráfica) a los 160° (pico más alto). En esta prueba se abrió y cerró la puerta cinco veces de forma continua y lo que se puede afirmar es que los usuarios analizados con un protocolo diferente realizan el movimiento dentro del rango permitido lo que significa que los datos arrojados son correctos.

5.6 Diseño de un banco de pruebas para abrir y cerrar puertas

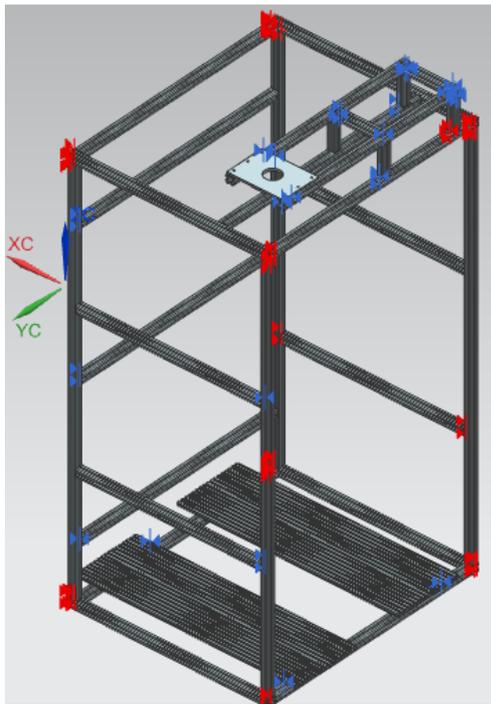
En las etapas anteriores se han mostrado algunas gráficas de aceleración adquiridas a partir de la interacción de algunos usuarios con el refrigerador, sin embargo, a partir del mapa sensorial se puede concluir que no es adecuado realizar un análisis de señales cuando no se tiene control sobre las variables que influyen de forma directa en el desarrollo del fenómeno. A partir de los datos obtenidos se decide realizar un sistema que realice el ciclo de apertura y cierre de forma automática y permita controlar la velocidad de la prueba además de que cumpla con algunos requerimientos establecidos.

El banco de pruebas diseñado no deberá apoyarse en la estructura del gabinete ya que de esta forma puede modificar el comportamiento del refrigerador que vibra de forma natural al abrir y cerrar las puertas. El único punto de anclaje entre ambos sistemas podrá ser la manija de la puerta que estrictamente se deberá sujetar a la altura del eje de acción horizontal del centro de gravedad.

El diseño del banco de pruebas se desarrolló en dos etapas diferentes, el diseño mecánico y el acoplamiento del sistema de movimiento. A continuación, se explican a detalle cada una de las etapas.

5.6.1 Diseño mecánico

El diseño mecánico surge a partir de la necesidad de generar un sistema capaz de abrir y cerrar



puertas de un refrigerador de forma automática, en el cual se permita el acoplamiento mecánico de un motor, el potenciómetro de precisión y el brazo que realizará la tarea de apertura y cierre de puertas. El resultado de este diseño fue el que se muestra en la ilustración 62, el cual consiste en una estructura en forma de prisma rectangular con dimensiones de 110 [cm] de ancho, 190 [cm] de alto y 110 [cm] de profundidad. En la parte superior se colocó una plataforma sobre la que se coloca el motor y el sistema de monitoreo de posición angular. Esta estructura puede contener el refrigerador de estudio sin tocarlo para evitar modificar el comportamiento del refrigerador.

Ilustración 62 Modelado de sistema para abrir y cerrar puertas.

La estructura que se muestra en la ilustración 62 está manufacturada de perfiles de aluminio 6063 con acabado anodizado de 40x40 [mm] como el que se muestra en la ilustración 63.

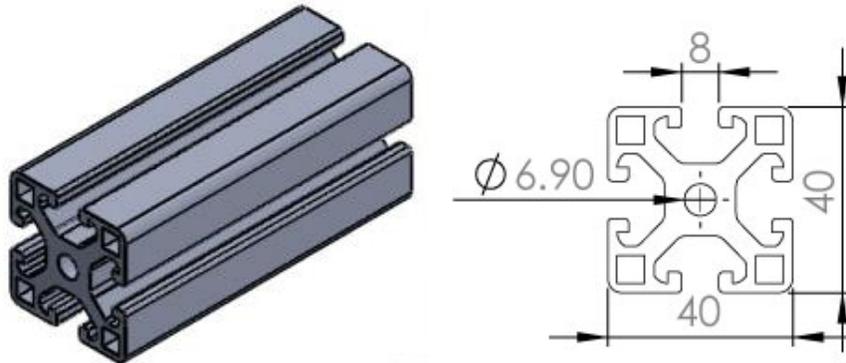


Ilustración 63 Perfil de aluminio 6063 (modelo TM 40- 40 ST de Transformadora de metales)

Para el diseño de las piezas que realizaran el acoplamiento entre el motor y el brazo es necesario considerar las dimensiones de la flecha del motor, de esta forma se pueden realizar de forma correcta los ajustes para que el sistema se desempeñe de la forma correcta. Las piezas diseñadas para realizar el acoplamiento entre el motor y el brazo que realizará la acción de apertura y cierre son las que se muestran en la ilustración 64.

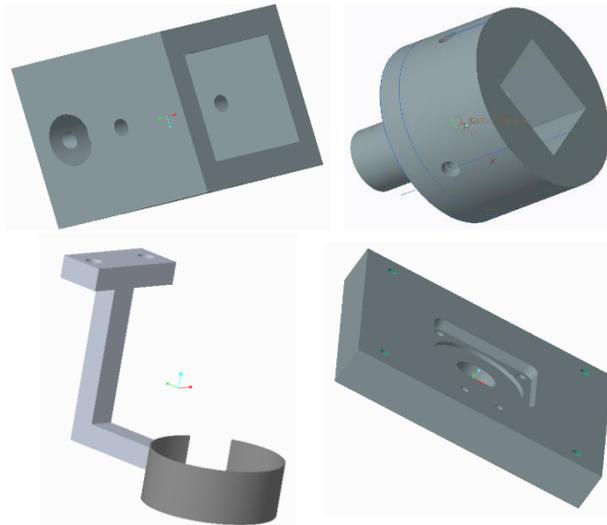


Ilustración 64 Acoplamiento entre el motor y brazo de apertura y cierre (Aluminio 6063)

Cada una de las piezas forma un conjunto que permite acoplar un potenciómetro de precisión para monitorear la posición angular del brazo además de que coloca el eje del motor y el eje del sensor sobre la misma línea de acción para evitar desplazamientos que provoquen ruido mecánico.

Si bien es cierto que se consideraron las especificaciones mecánicas del motor, las características principales de este se

muestran en el siguiente apartado.

5.6.2 Sistema de movimiento

Una de las características principales del banco de pruebas es que realice el ciclo de apertura y cierre de forma automática, para conseguirlo se utilizó un motor cuyas características se adecuaron al comportamiento deseado, en la tabla 4 se citan las principales características del motor.



Ilustración 65 Motor CNFM 6075DA (imagen adquirida del sitio oficial de fabricante)

Modelo	CNFM 6075DA
Par torsional	531 [in*lbs]
Potencia	1/8 HP
RPM	60
Alimentación	Trifásica

Tabla 4 Características principales del motor

Al ser un motor con una alta rigidez torsional genera una fuerza de gran magnitud capaz de mover el brazo del banco de pruebas cuando éste se encuentra anclado a la puerta del refrigerador y ésta a su vez tiene carga al 70% de su capacidad total. El motor y su reducción permiten realizar 6 ciclos de apertura y cierre por minuto. Los resultados del banco de pruebas se pueden observar en la ilustración 66.⁵

Una vez acoplada la parte mecánica con la parte eléctrica se puede proceder a realizar la adquisición de las señales de aceleración, cabe mencionar que durante las pruebas se monitorea la vibración que genera el banco para descartarla de la señal de aceleración producida por el refrigerador.

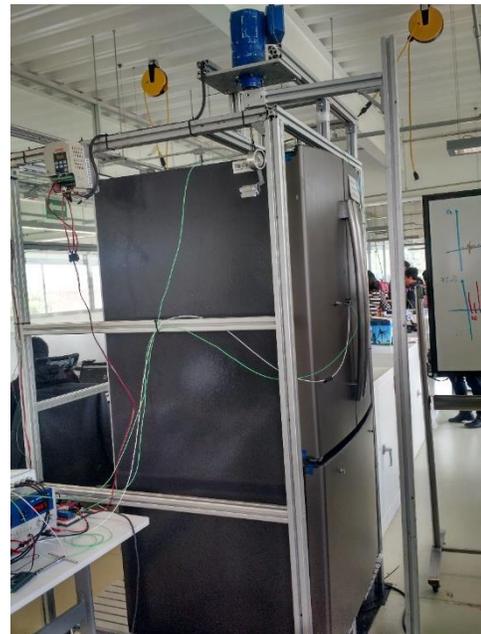


Ilustración 66 Ensamble real del banco de pruebas para apertura y cierre de forma automática (Laboratorio del CDMIT 2016)

⁵ El banco de pruebas que se expone en este apartado es la primera iteración del sistema, no se profundiza en el tema ya que es una investigación en curso.

5.7 Adquisición y procesamiento de la señal

La idea general de la Transformada de Fourier es sencilla, además de permitir la transformación de una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y viceversa, descompone una señal en sus frecuencias constitutivas y almacena la amplitud de cada componente en el dominio de la frecuencia. Cuando se analiza una señal continua se puede aplicar perfectamente la ecuación número dos citada en el capítulo cuatro sin embargo cuando es necesario analizar una señal adquirida por medio de algún software es conveniente aplicar la Transformada Discreta de Fourier (ecuación número 4, capítulo 3) ya que una computadora es un sistema discreto y basa su funcionamiento en una tasa de muestreo con N (número de muestras) finito. Sin embargo, la DFT (por sus siglas en inglés Discrete Fourier Transform) requiere el cálculo de N funciones exponenciales para obtener la señal $F(n)$, lo cual resulta un esfuerzo de cálculo enorme cuando se tiene una N grande.

A partir de este principio se desprende la Transformada Rápida de Fourier (FFT) que es una técnica que permite disminuir el número de cálculos efectuados ya que al aplicar el logaritmo reduce considerablemente las iteraciones que deban de realizarse, por poner un ejemplo, si $N=1024$ evaluando la función de forma directa se tiene $N^2=1,048,576$ multiplicaciones complejas. En contraste si se aplica el algoritmo $FFT = (N \log_2 N)/2$ únicamente se deberán realizar 5120 multiplicaciones. Es importante mencionar que este cálculo es una aproximación de la Transformada de Fourier y la calidad de la misma dependerá del valor del intervalo de muestreo T por lo que se puede conseguir una buena similitud.

La FFT es una herramienta que generalmente se encuentra previamente programada en los diferentes softwares de procesamiento matemático por lo que para el propósito de esta investigación no requiere ser programado. Para realizar la adquisición de las señales de vibración producidas por las puertas del refrigerador y posteriormente poder analizar su comportamiento, se desarrollaron dos interfaces trabajando a diferentes tasas de muestreo y se utilizó una interfaz de comunicación entre el acondicionador de señales Kistler® LabAmp⁶ y los acelerómetros.

⁶ Las especificaciones del acondicionador de señales se describen con detalle en el Apéndice B "Instrumentación"

La ilustración 67 se muestra la pantalla de trabajo de la interfaz realizada para adquisición y análisis de las señales de vibración y carga correspondientes a los sensores colocados en el refrigerador.

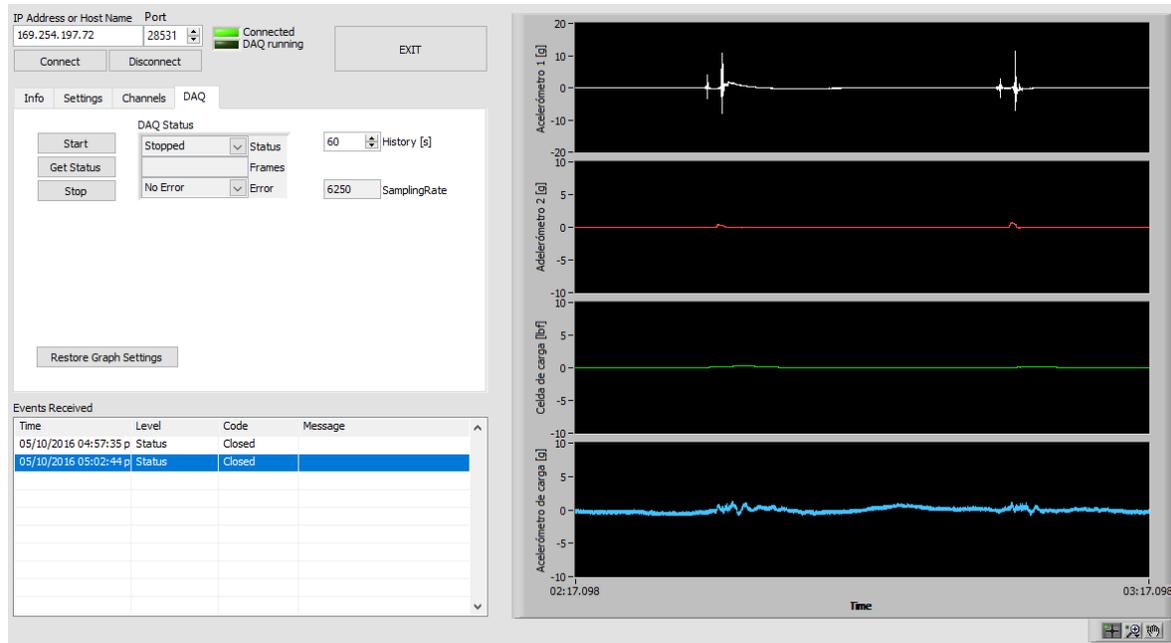


Ilustración 67 Interfaz para adquisición y procesamiento de datos (desarrollada en LabView 2014)

Esta interfaz permite comunicar la computadora con los sensores a través de un acondicionador de señales que provee la alimentación adecuada a los mismos dependiendo su tipo, es decir, si son piezoeléctricos o sensores de carga. Cada uno de los canales se configuró de la siguiente forma:

- Cana 1: Acelerómetro de puerta móvil (línea blanca)
- Canal 2: Acelerómetro de puerta fija (línea roja)
- Canal 3: Celda de carga (línea verde)
- Canal 4: Acelerómetro de carga (línea azul)

La interfaz permite adquirir datos con una frecuencia $F=0.0016$ [s] es decir, 625 muestras por segundo, sin embargo, a pesar de ser una tasa de muestreo aceptable no permite captar al 100% los comportamientos de los elementos de la puerta. Con esta interfaz se pueden adquirir señales que si bien dan una idea del comportamiento del sistema, no permiten observar y por ende analizar cómo se comportan durante el ciclo de apertura y cierre. En la ilustración 68 se muestran tres gráficas diferentes, la primera es la gráfica de aceleración de la puerta móvil, la segunda la aceleración de la puerta fija y la tercera la fuerza que experimenta la puerta durante el ciclo de



apertura y cierre acelerado. Esta iteración fue realizada por una persona de 1.90 [m] de estatura y 69 Kg de peso lo que da una idea de comportamiento del sistema.

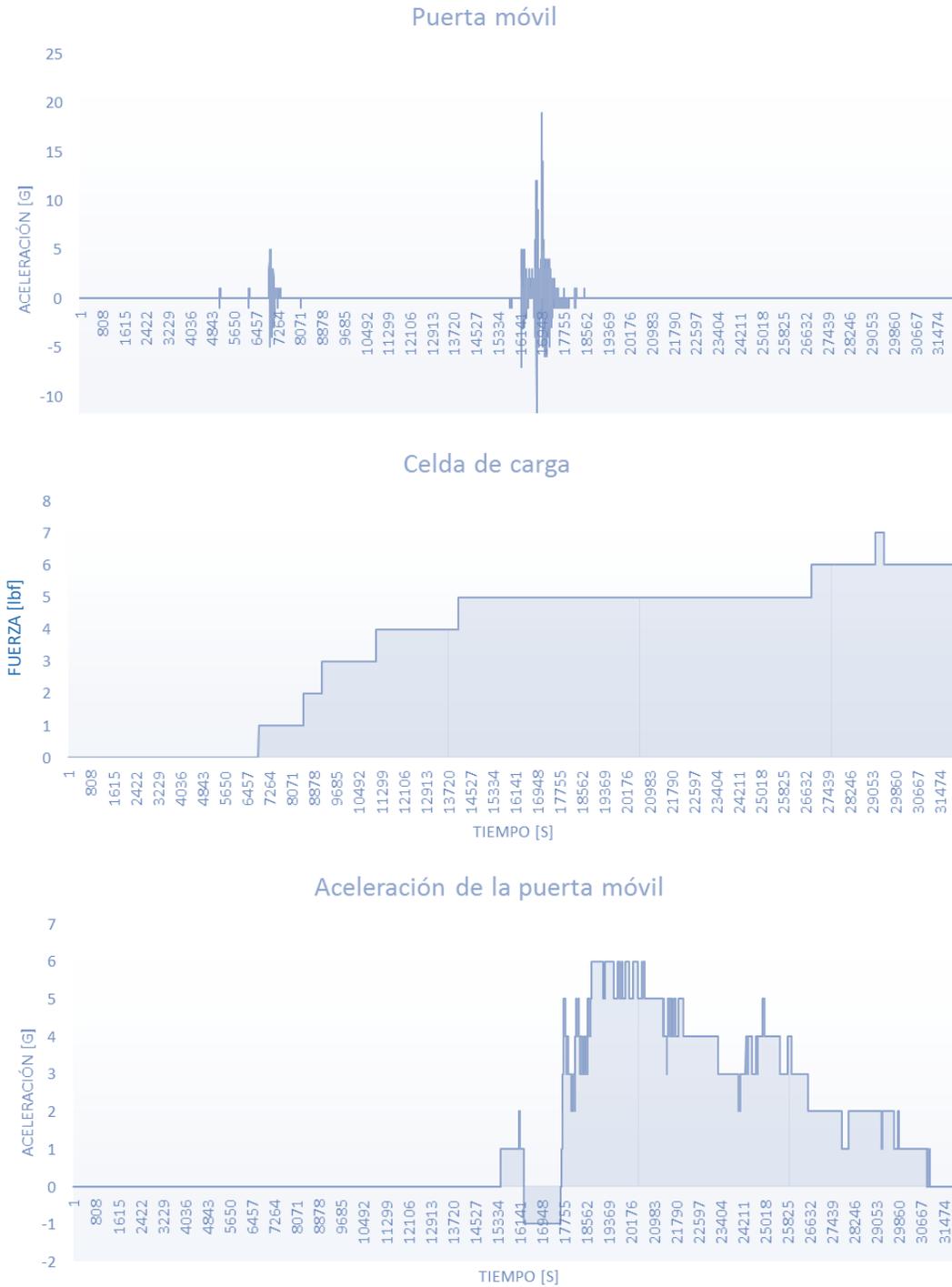


Ilustración 68 Gráficas del comportamiento de las puertas del refrigerador durante un ciclo de apertura y cierre (sujeto de 1.90m y 69 Ka)

Debido a la fuerza que se le aplicó a la puerta para cerrar, se consigue ver que la mayor aceleración del sistema se experimenta cuando la puerta impacta contra el gabinete de forma acelerada y lo mismo se refleja en la gráfica que describe la celda de carga, es decir, se ejerce una mayor fuerza cuando se cierra la puerta de forma acelerada.

A la par de esta adquisición, se obtiene la señal con otra interfaz que permite adquirir datos a una frecuencia $F=0.001$ lo cual quiere decir que se obtienen 1000 datos por segundo, a diferencia de la interfaz anterior, nos permite tener mayor información del comportamiento del sistema, sin embargo, la tendencia de la aceleración no tiene un cambio drástico. Esta nueva interfaz se programó en LabView 2014® y permite comunicar una DAQ NIUSB 6341⁷ que permite muestrear datos con frecuencias de hasta 100 MHz. En la ilustración 69 se observa una gráfica de las 3 principales variables obtenida con esta interfaz.

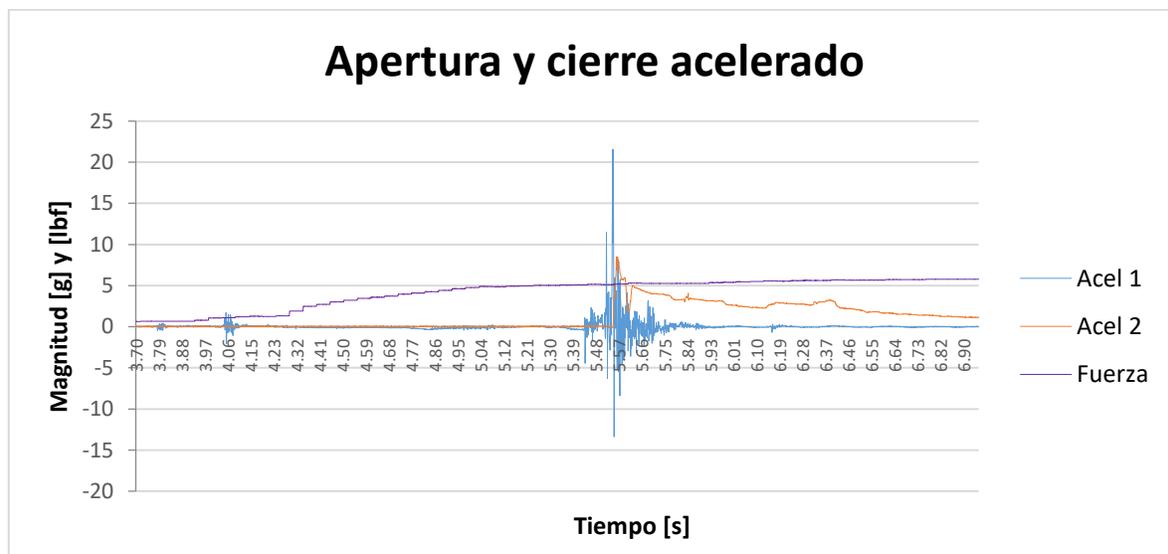


Ilustración 69 Gráfica de ciclo de apertura y cierre acelerado ($F=0.001$ Hz)

En la gráfica (ilustración 69) se puede observar que la tendencia y magnitudes son parecidas a las generadas con la interfaz anterior, sin embargo, en esta nueva iteración se puede obtener una señal con mayor detalle del comportamiento del sistema por lo que se guardaron los datos adquiridos con la segunda interfaz como respaldo de la información para ser utilizados en caso de que la primera interfaz omitiera detalles importantes.

⁷ Las especificaciones completas de la DAQ NI USB 6341 se encuentran en el Apéndice B “Instrumentación”

5.7.1 Descomposición de la señal en su espectro de frecuencias

Finalmente, la importancia de adquirir las señales con una tasa de muestreo adecuada radica en poder realizar un análisis frecuencial correcto, es decir, obtener un espectro de frecuencias en el que se puedan identificar todas las componentes de frecuencia, así como su amplitud. Aplicando este concepto a la investigación se podrá identificar cuál o cuáles de los elementos que componen el refrigerador sufren la pérdida de la función.

Profundizando más sobre el tema se sabe que un espectro de frecuencias relaciona frecuencias con magnitudes o amplitudes, un ejemplo es el que se muestra en la ilustración 70, en el que se puede

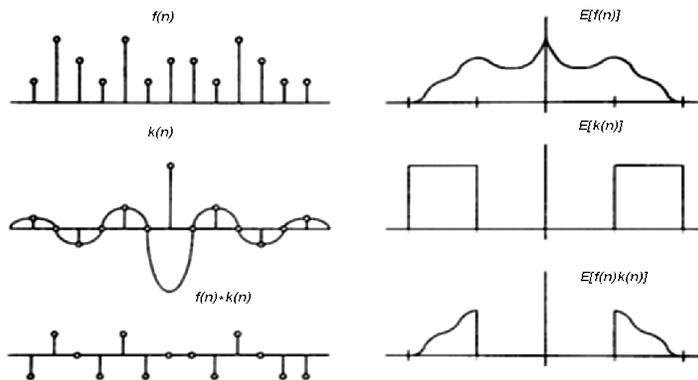


Ilustración 70 Ejemplos de espectros de frecuencia para diferentes señales

observar cada una de las componentes que trabajan al mismo tiempo. Se sabe que en el refrigerador trabajan de forma simultánea muchos componentes mecánicos, cada uno de ellos tiene una frecuencia natural que es a la que vibran en ausencia de una fuerza externa que excite al

sistema, cada una de estas frecuencias naturales ω_n nunca cambiará, es un parámetro característico de cada elemento, sin embargo, cuando estos elementos trabajan al lado de otros formando un sistema más complejo existe la posibilidad de que haya muchos elementos vibrando a la misma frecuencia y el único parámetro que los diferenciará será la amplitud de la componente. En la ilustración 71 se muestra de forma demostrativa el comportamiento de cada una de las componentes de los elementos del refrigerador para entender el concepto.

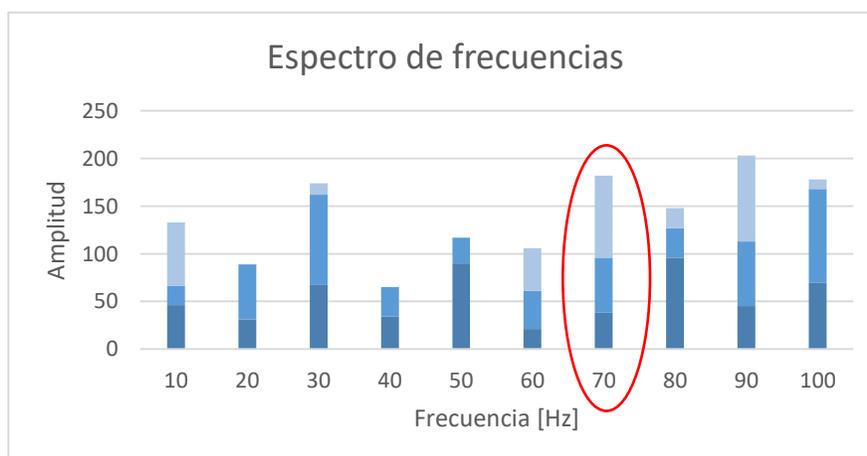


Ilustración 71 Demostración del concepto de espectro de frecuencias

Por mencionar un ejemplo, cada una de las barras de la gráfica (ilustración 71) representan las componentes frecuenciales de una señal de vibración, el eje de las abscisas son las frecuencias a las que vibran los elementos y el eje de las ordenadas son las magnitudes, los colores de cada una de las barras representan elementos diferentes del sistema. Entonces se puede observar que algunas barras tienen tres componentes lo que significa que hay tres elementos vibrando a la misma frecuencia. Por mencionar un ejemplo, a la frecuencia de 70 Hz se tienen 3 componentes que podrían ser un tornillo, una tuerca y un perno de una bisagra. Si se extrajera del sistema alguno de esos tres elementos su componente frecuencial desaparecería, el espectro de frecuencia cambiaría de la siguiente forma:

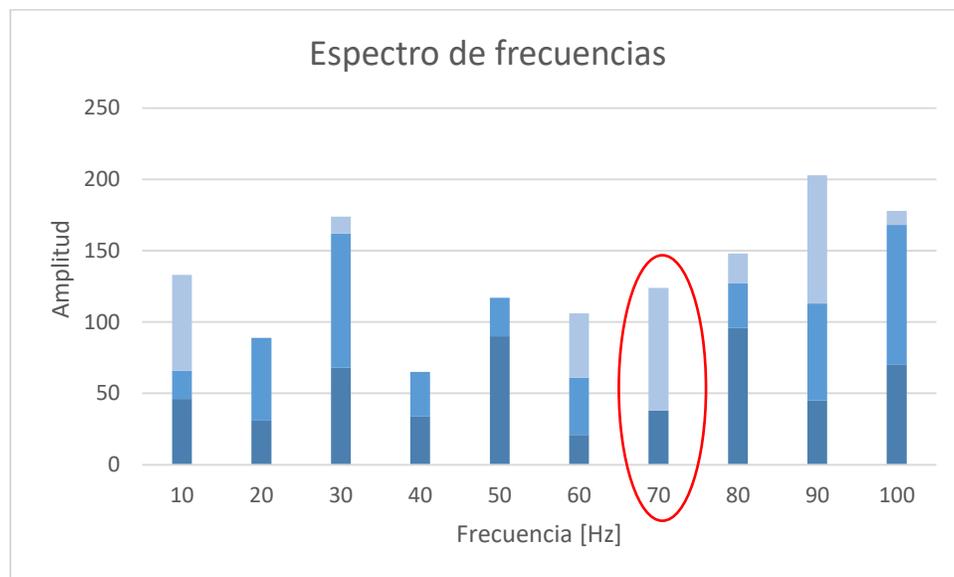


Ilustración 72 Demostración del espectro de frecuencias

Existen dos formas de detectar las frecuencias naturales de los elementos que componen el sistema, la primera realizando un análisis de modos de vibraciones a partir del modelo tridimensional del refrigerador, sin embargo, en ocasiones es complicado ya que se involucran temas de confidencialidad. La segunda forma es realizar pequeños bancos de pruebas para cada elemento e identificar sus modos de vibración, esto se menciona con mayor detalle en el trabajo futuro.

En el campo de las vibraciones y el procesamiento de señales, todas las señales se pueden describir o modelar con combinaciones lineales de senos trabajando a diferentes frecuencias, pero a medida que las señales involucran muchos más elementos, este modelado también se vuelve complejo. Es por ello que surge la necesidad de crear una interfaz que sea capaz de adquirir una señal y procesarla para adquirir su espectro de frecuencias. A partir del software proporcionado por el acondicionador

de señales Kistler® LabAmp se generó una interfaz que adquiere la señal y después que registra todos los datos realiza el espectro de frecuencias. La ilustración 73 muestra la pantalla de la interfaz.

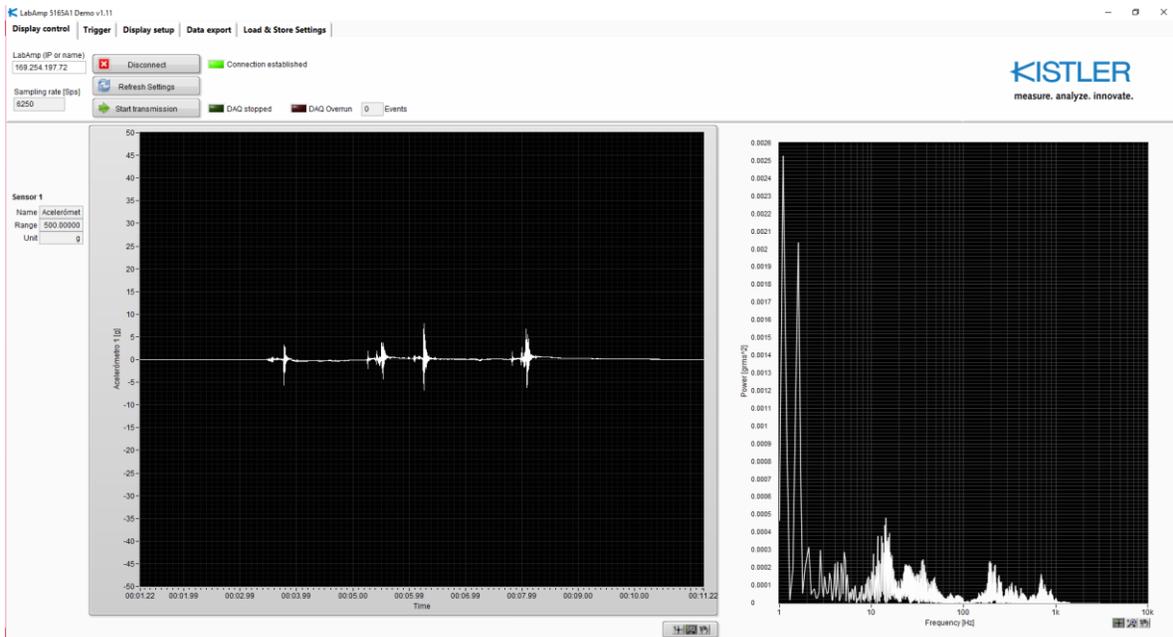


Ilustración 73 Interfaz generada a partir del software Kistler® para procesamiento de señales

Con esta interfaz únicamente se puede procesar un canal debido a la cantidad de datos que adquiere, trabaja con una tasa de adquisición de 6250 muestras por segundo, es decir, una frecuencia $F=0.00016$ Hz lo que permite tener una mejor resolución para describir a la señal. Se decidió analizar la señal descrita por la puerta que se encuentra en movimiento ya que es la que experimenta una mayor interacción de los elementos. Con esta interfaz se obtienen gráficas como la mostrada a continuación.

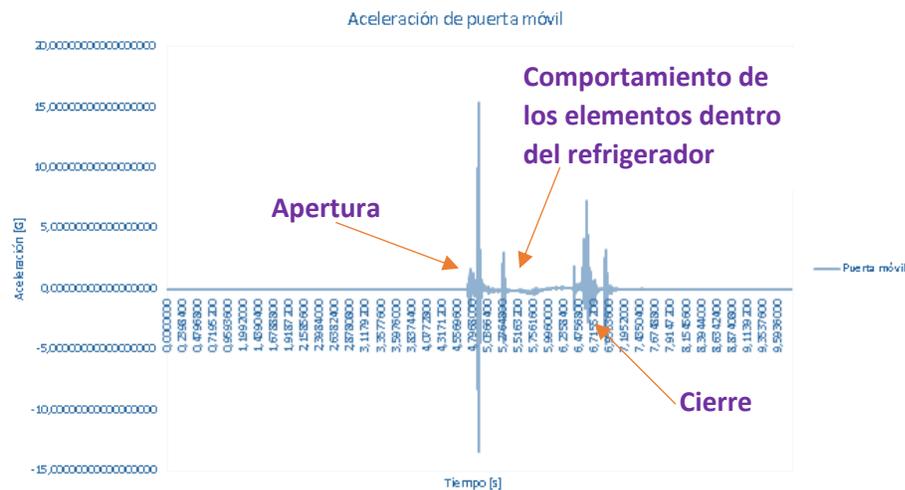


Ilustración 74 Aceleración de la puerta móvil (Interfaz Kistler)

El espectro de frecuencia de la señal es el siguiente:

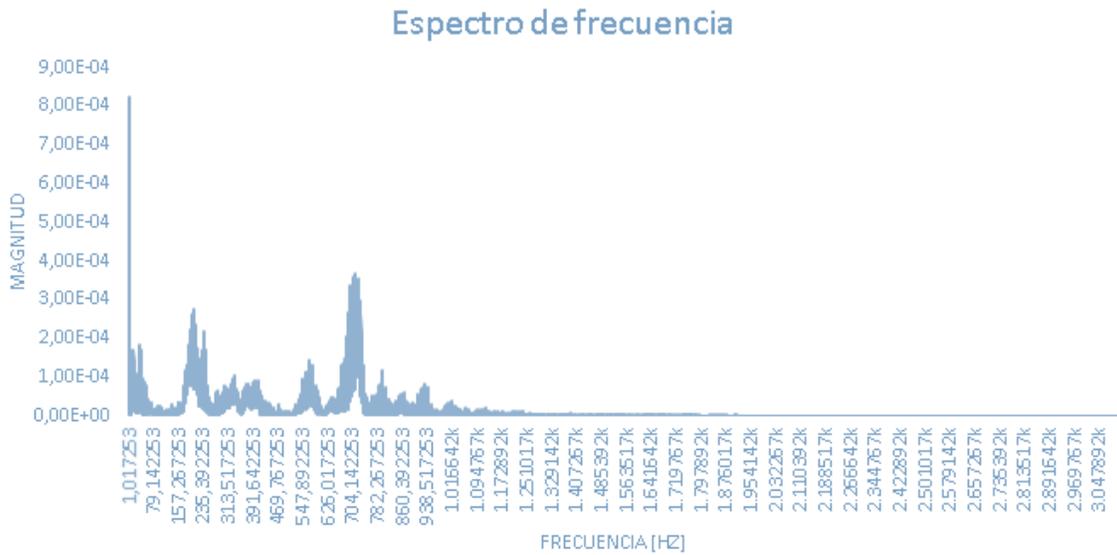


Ilustración 75 Espectro de frecuencia de la señal mostrada en la ilustración 67

A diferencia de los espectros de frecuencia mostrados en la ilustración 69, el espectro real de una señal de aceleración es el que se muestra en la ilustración 75, en ésta se pueden ver todas las diferentes componentes frecuenciales de los elementos que componen el refrigerador e incluso se pueden observar comportamientos inerciales del gabinete completo. La componente de mayor amplitud se encuentra en una frecuencia de cero, sin embargo, no es un dato significativo ya que representa la parte de la señal que no registró nada. Los valores realmente importantes son las componentes significativas que se encuentran alrededor de los 160 y 700 Hz ya que representan una gran cantidad de elementos vibrando a la misma frecuencia.



CAPÍTULO 6. IDENTIFICACIÓN DEL GRADIENTE DE PÉRDIDA DE FUNCIÓN

Matemáticamente la palabra gradiente hace referencia a la variación de una magnitud en función de otra variable en este caso el tiempo. Así pues, la importancia de esta investigación radica en la posibilidad de identificar los elementos que pierden su función con mayor rapidez, es decir, identificar el gradiente de pérdida de función de los elementos que componen el refrigerador durante el ciclo de vida útil de éste (aproximadamente 10 años). La identificación del elemento que ocasiona el posible modo de falla se consigue a partir de un análisis frecuencial y temporal de las señales que describen de forma correcta el comportamiento de los elementos durante pruebas de apertura y cierre bajo parámetros controlados como velocidades y aceleraciones constantes que producen la misma fuerza de apertura y cierre de puertas.

6.1 Desarrollo de prueba de impacto a partir de los datos obtenidos en el mapa sensorial

Actualmente las empresas realizan pruebas que aceleran el ciclo de vida de los refrigeradores para identificar si el diseño que han empleado hasta el momento funcionará de forma correcta, sin embargo, estas pruebas duran muchos días por lo que representan periodos de tiempo y costos elevados. Partiendo de los sistemas actuales, en esta investigación se plantea como propuesta de valor el desarrollo de un protocolo que permita identificar a partir de la frecuencia natural el gradiente de pérdida de función de los componentes significativos del refrigerador sin necesidad de realizar pruebas de larga duración.

A partir de los datos adquiridos durante las etapas previas en las que se realiza el reconocimiento del sistema, se diseñó una prueba en la que se puede identificar el comportamiento de los elementos que componen el sistema. De forma general, la prueba consiste en abrir y cerrar la puerta de un refrigerador instrumentado y adquirir las señales del comportamiento de las mismas por medio de los sensores previamente seleccionados (capítulo 5).

La acción de abrir y cerrar las puertas se realizará en tres modalidades diferentes; en las dos primeras partes, diferentes usuarios abrirán y cerrarán las puertas de forma normal y posteriormente de forma acelerada. La tercera modalidad consiste en abrir y cerrar la puerta de forma automática con el banco de pruebas diseñado, en esta parte se colocará un sensor más en la estructura para monitorear el comportamiento de la misma.

Para la realización de esta prueba se parte de la consideración de que la puerta es un cuerpo rígido por tal motivo se colocan acelerómetros en la superficie de la puerta a la altura de la línea de acción horizontal del eje de gravedad ya que es en este punto en el que se concentra la masa del cuerpo y al tener una figura regular también se concentra la acción de las fuerzas gravitacionales. Durante la prueba únicamente se abrirá y cerrará la puerta izquierda ya que es la que tiene el panel de sellado hermético por lo tanto se coloca un acelerómetro sobre la superficie de la puerta en movimiento y un acelerómetro en la puerta que permanecerá cerrada, esto último con el fin de analizar la reacción que el resto del sistema presenta ante el impacto de la puerta en movimiento. Adicional a estos sensores se colocará una celda de carga como se mencionó en el capítulo 5.

6.1.1 Objetivos

- Determinar por medio de los sensores colocados en el sistema y para cada una de las modalidades las gráficas de aceleración y fuerza que describe el sistema durante el ciclo de apertura y cierre.
- Generar el espectro de frecuencias de la señal que describe la puerta móvil para la identificación de los componentes del sistema.

6.1.2 Componentes

- Refrigerador de estudio GE-GNS23GMHES
- 2 acelerómetros Kistler 8704B500
- 1 acelerómetro Kistler 8044
- 1 celda de carga Kistler 9712B250
- DAQ NI USB 6341
- Acondicionador de señal Kistler LabAmp

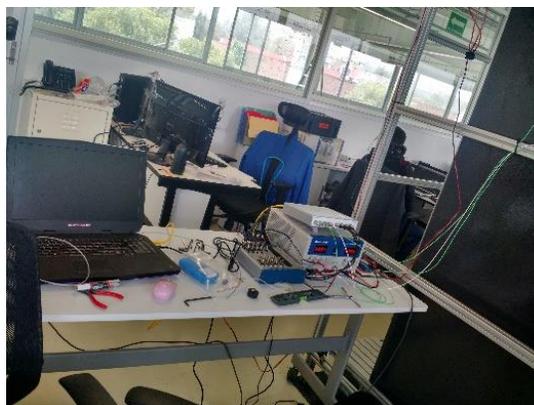


Ilustración 76 Instrumentos utilizados para la prueba de apertura y cierre

6.1.3 Protocolo para detección del gradiente de pérdida de función

6.1.3.1 Colocación de los sensores

Los sensores deberán colocarse sobre la superficie de la puerta exactamente en el punto en el que se encuentra el centro de gravedad. Los dos acelerómetros piezoeléctricos se colocarán en las puertas, uno se colocará en la puerta móvil y el otro se colocará en la puerta fija.

El propósito de colocar los acelerómetros en la misma línea de acción radica en que es el punto en el que se concentran las fuerzas gravitacionales que aplican en el sistema además de que al impactar la puerta móvil contra el gabinete, instantáneamente la aceleración y velocidad de ambas puertas serán las mismas debido a que ya que en el momento en que se lleva a cabo el impacto el sistema se detiene.

La celda de carga deberá colocarse al igual que los acelerómetros sobre el eje horizontal del centro de gravedad, la diferencia es que la celda se fijará debajo de la manija ya que es el punto en que se registra la mayor fuerza de impacto.

Para la modalidad de la obtención de señales con el banco de pruebas se deberá colocar el acelerómetro de carga sobre la estructura específicamente en el costado adyacente a la puerta móvil del refrigerador.

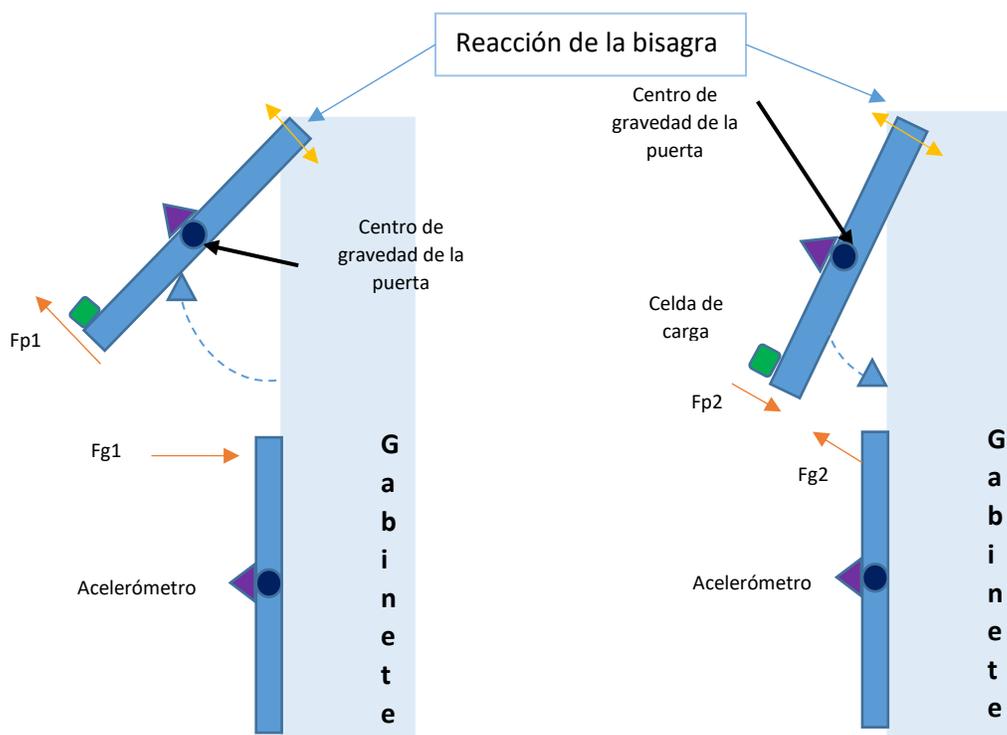


Ilustración 77 Diagrama de posicionamiento de los sensores (Visto desde un plano superior)

En la ilustración 77 se observa el diagrama de cuerpo libre del gabinete desde la vista superior, en el diagrama de la parte izquierda se describe el momento en que se realiza la apertura de la puerta, así como las fuerzas que influyen en este comportamiento, al abrir la puerta se aplica una fuerza (F_{p1}) y el gabinete reacciona con una fuerza en sentido contrario (F_{g1}) que se opone a este movimiento. En el diagrama de la parte derecha se puede observar el momento en que se realiza el cierre de puertas, cuando la puerta impacta en el gabinete transmitirá una fuerza (F_{p2}) que será absorbida por el gabinete y la regresará al sistema en sentido contrario (F_{g2}). En ambos diagramas se señala la reacción de la bisagra ante este movimiento.

6.1.3.2 Adquisición de la señal

Una vez que los sensores se colocaron de forma correcta, a través de las interfaces descritas anteriormente se adquirirán las señales de aceleración de cada puerta, la fuerza de impacto, la aceleración de la estructura y la posición angular.

Ambas interfaces y la interfaz de respaldo se iniciarán al mismo tiempo, después de dos segundos el sujeto iniciará con el ciclo de apertura y cierre, cuando la trayectoria de la puerta alcanza el punto final que es cuando se cierra la interfaz continuará adquiriendo por dos segundos más.

En el caso de la prueba con el banco se considera la programación del motor con rampas de aceleración y desaceleración controladas para conseguir que los intervalos de movimiento coincidan con los tiempos de trabajo de la interfaz.

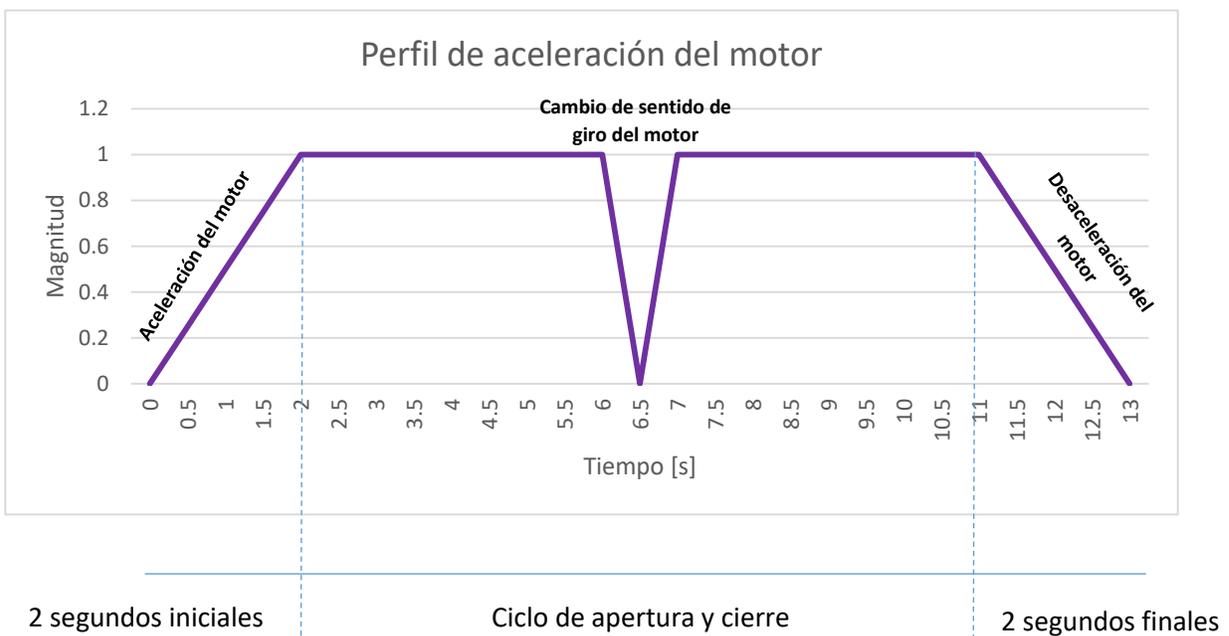


Ilustración 78 Gráfica en que se muestra el perfil de aceleración del motor comparado con el tiempo de adquisición



La razón principal de que la adquisición empiece antes y termine después consiste en evitar la pérdida de información al momento de separar la puerta del sello hermético y los efectos inerciales del gabinete cuando la puerta impacta.

6.1.3.3 Realización de la prueba

Para la modalidad en la que el usuario interactúa con el sistema, existen dos formas diferentes de realizar el ciclo de apertura y cierre, en la primera el usuario deberá abrir y cerrar la puerta del refrigerador de forma normal, sin impulsarla con una fuerza de gran magnitud; en la segunda modalidad el usuario nuevamente abrirá y cerrará la puerta imprimiendo una mayor fuerza al abrir y cerrar, de esta forma se consigue acelerar la puerta con lo que se lleva el sistema a rebasar los límites de diseño permisibles.

Esta primera iteración permitirá validar el protocolo planteado ya que una persona realiza movimientos precisos para abrir y cerrar un refrigerador lo que permitirá obtener señales con una menor influencia de ruido y en las que se pueda observar de mejor forma el comportamiento del sistema.

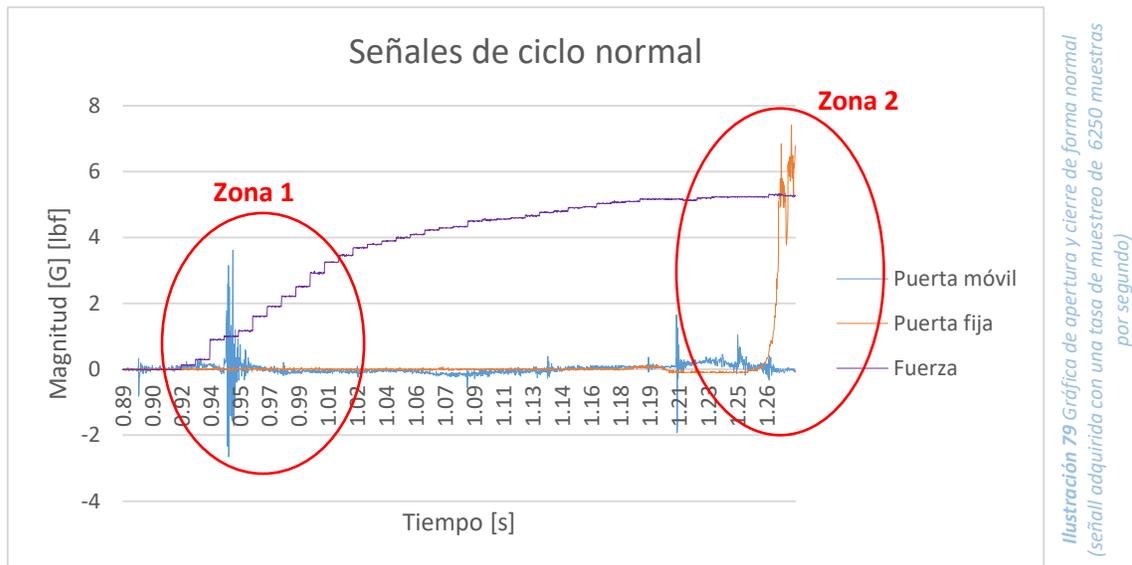
En la modalidad de la realización de la prueba con el sistema automático no se podrán modificar los parámetros bajo los que trabaja el banco de pruebas por lo que esta prueba servirá para comprobar que además de que el protocolo permite identificar el comportamiento del refrigerador también permite monitorear el comportamiento del propio banco.

- Prueba de apertura y cierre normal

El usuario deberá colocarse frente al refrigerador en la posición natural con la que comúnmente abre su refrigerador, una vez iniciada la adquisición el usuario esperará dos segundos para abrir la puerta hasta el límite de apertura permisible de la bisagra (160°), de forma natural efectuará el cierre de la puerta y el ciclo concluirá una vez que la puerta se cierra en su totalidad, al cabo de dos segundos la interfaz se detendrá.

Es importante mencionar que únicamente se adquieren las señales del comportamiento de un ciclo a la vez ya que de esta forma el refrigerador regresa a su posición de equilibrio y no almacena energía que se pueda transmitir de un ciclo a otro modificando el comportamiento de los elementos.

En la ilustración 79 se observa la gráfica que describe el sistema durante de la interacción de un usuario con el refrigerador durante el ciclo de apertura y cierre normal. En ella se pueden identificar dos zonas de relevancia, la zona uno es la magnitud de la aceleración producida al abrir la puerta y la zona dos es la magnitud de aceleración al cerrar la puerta. En el momento en que se realiza el cierre de puerta se puede observar la reacción de la puerta fija y (línea anaranjada) la cual absorbe



la energía durante el impacto y la regresa a la a la puerta. La línea morada representa el comportamiento dinámico de la celda de carga.

Es importante mencionar que cuando la puerta se abre y cierra de forma normal se produce una mayor aceleración (3.8G) producida por la fuerza necesaria para romper la inercia del sello hermético que la aceleración (1.8G) producida por la fuerza necesaria para cerrar la puerta. Si se analiza este comportamiento se puede pensar en el diseño de un sello hermético que evite el intercambio aire frío pero que no requiera una mayor fuerza para liberar la puerta.

- Prueba de apertura y cierre acelerada

La segunda modalidad de la prueba de apertura y cierre consiste en abrir y cerrar imprimiendo una fuerza de mayor magnitud para generar un impacto de gran magnitud cuando la puerta hace contacto con el gabinete. Para realizar esta prueba, el usuario se colocará frente al refrigerador y después de dos segundos que se haya iniciado la adquisición, el usuario deberá abrir la puerta rápidamente y la llevará hasta el límite de movimiento permisible, una vez abierta la puerta en su totalidad procederá a cerrarla imprimiéndole una fuerza de mayor magnitud, es importante considerar que esta fuerza dependerá de la anatomía de cada persona por lo que cada prueba en la

que interactúe un usuario será diferente. En esta prueba se registran dos patrones de cierre acelerado, el primero consiste en soltar la puerta antes de que esta impacte con el gabinete, el segundo patrón consiste en guiar la puerta hasta que ésta hace contacto con el gabinete lo que indica que se ha cerrado. Las gráficas que se generan durante esta prueba se muestran en la ilustración 80, al igual que la prueba anterior, la línea azul representa la aceleración de la puerta móvil, la línea anaranjada describe la señal de aceleración de la puerta fija y la línea morada es la fuerza que se aplica al sistema durante todo el ciclo. Nuevamente se pueden identificar dos zonas de interés en la gráfica, la zona uno que representa la apertura y la zona dos que representa el momento en que se realiza el cierre de la puerta.

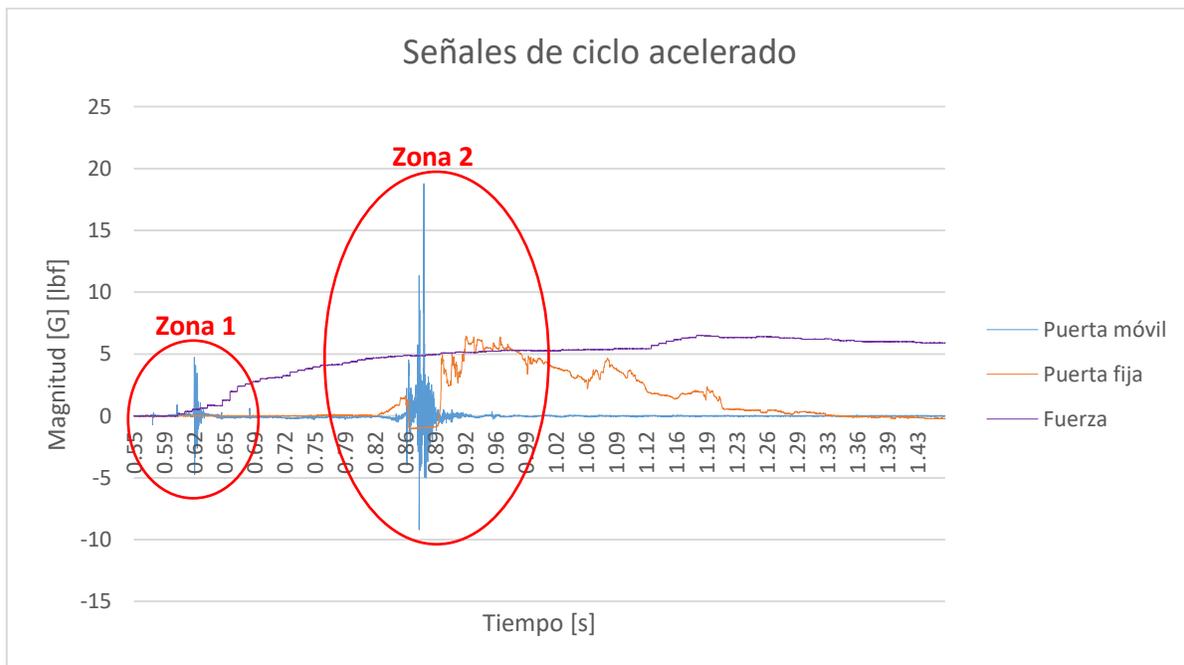


Ilustración 80 Gráfica de apertura y cierre de forma acelerada (señal adquirida con una tasa de muestreo de 6250 muestras por segundo)

En este tipo de iteración se puede observar que cuando la puerta se abre y cierra de forma acelerada, la aceleración que se produce al abrir la puerta es de menor magnitud lo que se traduce como una menor fuerza para romper la inercia del sello térmico. Caso contrario al momento en que se cierra la puerta ya que debido a la fuerza que se le imprimió durante la trayectoria de cierre se consigue una mayor excitación a los elementos lo que produce una vibración de mayor magnitud.

La señal de la puerta fija permanece en reposo durante la apertura de la puerta móvil, sin embargo, reacciona en el momento en que se lleva a cabo el impacto ya que absorbe la energía y la trasmite al sistema en sentido contrario.

- Prueba de apertura y cierre con banco de pruebas automático

La última de las modalidades consiste en realizar el ciclo de apertura y cierre a partir de la acción de un sistema automático capaz de abrir y cerrar la puerta con parámetros controlados de tal forma que permita la repetitividad del ciclo. Para esta prueba es necesario colocar un acelerómetro adicional en la estructura para monitorear el comportamiento de la misma durante el ciclo e identificar la magnitud de la vibración que le transmite al sistema.



Ilustración 81 Sujeción del brazo a la manija del refrigerador realizado con cable acerado y recubrimiento plástico

El brazo del banco de pruebas deberá sujetarse a la manija de la puerta izquierda a la altura de su centro de gravedad. Una vez iniciadas ambas interfaces e incluso la interfaz de respaldo, se enciende el motor que tardará dos segundos en acelerar hasta conseguir moverse para abrir la puerta, cuando éste alcance la apertura máxima permitida por la bisagra cambiará de sentido de giro de forma casi inmediata ya que tardará 0.1 [s] en realizar la acción. Posteriormente cuando el motor gire en sentido contrario guiará la puerta hasta que ésta cierre totalmente, en este instante el motor se desacelerará en dos segundos hasta llegar a su estado de reposo, este tiempo es el mismo que la interfaz seguirá adquiriendo hasta detenerse. La ilustración 82 muestra la gráfica de aceleración que genera la puerta en movimiento, en ella se describe una vibración de mayor magnitud al abrir (zona 1) que la vibración que experimenta el sistema al cerrar (zona 2),

cabe mencionar que en el intervalo que existe entre ambos impactos se registran pequeños picos y valles de menor magnitud que corresponden al movimiento de los elementos del sistema automático.

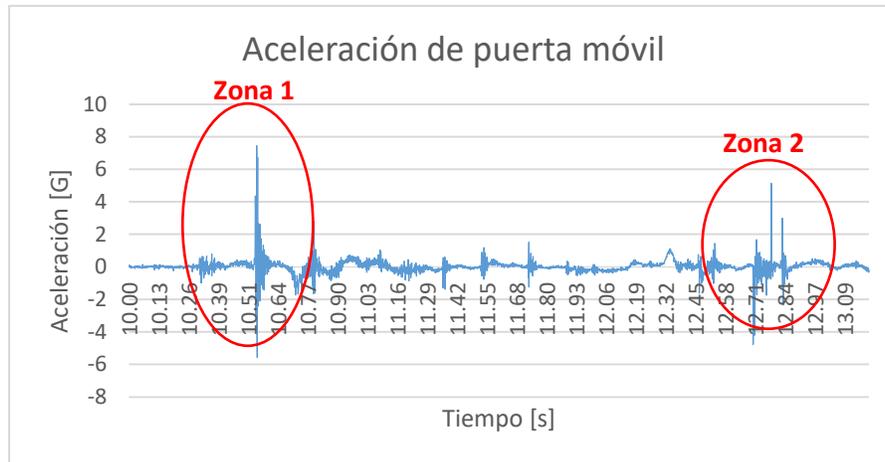


Ilustración 82 Gráfica que describe el comportamiento de la puerta móvil durante el ciclo de apertura y cierre con el banco de pruebas (señal muestreada a una frecuencia $F=1\text{KHz}$)

La ilustración 83 es una gráfica que brinda información importante sobre el sistema ya que se presentan las señales de aceleración que genera el gabinete y el acelerómetro de carga colocado en la estructura (línea azul). Se puede observar que ambos siguen la misma tendencia, pero varía la magnitud de la señal. De forma general se puede percibir la señal producida por el banco como ruido ya que es una señal que oscila entre los 0.2 y -0.2 G, magnitud que no es significativa para el comportamiento del sistema. La línea anaranjada de esta gráfica corresponde al comportamiento del gabinete que si bien es cierto es de menor magnitud si permite observar el momento en que éste absorbe la energía del impacto y la regresa al sistema.

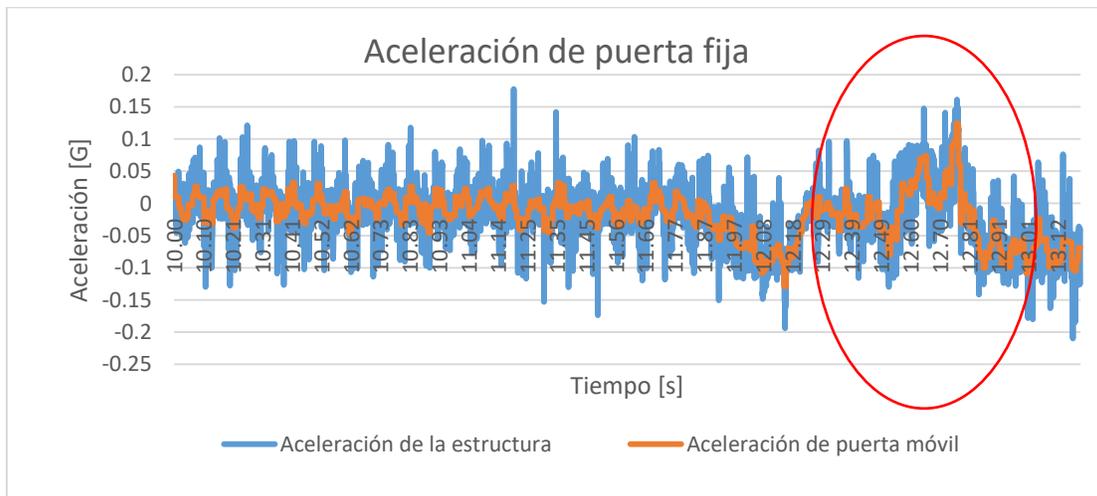


Ilustración 83 Gráfica que describe el comportamiento de la aceleración producida por la estructura y el gabinete (Señal muestreada a una frecuencia de 1KHz)

A pesar de que la tendencia de ambos sensores es muy parecida, en la gráfica de aceleración del sensor de la estructura se pueden apreciar dos picos que alcanzan magnitudes de 0.14-0.17 [G] y se encuentran alrededor de los 11.14 y 11.42 segundos, éstos representan la reacción del sistema en el momento en que la puerta se abre, si observamos la ilustración 81 se puede ver que la apertura se lleva a cabo en el intervalo de 10.26-10.77 segundos, esta diferencia es el tiempo que tarda en transmitirse el movimiento de la puerta a la estructura.

Finalmente, en la ilustración 84 se muestra la gráfica de la fuerza que percibe el sistema durante el ciclo completo desde que la puerta se libera del sello hermético hasta que cierra totalmente.



Ilustración 84 Gráfica de fuerza que experimenta el sistema durante el ciclo completo (señal muestreada a una frecuencia $F=1$ KHz)

6.1.3.4 Procesamiento de la información

El procesamiento de la información es uno de los pasos más importantes del protocolo ya que a partir de las operaciones empleadas para acondicionar las señales se genera información de valor que permite entender el fenómeno que se está analizando. Como ya se ha mencionado, la Transformada de Fourier permite ir del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia para entender aspectos que no son claros desde el punto de vista temporal.

A partir de las interfaces programadas se puede obtener el espectro de frecuencia de cada señal, sin embargo, en esta investigación el análisis frecuencial se centra en el comportamiento de la puerta móvil ya que es ésta la que tiene un mayor número de componentes además de que es la que tiene un comportamiento dinámico durante la prueba.

Se eligió una señal significativa para cada modalidad de la prueba, es decir, apertura y cierre normal, apertura y cierre acelerado y apertura y cierre con el banco de pruebas. En las siguientes secciones se explica a detalle cada una de ellas.

- **Ciclo de apertura y cierre normal**

El espectro de frecuencia que se muestra en la ilustración 84 representa las componentes de frecuencia y magnitud de la señal de aceleración que describe la puerta cuando un usuario la abre y cierra de forma normal. Se puede identificar de forma clara que alrededor de 50 Hz se encuentran las componentes significativas de la señal, lo cual quiere decir que cuando el sistema se somete a la acción de una fuerza moderada, los elementos que vibran a frecuencias que van desde 1.1 a 60 Hz tienen mayor interacción en el fenómeno.

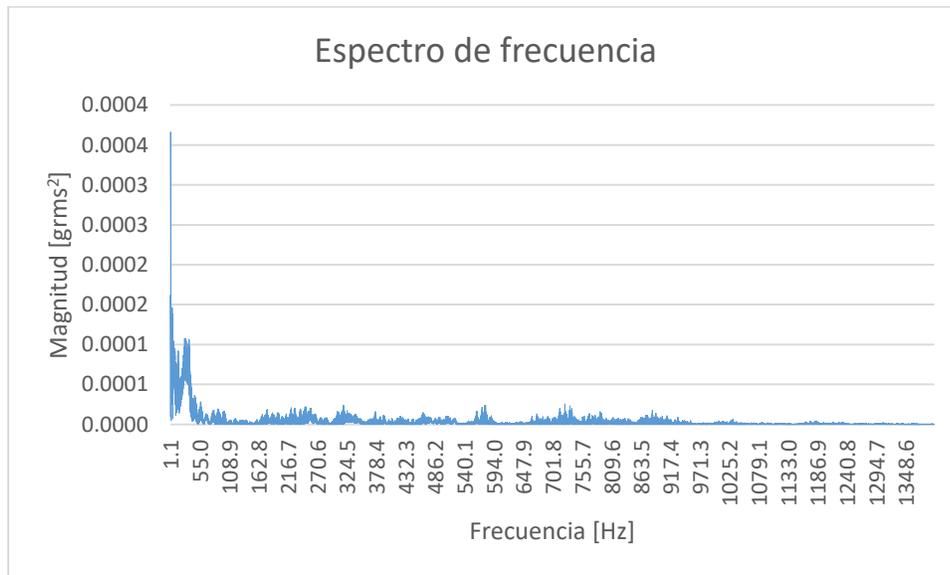


Ilustración 85 Espectro de frecuencia de la gráfica descrita por la puerta móvil cuando se realiza el ciclo de apertura y cierre normal (ilustración 78)

Otro aspecto que es importante destacar es que la fuerza aplicada en esta modalidad no es suficiente para activar todos los elementos que componen el sistema. Alrededor del origen, es decir, 0 Hz se puede ver una componente de gran magnitud que no es parte del comportamiento del sistema ya que corresponde a los intervalos en los que no se adquieren datos.

- Ciclo de apertura y cierre acelerado

La segunda modalidad para que un usuario interactúe con el sistema consiste en aplicar una fuerza de mayor magnitud para que impulsar la puerta y ésta impacte con el gabinete a una velocidad de mayor magnitud, por ende, la fuerza de impacto también será de gran magnitud.

A diferencia de la modalidad de apertura y cierre normal, en esta prueba se puede observar que existen componentes significativas que trabajan a frecuencias un poco menores que un 1KHz, comparadas con la componente de mayor magnitud que trabaja en un rango de 50-60 Hz, se puede decir que corresponden a elementos que vibran a alta frecuencia. En la ilustración 85 se observa el espectro de frecuencia de una iteración de apertura y cierre acelerado lo que indica que cuando se aplica una mayor fuerza al sistema entran en funcionamiento una mayor cantidad de elementos que no interactuaron en la modalidad anterior, incluso podrían ser elementos que comienzan a vibrar a partir de que a puerta impacta contra el gabinete ya que no debe despreciarse el comportamiento del mismo pues al ser una gran masa tienen efectos inerciales que no pueden despreciarse del análisis.

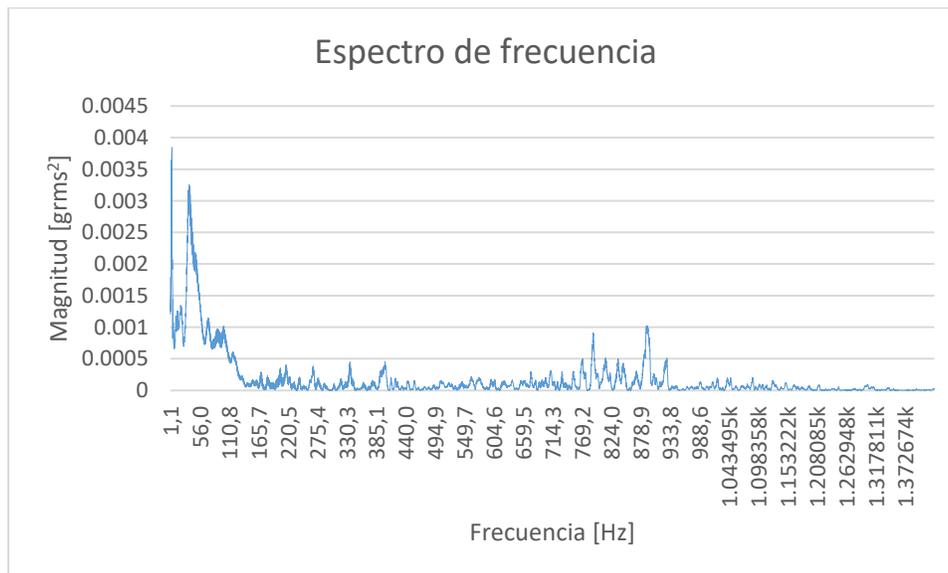


Ilustración 86 Espectro de frecuencia de la gráfica descrita por la puerta móvil cuando se realiza el ciclo de apertura y cierre acelerado (ilustración 79)

Al igual que en la modalidad de apertura y cierre normal, en este espectro de frecuencias se puede identificar una componente de mayor magnitud alrededor del origen lo que representa los el ruido inminente en el sistema.

- Apertura y cierre con banco de pruebas automático

Esta última prueba presenta un comportamiento similar al de la prueba de apertura y cierre normal ya que en el momento de abrir la puerta el brazo accionado por el motor genera un mayor par considerando el brazo de palanca que el sistema representa, lo que se traduce como una fuerza perpendicular aplicada en el centro de masa del refrigerador para romper la inercia del sello térmico. Caso contrario al momento en que cierra la puerta pues el motor empieza a desacelerar y disminuye la inercia que lleva la puerta por lo que el impacto de la puerta contra el gabinete no es de mayor magnitud.

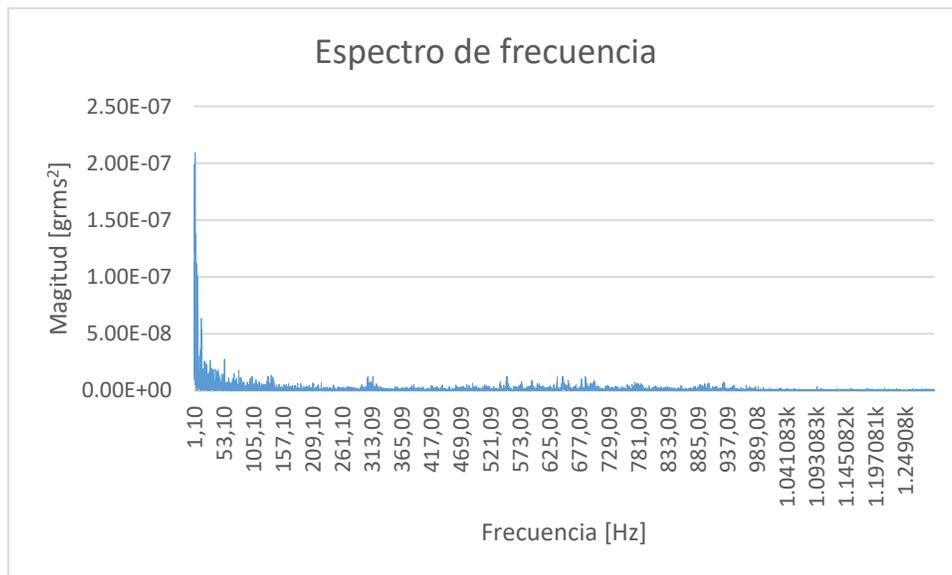


Ilustración 87 Espectro de frecuencia de la gráfica descrita por la puerta móvil cuando se realiza el ciclo de apertura y cierre con el banco de pruebas (ilustración 81)

Observando la ilustración 87 se puede aseverar que el comportamiento del banco produce un movimiento uniforme que se refleja en el espectro de frecuencia en el que nuevamente se observan componentes de mayor magnitud trabajando a bajas frecuencias.

Si bien es cierto que el sistema automático permite convertir algunas variables en constantes, es importante modificar los parámetros del mismo para conseguir activar todos los elementos que componen el sistema y de esta forma analizar el comportamiento general.

Hasta este punto el desarrollo del protocolo se puede validar si se conocen las frecuencias naturales de cada elemento que compone un refrigerador, e esta forma se pueden identificar cada una de las componentes frecuenciales presentes en un espectro. Sin embargo, hasta el momento en que esta investigación fue reportada aún no se podía acceder a dicha información.

6.2 Resultados: Identificación del gradiente de pérdida de función

A partir de la obtención de datos de todas las pruebas realizadas a lo largo de esta investigación se pueden arrojar resultados que influyen de forma directa en la caracterización del sistema, así como brinda datos duros del comportamiento del mismo para identificar las zonas problemáticas y que pueden tener mayor repercusión a lo largo de la vida útil del sistema.

En el apartado anterior se comentó que no fue posible identificar de forma analítica la frecuencia natural de cada elemento del refrigerador por lo que optó por relacionar el comportamiento de la puerta por medio de las señales de aceleración con la trayectoria angular que la misma describe, así como el tiempo en que se realiza cada una de las acciones significativas.

Para identificar el gradiente de pérdida de función del sistema se optó por realizar un análisis de la señal de aceleración que describe el comportamiento de la puerta en movimiento, cada señal adquirida tiene la naturaleza de la señal que se muestra en la ilustración 88, la línea azul representa la señal original, sin embargo al ser una señal ruidosa no muestra el comportamiento real del sistema por tal motivo fue necesario aplicar un filtro sencillo para obtener la señal fundamental de aceleración. Para realizar el filtrado de la señal se utilizó una herramienta que se desprende de la transformada de Fourier y se le conoce como wavelet de Daubechies. (Daubechis, 1992)

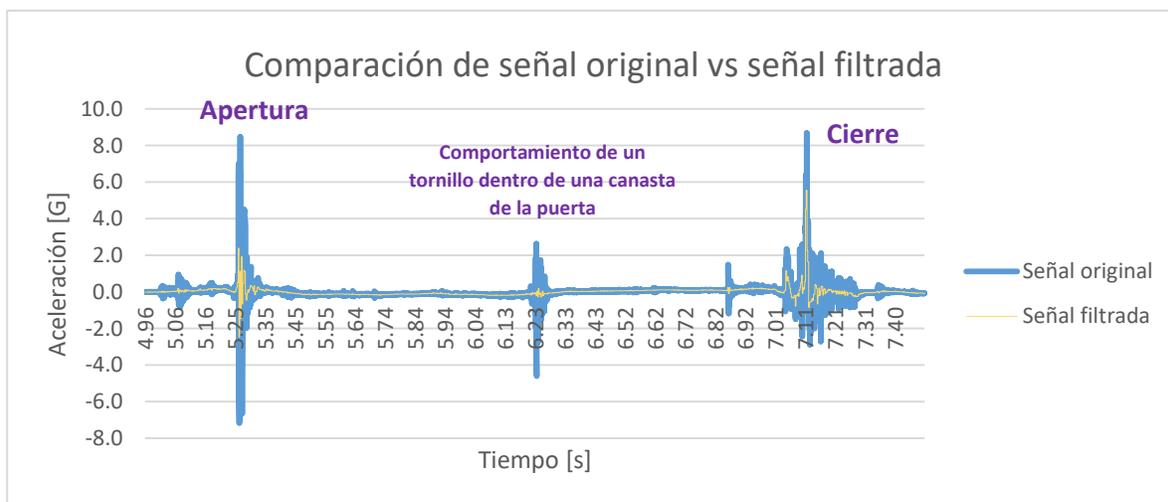


Ilustración 88 Comparación de señal de aceleración de puerta móvil original contra la misma filtrada.

Una vez aplicado el filtro, la señal fundamental de la vibración se representa por la línea amarilla.

Para la obtención del gradiente de pérdida de función se aplicó el filtro únicamente al ciclo de apertura y cierre acelerado y de forma análoga al ciclo de apertura y cierre con el banco de pruebas.

Se realizó de esta forma para identificar las similitudes entre la fuerza aplicada por el usuario y la fuerza aplicada por el motor para realizar la acción además de que se puede identificar el comportamiento dinámico del banco de pruebas. Las gráficas obtenidas se explican a continuación.

- **Prueba de impacto acelerado**

La ilustración 88 muestra diez iteraciones en las que se observa la aceleración de la puerta móvil, en la zona uno se destaca el momento en que se abre la puerta que por la naturaleza de la prueba es de menor magnitud que el momento cuando ésta se cierra (zona dos).

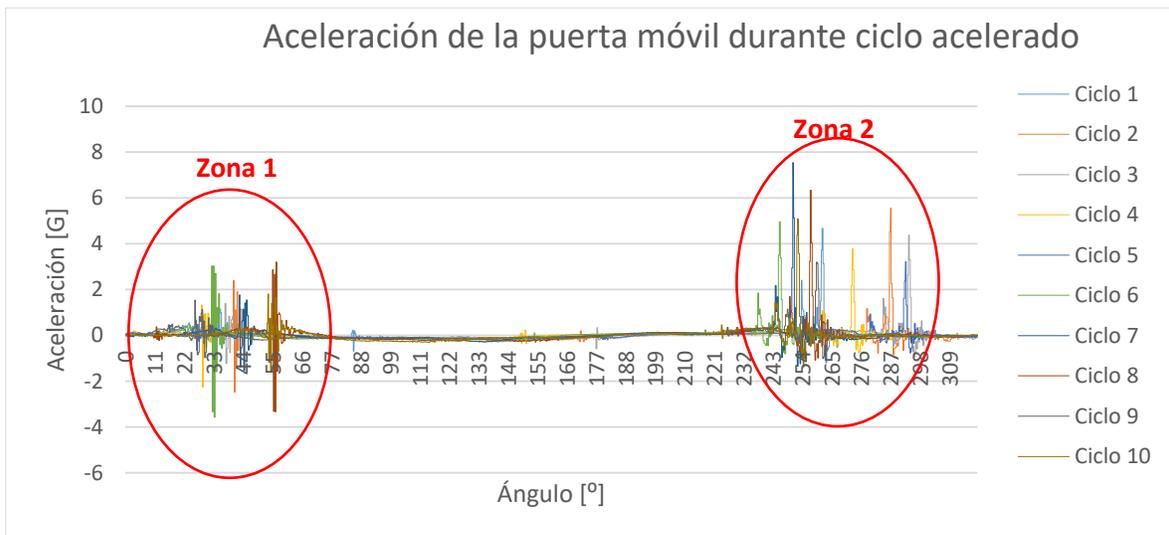


Ilustración 89 Gráfica en la que se muestran 10 ciclos de apertura y cierre acelerado para identificación del gradiente de pérdida de función (Señal adquirida a 6250 datos por segundo y realizada por usuario de 1.75 [m] y 68 [Kg])

Con este protocolo se puede reducir el tiempo que dura una prueba actual ya que no es necesario realizar 1, 000,000 de iteraciones para determinar el comportamiento del sistema y con ello el posible modo de falla. Basándose en que la frecuencia natural de un elemento no cambia, la señal temporal tendrá siempre la misma tendencia por lo que se analiza el primer ciclo ya que es cuando todos los elementos están en la posición correcta y al cabo de diez iteraciones se analiza el último ciclo, es decir, se compara el primero contra el último ciclo para identificar la variación entre la magnitud de cada pico y valle de la gráfica. La comparación para esta prueba se muestra en la ilustración 90.

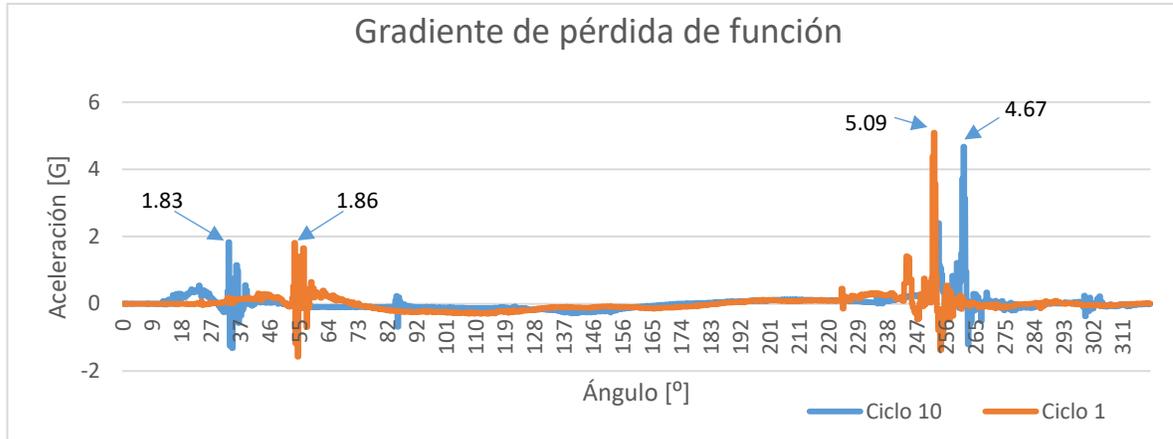


Ilustración 90 Gráfica comparativa entre el primer y el último ciclo

Porcentaje de pérdida de función en la apertura

$$\% \Delta R = \frac{V_I - V_F}{V_I} * 100 = \frac{1.86 - 1.83}{1.86} * 100 = 1.61\%$$

Porcentaje de pérdida de función en el cierre

$$\% \Delta R = \frac{V_I - V_F}{V_I} * 100 = \frac{5.09 - 4.67}{5.09} * 100 = 8.25\%$$

Los resultados obtenidos de esta prueba reflejan de forma directa el desgaste de los componentes del gabinete que si bien es cierto son cifras de magnitudes pequeñas, representan la medida en que el componente dista del comportamiento ideal.

Al ser una prueba en la que se tiene la influencia humana, se consigue un movimiento preciso en cada iteración por lo que un filtro básico permite rescatar la señal fundamental de la puerta y analizar de esta forma su trayectoria ya que el ruido provocado por el usuario al abrir y cerrar no es significativo en comparación con la vibración del sistema.

- Prueba de impacto acelerado

De la misma forma que se realiza el análisis para una prueba de impacto acelerado se analiza el comportamiento de una prueba realizada de forma automática. En la ilustración 91 se pueden identificar las zonas de importancia, apertura y cierre.

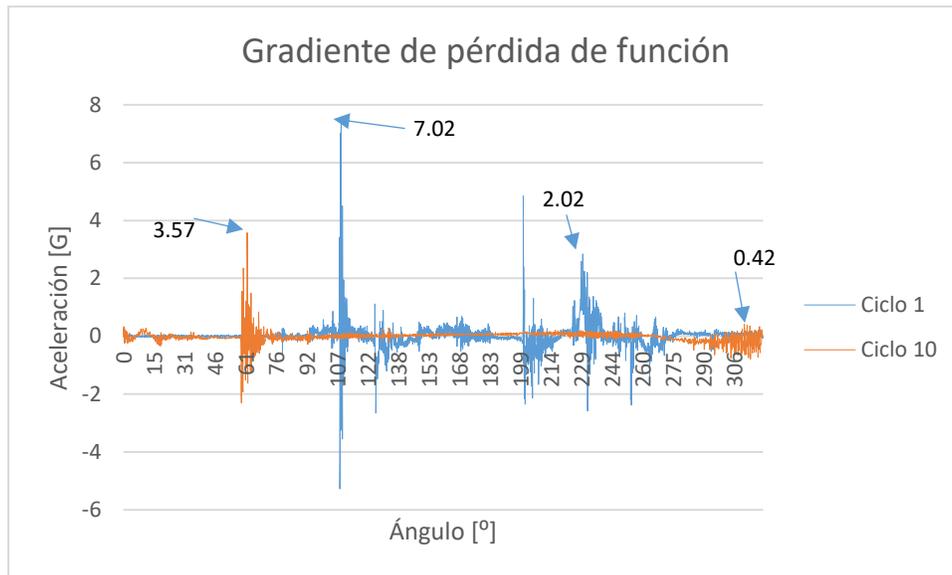


Ilustración 91 Gráfica comparativa entre el primer y el último ciclo con sistema automático

A diferencia de las señales producidas por pruebas en las que un usuario interactúa con el sistema, las señales que se generan con un sistema automático son más ruidosas ya que se observa el comportamiento de los elementos que componen la estructura.

Porcentaje de pérdida de función en la apertura

$$\% \Delta R = \frac{V_I - V_F}{V_I} * 100 = \frac{7.02 - 3.57}{7.02} * 100 = 49.15\%$$

Porcentaje de pérdida de función en el cierre

$$\% \Delta R = \frac{V_I - V_F}{V_I} * 100 = \frac{2.02 - 0.42}{2.02} * 100 = 79\%$$



Un sistema automático que trabaje bajo parámetros controlados tiene como función principal general movimientos precisos que sean comparables con la acción de un usuario real de tal forma que brinde confianza para reemplazar la acción humana por el trabajo de una máquina.

Al analizar los resultados obtenidos se puede identificar que los valores del gradiente no pertenecen al 100% a las vibraciones del refrigerador ya que, comparando los resultados con la prueba anterior, en esta su magnitud incrementa más de 10 veces. Pero ¿Qué significan estas variaciones? pues bien, estos resultados implican que la estructura del sistema automático induce ruido mecánico al sistema lo que evita que se obtengan señales que expresen de forma concreta el comportamiento de la puerta.

Sin embargo, aunque pareciera que esta información es errónea, permite comprobar la aplicabilidad del protocolo pues durante esta prueba se puede monitorear de forma simultánea el comportamiento del banco, así como las desalineaciones que influyen en el desempeño del refrigerador. Este último punto permite mencionar que los resultados obtenidos cumplen con los objetivos de esta investigación ya que a partir del protocolo propuesto se puede identificar la pérdida de la función del sistema.

Actualmente se encuentra en proceso de desarrollo un banco de pruebas mecatrónico que sea capaz de aislar el ruido mecánico del comportamiento del sistema para adquirir señales con menor interferencia mecánica.



CAPITULO 7. CONCLUSIONES

A lo largo de esta investigación se ha trabajado en el desarrollo un protocolo que tenga la versatilidad de ser aplicable a distintos sistemas que presenten un comportamiento similar, es decir, sistemas que puedan abrir y cerrar, así como algunos otros que desempeñen una tarea de forma repetida.

Este trabajo representa la base de una larga y compleja investigación que implica el desarrollo de un sistema flexible de predicción de fallas en tiempo real que pueda utilizarse para “medir” la confiabilidad de sistemas mecatrónicos complejos. Como se mencionó en la hipótesis, la investigación involucra diferentes áreas de la ingeniería como la selección de materiales, la instrumentación, adquisición de señales y principalmente el diseño mecánico que se ve reflejado directamente en el comportamiento del gabinete y de cada uno de sus componentes.

De forma general un ciclo de apertura y cierre de un refrigerador es una acción que se ha vuelto común en nuestra vida cotidiana y aunque parezca un problema trivial repercute directamente en el funcionamiento del electrodoméstico y este a su vez implica elevados costos de fabricación debido a su constante rediseño. Al realizar un análisis de este tipo en el que se trata de ver la ciencia que existe detrás de esta acción se obtienen resultados interesantes que pueden servir para plantear el diseño de los elementos principales.

Algunos resultados ayudan a concluir que existen elementos en la puerta que únicamente fueron colocados para tratar de resolver pequeños problemas que surgen a partir de un mal diseño de los componentes principales, tal es el caso de las gomas en las esquinas superiores de cada puerta que tratan de reducir el impacto en el gabinete y la deformación del mismo como consecuencia de una pequeña fuerza puntual aplicada constantemente. Otro elemento que se colocó para corregir un comportamiento no deseado es la pequeña palanca precargada que forma parte de la bisagra superior y le ayuda a soportar la carga de la puerta para evitar que esta se desalinee con el paso del tiempo, también obliga a las puertas a mantenerse cerradas pues por la carga que soporta sería complicado mantenerla en la posición correcta.

El análisis del comportamiento del sistema es la primera parte del protocolo ya que genera los parámetros para seleccionar los instrumentos adecuados para obtener las señales del



comportamiento del sistema y realizar un análisis cuantificable de cada una de las variables involucradas tales como aceleración (vibración), velocidad, posición y fuerza.

Posteriormente un análisis frecuencial y temporal permite identificar el comportamiento de los elementos que influyen directamente en los momentos importantes del ciclo que es cuando la puerta se libera del sello hermético y cuando la misma cierra totalmente (en gráficas se identifican como dos impactos). Esta información sirve de apoyo para identificar y caracterizar el comportamiento de los elementos y a partir de esto predecir cuál de los elementos presentará una mayor probabilidad de falla.

Un punto importante que aún queda por mencionar es que analizar el comportamiento de una puerta cuando existe la interacción de un humano es complicado pues involucra variables que no se pueden controlar ya que cada persona realiza la acción de forma diferente, esta es la razón principal por la que se debe diseñar un sistema que permita abrir y cerrar la puerta de forma automática bajo parámetros controlados. El diseño que se planteó durante esta investigación se logró implementar. Sin embargo, aún es un tema que está en desarrollo para mejorar el comportamiento de la estructura y reducir el desalineamiento.

Es importante mencionar que este protocolo se encuentra en una etapa temprana pues es necesario que se realice un procedimiento complejo por medio del modelo 3D del sistema o la implementación de pequeños bancos de pruebas para identificar la frecuencia natural de los componentes y poder generar una correlación entre el dato obtenido y la componente frecuencial del elemento. Una vez que se tenga un protocolo probado se podrá implementar en un sistema que permita identificar en tiempo real y de forma precisa la falla que genera el sistema para obtener los parámetros de rediseño.

El avance actual permite identificar de forma cualitativa la zona del sistema que tiene mayor probabilidad de falla ya que se tiene control de la trayectoria comparándola con la posición angular y el tiempo para saber en qué momento entra en acción cada elemento.

Se puede decir que una investigación de vinculación con la industria demanda una alta concentración y la capacidad de diferenciar entre los entregables que una empresa requiere y los entregables académicos que en ocasiones representa intereses diferentes. Como Ingeniera del área de mecatrónica me queda la satisfacción de participar en un proyecto que me permitió aplicar los



conocimientos técnicos adquiridos a lo largo de la maestría para generar una solución viable a un problema real y con ello plantear la base del desarrollo de un a investigación doctoral.

Finalmente me gustaría decir que un grado de maestría en cualquier especialidad tiene la bondad de general la capacidad de análisis e investigación que enriquece el pensamiento abstracto que desarrollamos durante la licenciatura, pero la maestría en ingeniería mecánica permite el acercamiento con el mundo real.

7.1 Contribución

Al implementar una solución a un problema real que afecta a la industria de los electrodomésticos en este caso, puedo asegurar que el desarrollo del protocolo que se plantea en esta investigación contribuye de forma directa en la reducción de los costos destinados a una prueba de identificación de fallas en los sistemas ya que no es necesario correr numerosas iteraciones para generar un modelo que permita predecir de forma precisa el elemento que fallará, así como la causa de la falla.

Como ya se mencionó, este protocolo permitirá generar una base sólida para continuar con la investigación hasta conseguir generar un sistema flexible que permita monitorear las variables en tiempo real para que posteriormente arroje un resultado concreto acerca de la causa que provoca la falla en el sistema. Si bien es cierto que este sistema se encuentra en una etapa temprana, tiene objetivos alcanzables y que pueden ser perfectamente aterrizados en un sistema real.

Aún falta un largo camino que recorrer para generar un sistema flexible que aplicado a diferentes sistemas permita obtener resultados certeros, sin embargo, se presentan las bases sólidas para continuar con el desarrollo del mismo.



7.2 Trabajo futuro

El trabajo que aún se debe realizar representa un reto para diferentes áreas de la ingeniería pues involucra conocimientos de electrónica y mecánica unidos por medio del procesamiento de señales que es el área que permite analizar el comportamiento físico de un sistema por medio de modelos matemáticos. Para conseguir un sistema robusto de predicción de fallas se deben desarrollar diferentes tareas como:

- Diseño e implementación de bancos de pruebas para la caracterización e identificación del modo de vibraciones de componentes específicos.
- Identificación del comportamiento de un elemento manufacturado en diferentes calibres para generar nomogramas que permitan el fácil manejo de los parámetros de diseño.
- Diseño e implementación de un banco de pruebas que permita generar señales que describan el comportamiento del sistema sin inducir vibraciones mecánicas significativas al sistema de estudio.
- Realizar el diseño y la implementación de un sistema flexible capaz de identificar fallas en tiempo real.
- Plasmar el conocimiento adquirido en una publicación internacional en la que se especifique la interacción que existe entre un sistema mecánico y el ser humano para identificar el comportamiento de un sistema.
- El trabajo realizado en esta investigación representa un peldaño que permite establecer un análisis para la caracterización de sistemas mecánicos, sin embargo, como ingeniera mecatrónica quiero proponer una investigación doctoral en la que pueda conjuntar el conocimiento adquirido hasta el momento para escalar el protocolo y poder identificar fallas en sistemas mecatrónicos.

Apéndice A: Instrumentación

A.1 Acelerómetro de carga

Acceleration - AVC

KISTLER
measure, analyze, innovate.

Quartz

Type 8044

High Resonant Frequency, Charge Mode, Shock Accelerometer

Small, light weight accelerometer for measuring impulse and high impact shock.

- High impedance charge mode
- Wide measuring range
- Stable quartz element
- Lightweight, miniature package

Description

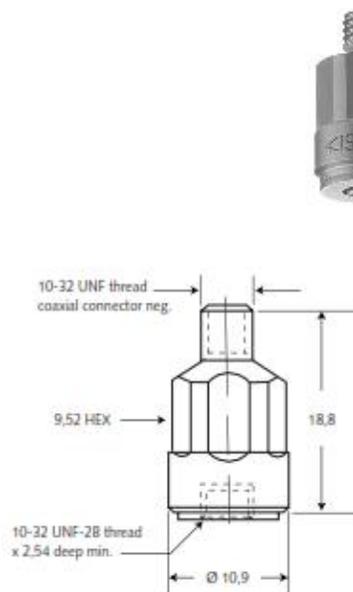
The 8044 accelerometer measures mechanical shock up to 30'000g. A stable quartz element design with a 90k Hz resonant frequency ensures accurate measurements and allows the unit to undergo high and repeated shock impacts with virtually no zero shift.

Contained within the sealed housing is a piezoelectric assembly consisting of a seismic mass preloaded to a quartz element stack. The force acting on the quartz measuring element is proportional to the acceleration in accordance with Newton's Law: $F=ma$. The element in turn, yields an electrical charge proportional to the force, and therefore to the acceleration. Due to the amount of pre-load on the quartz stack, the accelerometer can withstand acceleration greater in one direction than in the other. Therefore, it should not be exposed to accelerations greater than specified in its negative direction (force directed through the connector to the base).

The measurement range of the accelerometer is adjustable when used with a laboratory style charge amplifier. The Types 557 or 558 impedance converters are a lower cost alternative to the laboratory amplifier allowing the measurement system to take on the appearance of the traditional voltage mode accelerometer and power supply/coupler.

Application

Type 8044 is ideally suited for measuring and analyzing shock and vibration with very high amplitudes of acceleration. Typical applications include: high amplitude shock measurements, metal impacting, and explosive forming. The accelerometer's size and mass enable it to be used on small and lightweight objects without influencing their proper vibration mode.



CE Compliant Information

Because high impedance, charge mode accelerometers contain no electronics, CE certification to the EMC Directive is not appropriate. When a high impedance accelerometer is used with a CE certified signal conditioner (i.e., charge amplifier...), it is said that this system is CE compliant.

8044_000-209e-05.05



High Resonant Frequency, Charge Mode, Shock Accelerometer

KISTLER
measure, analyze, innovate.

Technical Data

Type	Units	8044
Acceleration Range	g	-20000 ... 30000
Acceleration Limit	g	-30000 ... 100000
Transverse Acceleration Limit	g	20000
Sensitivity	pC/g	-0,3
Threshold	g _{rms}	0,07
Resonant Frequency, mounted, nom.	kHz	90
Frequency Response ±5%	Hz	0 ... 8000
Amplitude Non-linearity	%FSO	±1
Insulation Resistance @ R.T.	Ω	>10 ¹¹
Capacitance, nom.	pF	60
Transverse Sensitivity	%	±5
Base Strain Sensitivity @250µr	g/µr	0,3
Long Term Stability	%	1
Temperature Coefficient of Sensitivity	%/°C	-0,02
Temperature Range Operating	°C	-195 ... 200
Construction		
Sensing Element	type	quartz/ compression
Housing/Base	material	17-4 PH St. Stl.
Sealing Housing/Connector	type	welded epoxy
Connector	type	10-32 neg.
Weight	grams	7
Mounting Torque	Nm	2,7

1 g = 9.80665 m/s², 1 inch = 25.4 mm, 1 gram = 0.03527 oz, 1 lbf-in = 0.1129 Nm**Mounting**

The 8044 accelerometer can be attached to the test structure by a high strength 10-32 stainless steel stud. Reliable and accurate measurements require that the mounting surface be clean and flat. The application of Loctite epoxy is advisable to prevent loosening of these mounting studs in high g applications. In addition, it is recommended that the contacting surface between the accelerometer and the mounting face be lubricated with a thin layer of grease. The Operating Instruction Manual for the shock accelerometer provides detailed information regarding mounting surface preparation.

Accessories Included

- | | | | | | |
|--|---|-------------|--|--|------|
| <ul style="list-style-type: none"> • mounting stud, 10-32 UNF thread,
17-4 St. Stl. (7,1 mm long) | <table border="0"> <tr> <td style="text-align: right;">Type</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>8404</td> </tr> </table> | Type | | | 8404 |
| Type | | | | | |
| | 8404 | | | | |

Optional Accessories

- | | | | | | |
|---|---|-------------|--|--|------|
| <ul style="list-style-type: none"> • adaptor for triaxial mounting | <table border="0"> <tr> <td style="text-align: right;">Type</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>8504</td> </tr> </table> | Type | | | 8504 |
| Type | | | | | |
| | 8504 | | | | |

Ordering Key

Shock Accelerometer	-	8044
---------------------	---	------

8044_000-209e-05.05

Page 2/2

Kistler Instrument Corporation reserves the right to discontinue or change specifications, designs or materials without notice consistent with sound engineering principles and quality practices.

© 2005, Kistler Instrument Corporation, 75 John Glenn Dr., Amherst NY 14228
Tel 716-691-5100, Fax 716-691-5226, sales.us@kistler.com, www.kistler.com



A.2 Acelerómetro piezoeléctrico

Acceleration

KISTLER
measure. analyze. innovate.

K-Shear® Accelerometers

Type 8702B500..., 8704B500...

General Purpose, Voltage Mode Accelerometers

Small, relatively light weight general purpose accelerometers for vibration measurements in wide range of applications. Available in high and low operating temperature versions; two with a ground isolated option, these accelerometers feature a rugged, hermetically sealed construction.

- Low impedance, voltage mode
- Quartz-shear sensing elements
- Ultra-low base strain
- Minimal thermal transient response
- Lightweight, hermetically sealed titanium case
- Conforming to CE

Description

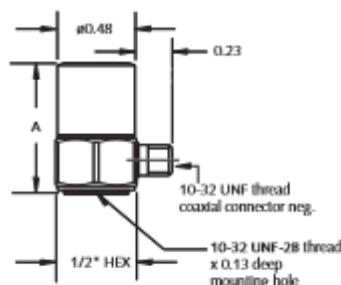
The Type 8702B500 series side connector and 8704B500 top connector accelerometer series use a unique shear mode sensing element made of stable quartz crystals. The quartz sensing elements afford excellent long-term stability that ensure repeatable, accurate measurements for many years. Additionally the shear element design provides low transverse sensitivity along with an insensitivity to base strain and thermal transients.

All units are hermetically sealed and are constructed entirely of titanium or a combination of titanium and stainless steel. An internal circuit Piezotron® impedance converter provides a high signal level at low impedance output.

Models identified with an M1 and M3 are ground isolated versions. The Type 8702B500M5 extends the operating temperature range to 330 °F while the Type 8702B500M8 operates at a low cryogenic temperature of -320 °F.

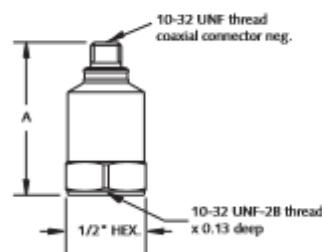
Application

All types are designed for general purpose vibration measurement in a laboratory or industrial environment. They can be used for environmental testing (with or without temperature cycling), ESS, vehicle tests, automotive NVH testing, rotating machinery vibration analysis.



Type 8702B500...

Dim	Type 8702B500	8702B500M1,M3	8702B500M5/M8
A	0.63	0.67	0.80



Type 8704B500...

Dim	Type 8704B500	8704B500M1/M3
A	0.83	0.85

Accessing TEDS Data

Accelerometers with a "T" suffix are variants of the standard version incorporating the "Smart Sensor" design. Viewing an accelerometer's data sheet requires an Interface/Coupler such as Kistler's Type 5134B... or 5000M04 with TEDS Editor software. The interface provides negative current excitation (reverse polarity) altering the operating mode of the PiezoSmart® sensor allowing the program editor software to read or add information contained in the memory chip.

8702B_000-238-03.10

Page 1/3

Kistler Instrument Corporation reserves the right to discontinue or change specifications, designs or materials without notice consistent with sound engineering principles and quality practices.

©2008, Kistler Instrument Corporation, 75 John Glenn Dr., Amherst NY 14228
Tel 716-691-5100, Fax 716-691-5226, sales.us@kistler.com, www.kistler.com



General Purpose, Voltage Mode Accelerometers, Type 8702B500..., 8704B500...



Technical Data

Specification	Unit	Type 8702B500	Type 8704B500
Acceleration range	g	±500	±500
Acceleration limit	gpk	±1000	±1000
Transverse acceleration limit	gpk	±1000	±1000
Threshold nom. (noise 130 µVrms)	gms	0.01	0.01
Sensitivity, ±5 %	mV/g	10	10
Resonant frequency mounted, nom.	kHz	54	54
Type 8702B500M5, M8	kHz	73	-
Frequency response, ±5 %	M1 (-5...10 %)	1 ... 10000	1 ... 10000
M3	0.5 ... 10000	0.5 ... 10000	
Type 8702B500M5, M8	Hz	2 ... 7000	-
Amplitude non-linearity	%FSO	±1	±1
Time constant nom.	s	1	1
M3	s	2	2
Type 8702B500M5, M8	s	0.5	-
Transverse sensitivity nom., (max. 3)	%	1.5	1.5
Long term stability	%	±1	±1

Environmental

Base strain sensitivity @ 250 µε	g/µε	0.01	0.01
Random vibration max.	gms	2000	2000
Shock limit (1 ms pulse)	gpk	5000	5000
Temperature coefficient of sensitivity	%/°F	-0.03	-0.03
Operating Temperature range	°F	-65 ... 250	-65 ... 250
Type 8702/8704B500T	°F	-65 ... 210	-65 ... 210
Type 8702B500M5	°F	-65 ... 330	-
Type 8702B500M8	°F	-320 ... 250	-
Storage temperature range	°F	-100 ... 300	-100 ... 250

Output

Bias nom.	VDC	11	11
Impedance	Ω	<100	<100
Voltage full scale	V	±5	±5
Current	mA	2	2

Source

Voltage	VDC	20 ... 30	20 ... 30
Constant current	Type (8702B500M5/M8 - 2 ... 18)	mA	4
Impedance min.	kΩ	100	100

Construction

Sensing element	Type	quartz-shear	quartz-shear
Case/base	material	Titanium	Titanium
Degree of protection case/connector	Type	hermetic	hermetic
Connector	Type	10-32 neg.	10-32 neg.
Ground isolated	Type 8702/8704B500M1, M3, M5	yes	yes
Weight	grams	8.2	7.1
Type 8702/8704B500M...	grams	9.2	7.6
Mounting (10-32 thd. x 0.13 dp)	Type	stud	stud
Mounting torque	Type 8702B500M5, M8	lbf-in	18

1 g = 9.80665 m/s², 1 Inch = 25.4 mm, 1 gram = 0.03527 oz, 1 lbf-in = 0.1129 N-m

8702B_000-238a-03.10



General Purpose, Voltage Mode Accelerometers, Type 8702B500..., 8704B500...

KISTLER

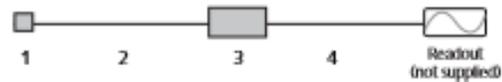
measure. analyze. innovate.

Mounting

A threaded 10-32 UNF stud provides positive attachment of the accelerometer to the test structure. Reliable and accurate measurements require that the mounting surface be clean and flat. The operating instruction manual for the Type 8702B... and 8704B... series accelerometers provides detailed information regarding mounting surface preparation.

Measuring Chain

- | | |
|--|---------------------|
| 1 Low impedance sensor | Type 8702/04B500... |
| 2 Sensor cable, 10-32 pos. to BNC pos. | 1761B... |
| 3 Power supply/signal conditioner | 51... |
| 4 Output cable, BNC pos. to BNC pos. | 1511 |



Included Accessories

- | | |
|---|-----------|
| • 10-32 mounting stud | Type 8402 |
| • Mounting stud, 10-32 to M6; shipped only outside N.A. | 8411 |

Optional Accessories

- | | |
|--------------------------|------------|
| • Mounting magnet | Type 8452A |
| • Triaxial mounting cube | 8502 |

Ordering Key

Range		Type 8702B <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
±500 g	500	↑	↑
Variant			
Standard	-	↑	↑
Ground isolated	M1	↑	↑
Long time constant and ground isolated	M3	↑	↑
High temperature	M5	↑	↑
Low temperature	M8	↑	↑

TEDS Templates

Standard	-
Default, IEEE 1451.4 V0.9	T
Template 0 (UTID 1)	T01
IEEE 1451.4 V0.9	T01
Template 24 (UTID 116225)	T02
LMS Template 117, free format Point ID	T02
LMS Template 118, Automotive Format (Field 14 Geometry - 0)	T03
LMS Template 118, Aerospace Format (Field 14 Geometry - 1)	T04
P1451.4 v1.0 template 25 - Transfer Function Disabled	T05
P1451.4 v1.0 template 25 - Transfer Function Enabled	T06

Ordering Key

Range		Type 8704B <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
±500 g	500	↑	↑
Variant			
Standard	-	↑	↑
Ground isolated	M1	↑	↑
Long time constant and ground isolated	M3	↑	↑

TEDS Templates

Standard	-
Default, IEEE 1451.4 V0.9	T
Template 0 (UTID 1)	T01
IEEE 1451.4 V0.9	T01
Template 24 (UTID 116225)	T02
LMS Template 117, free format Point ID	T02
LMS Template 118, Automotive Format (Field 14 Geometry - 0)	T03
LMS Template 118, Aerospace Format (Field 14 Geometry - 1)	T04
P1451.4 v1.0 template 25 - Transfer Function Disabled	T05
P1451.4 v1.0 template 25 - Transfer Function Enabled	T06

8702B_000-238n-03.10

A.3 Celda de carga

Force - FST

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Quartz

Type 9712

Low Impedance Load Cells

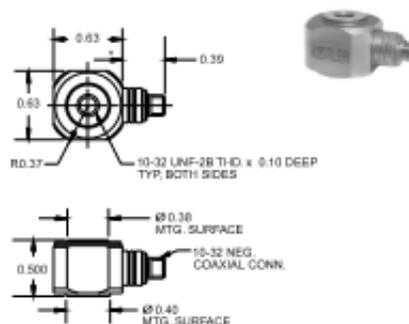
The 9712B series of force sensing load cells measure dynamic events in a wide variety of applications.

Available in five measuring ranges from 5 lbf to 5000 lbf and contained in a conventional load cell style housing, all models are capable of measuring compression and tension forces.

- Low impedance, voltage mode
- Rugged quartz sensor; stainless steel case
- Wide measuring range for compression & tension
- Use standard low cost cables
- Hermetically sealed
- Conforming to CE

Description

Series 9712B quartz, piezoelectric load cells offer a wide selection of force measurement ranges for compression and tension. Minute incremental forces may be measured at any level in these ranges. These force sensors offer high sensitivity as well as high rigidity and are capable of withstanding compression overloads from 20% to 400%. High force range units allow static calibration and short-term static response when used in a constant ambient temperature. The low profile load cell incorporates a built-in impedance converter, allowing use in contaminated environments such as dust, dirt or moisture without adverse effects on the signal transmission. Standard, low-cost cables of any length can be used and will not cause signal interference.



An internal microelectronic Piezotron™ signal conditioning circuit converts the charge developed in the quartz element as a result of the sensor being subjected to an applied force, into a useable high level voltage output signal at a low impedance level. Power to the 9712 series load cells can be provided by any Kistler 5100 series coupler or by any industry standard voltage mode IEPE (Integral Electronic Piezo-Electric) power supply/coupler.

Application

These load cells are ideally suited for force applications where high sensitivity, high rigidity and fast response are required. They can be used with shakers for modal analysis, impact testing, machine tool measurements, or various automotive, aerospace and robotic testing.

Technical Data

Type	Units	9712B5	9712B50	9712B250	9712B500	9712B5000
Range compression	lbf	5	50	250	500	5000
tension	lbf	5	50	250	500	500
Threshold nom.	lbf	0.0001	0.001	0.005	0.01	0.1
Sensitivity nom.	mV/lbf	800	100	20	10	1
Non-linearity	%FSO	1	1	1	1	1
Rise Time 10 ... 90%	µs	<6	<6	<6	<6	<6
Time Constant nom.	s	60	540	820	1800	1800
Rigidity	lbf/µin	>5	>5	>5	>5	>5
Natural Frequency nom.	kHz	70	70	70	70	70

continued...

Page 1/2

Kistler Instrument Corporation reserves the right to discontinue or change specifications, designs or materials without notice consistent with sound engineering principles and quality practices.

© 2003, Kistler Instrument Corporation, 75 John Glenn Dr., Amherst NY 14228
Tel 716-691-5100, Fax 716-691-5226, sales.us@kistler.com, www.kistler.com



High Impedance Load Cells, Type 9712

KISTLER

measure. analyze. innovate.

Technical Data

Type	Units	9712B5	9712B50	9712B250	9712B500	9712B5000
Shock Limit (1ms pulse) max.	g	<10000	<10000	<10000	<10000	<10000
Temperature Coefficient of Sensitivity	%/°F	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009
Temperature Range Operating	°F	-60 ... 250	-60 ... 250	-60 ... 250	-60 ... 250	-60 ... 250
Storage	°F	-95 ... 300	-95 ... 300	-95 ... 300	-95 ... 300	-95 ... 300
Output:						
Voltage full scale nom.	V	5	5	5	5	5
Impedance	Ω	<100	<100	<100	<100	<100
Power Supply:						
Constant Current	mA	4	4	4	4	4
Ripple max.	mVrms	25	25	25	25	25
Voltage	VDC	20 ... 32	20 ... 32	20 ... 32	20 ... 32	20 ... 32
Impedance min.	kΩ	100	100	100	100	100
Construction:						
Sensing Element	type	quartz	quartz	quartz	quartz	quartz
Housing/Base	material	17-4 PH				
Sealing - housing/connector	type	hermetic	hermetic	hermetic	hermetic	hermetic
Connector	type	10-32 neg.				
Weight	grams	19	19	19	19	19
Mounting Torque	lbf-in	18	18	18	18	18

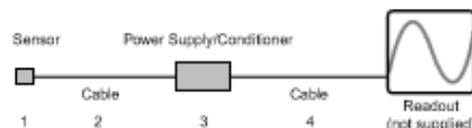
1 g = 9.80665 m/s², 1 inch = 25.4 mm, 1 gram = 0.03527 oz, 1 lbf-in = 0.1129 Nm

Mounting

Reliable and accurate measurements require that the mounting surface be clean and flat. All models are supplied with two 10-32 mounting studs for attachment to the test structure. When several units are installed between two plates, the mounting surfaces in contact with the cells must be plain-parallel to prevent stresses induced into the individual cells. The Operating Instruction Manual for the 9712B series provides detailed information regarding mounting surface preparation.

Related Products

- 9212 charge mode, high sensitivity load cell for low force range applications
 9222 charge mode version of the 9712B series (for high force range applications)

Ordering Information

sp = specify cable length in meters

X = 5, 50, 250, 500, 5000 lbf

- 1- 9712B(X) load cell, 50 pC/lbf or
 2 - 1761Bsp cable, 10-32 pos. to BNC pos.
 3 - 5100 series coupler or
 5010B dual mode charge amplifier
 4 - 1511sp output cable, BNC pos. to BNC pos.

Supplied Accessories

- 8402 (2) 10-32 mounting studs

Optional Accessories

- 900A1 impact pad

000-4178-04.03 (K6.9712)

Page 2/2

Kistler Instrument Corporation reserves the right to discontinue or change specifications, designs or materials without notice consistent with sound engineering principles and quality practices.

© 2003, Kistler Instrument Corporation, 75 John Glenn Dr., Amherst NY 14228
 Tel 716-691-5100, Fax 716-691-5226, sales.us@kistler.com, www.kistler.com



A.4 Refrigerador

GE® 22.7 Cu. Ft. French-Door Refrigerator



Model# GNS23GMHES



- 33" wide -
- Internal water dispenser - Delivers filtered water with one touch
- Factory-installed icemaker - Refrigerator comes ready to automatically create ice
- Upfront temperature controls - Easy-to-use controls regulate both fresh food and freezer sections
- 2 clear drawers -
- Snack drawer - Conveniently stores favorite foods and allows for quick, easy access
- Adjustable glass shelves - A variety of shelf configurations provide additional options for food storage
- Adjustable large door bins - Offers ideal space for storing large containers in the door for more valuable shelf space
- Two-level freezer baskets - Baskets allow easy access to frozen foods
- Advanced water filtration uses MWF replacement filter - Reduces trace pharmaceuticals from water and ice* (* Removes 98% of ibuprofen, atenolol, fluoxetine, progesterone and trimethoprim. These pharmaceuticals are not necessarily in all users' water)

Have more questions? Please contact 1-800-626-2005

FEATURES

Configuration	French Door
Temperature Management Features	Turbo Cool setting Multiflow Air System 3 Electronic Sensors
Defrost Type	Frost Guard
Control Type	Upfront Electronic Temperature Controls & Digital Display
Dispenser	Internal Water Chilled
Dispenser Features	Water Filter Indicator Light Door Alarm
Icemaker	Factory-Installed
Water Filtration	GE Water Filtration 6 Month MWF
Fresh Food Cabinet Drawers	3 Total 2 Clear 1 Clear Snack Drawer
Fresh Food Cabinet Shelves	3 Total Glass 3 Adjustable 2 Split; 1 Full-Width
Fresh Food Door Bins	5 with Gallon Storage 3 Adjustable 2 Fixed
Fresh Food Door Features	Dairy Compartment
Fresh Food Features	Interior Lighting - Dual Level
Freezer Cabinet Shelf Features	1 Quick Freeze Shelf
Freezer Storage Baskets	2 Total 2 Wire 1 Split 1 Full-Width, Full-Extension Plastic
Freezer Features	Ice Bucket Interior Light
Exterior Style	Free-Standing
Leveling System	2 Point Front Adjustable
Performance Features	Easily Removable Door Gaskets Never Clean Condenser Energy Saver
Door Liner	ABS

A.5 DAQ NI USB 6341⁸

General	
Familia de Productos	DAQ Multifunción
Tipo de Medida	Codificadores de cuadratura Digital Frecuencia Voltaje
Form Factor	USB
Sistema Operativo / Objetivo	Windows
Compatible con RoHS	Sí
Tipo de Aislamiento	None
Entrada Analógica	
Canales de una sola terminal	16
Canales Diferenciales	8
Resolución de Entrada Analógica	16 bits
Número de Rangos	4
Muestreo Simultáneo	No
Salida Analógica	
Número de Canales	2
Resolución	16 bits
Razón de Actualización	900 kS / s
Capacidad de Corriente Simple	5 mA
E / S Digital	
Canales Bidireccionales	24
Canales de Entrada Únicamente	0
Canales de Salida Únicamente	0
Temporización	Hardware Software
Líneas Sincronizadas	8
Máxima Velocidad de Reloj	1 MHz
Niveles Lógicos	TTL
Filtros de Entrada Programables	Sí
¿Soporta Estados de Encendido Programables?	Sí
Entrada Digital	
Tipo de Entrada	Sinking Sourcing
Rango de Voltaje Máximo	0 V - 5 V
Salida Digital	

⁸ <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/209069>



Tipo de Salida	Sinking Sourcing
Capacidad de Corriente Simple	24 mA
Capacidad de Corriente Total	576 mA
Rango de Voltaje Máximo	0 V - 5 V
Contadores / Temporizadores	
Temporizador Watchdog	Sí
Contadores	4
Operaciones a Búfer	Sí
Debouncing / Glitch Removal	Sí
Frecuencia Máx. de la Fuente	100 MHz
Generación de Pulso	Sí
Tamaño	32 bits
Estabilidad de Tiempo	50 ppm
Niveles Lógicos	TTL
Temporización / Disparo / Sincronización	
Disparo	Digital
Bus de Sincronización (RTSI)	No
Especificaciones Físicas	
Longitud	26.4 cm
Ancho	17.3 cm
Altura	3.6 cm
Conector de E / S	Terminales de tornillo
Potencia USB	Energizado de Forma Externa

A.6 Kistler LabAmp 5165A



Connections

Number of channels		
Type 5165A1		1
Type 5165A4		4
Input connector type		BNC neg.
Analog output connector type		BNC neg.
Ethernet interface		2xRJ45

Charge Input

Measuring range	pC	±100 ... 1 000 000
Frequency range (-3dB)	Hz	0,1 ... 100 000

Input noise (typ.)

1 Hz ... 100 kHz

100 pC	pC _{rms}	0,006
1 000 pC	pC _{rms}	0,008
10 000 pC	pC _{rms}	0,048
100 000 pC	pC _{rms}	0,67
1 000 000 pC	pC _{rms}	4,6

1 Hz ... 10 kHz

100 pC	pC _{rms}	0,006
1 000 pC	pC _{rms}	0,007
10 000 pC	pC _{rms}	0,03
100 000 pC	pC _{rms}	0,35
1 000 000 pC	pC _{rms}	2,8

Maximum input voltage	V	±30
-----------------------	---	-----

Measuring error

Measuring range <100 pC	%	<1
Measuring range ≥100 pC	%	<0,5

Crosstalk between channels	dB	≤-80
----------------------------	----	------

Sensor impedance	MΩ	>10
------------------	----	-----

Piezotron Input

Gain		1/10
Sensor supply voltage	V	22
Power supply	mA	4/10
Frequency range (-3dB)	Hz	0,1 ... 100 000

Input noise (typ., 0 Ω shunt at input)

1 Hz ... 100 kHz

Gain 10	μV _{rms}	6
Gain 1	μV _{rms}	45

1 Hz ... 10 kHz

Gain 10	μV _{rms}	3,5
Gain 1	μV _{rms}	28

Maximum input voltage	V	±30
Measuring error		
Gain 10	%	<1
Gain 1	%	<0,5
Crosstalk between channels	dB	≤-80

Voltage Input

Input type		single-ended
Measuring range	V	±1 ... 10
Input impedance	MΩ	10
Frequency range (-3dB)	Hz	0 ... 100 000

Input noise (typ.)

1 Hz ... 100 kHz

Measuring range 1 V	μV _{rms}	6
Measuring range 10 V	μV _{rms}	45

1 Hz ... 10 kHz

Measuring range 1 V	μV _{rms}	3,5
Measuring range 10 V	μV _{rms}	28

Max. input voltage	V	±30
--------------------	---	-----

Measuring error

Measuring range <1 V	%	<1
Measuring range ≥1 V	%	<0,5

Crosstalk between channels	dB	≤-80
----------------------------	----	------

Voltage Output

Nominal output range	V	±10
Output impedance	Ω	10

Max. common mode voltage between input and output ground	V	±14
--	---	-----

Output noise (all ranges)

1 Hz ... 100 kHz, typ.	mV _{rms}	0,046
1 Hz ... 10 kHz, typ.	mV _{rms}	0,041

Frequency range (-3dB)	Hz	0 ... 100 000
------------------------	----	---------------

Group delay (input to output, filters off)	μs	≤12
--	----	-----

Zero error	mV	<±2
------------	----	-----

DAC resolution (analog out)	Bit	16
-----------------------------	-----	----



Bibliografía

- 120, U. 9. (s.f.). *Productos de aislamiento térmico para construcción*.
- Acuña, J. A. (2003). *Ingeniería de confiabilidad* (Primera edición ed.). Cartago, Costa Rica: Editorial tecnológica de Costa Rica.
- AHAM, 7. (2014). *Sustainability Standard for Refrigeration Appliances*.
- Birolini, A. (1994). *Reliability Engineering* (Séptima ed., Vol. 10). Toscana, Italia: Springer.
Recuperado el Marzo de 2015
- Body, T. A. (2008). Door slam simulation for durability analysis with Multibody Dynamics. *Segunda conferencia europea de tecnología "HyperWorks"*. Estrasburgo, Francia.
- Chevrolet. (2010). Chevrolet Volt Cold Weather Door Slam Test.
- Daubechis, I. (1992). *Ten lectures on wavelets "CBMS-NSF conference series in applied mathematics"*. SIAM.
- Dhillon, B. S. (1983). *Power system reliability, safety and management*. Ann Arbor Science Publishers.
- Forner Gumbau, M. (2006). *Problemas resuletos de centro de gravedad y momentos de inercia*. Francia: Biblioteca de la Universidad de Jaume I.
- Hernández, C. J. (2016). *Diseño de una órtesis compensatoria para desgaste en cartílago en rodilla humana desde un enfoque bomecatrónico*. México : UNAM.
- Hibbeler. (2006). *Mecánica para ingenieros, dinñamica*. Continental.
- Kamen, E. W. (2008). *Fundamentos de señales y sistemas*. Pearson prentice Hall .
- Luis Bilurbina, F. L. (1990). *Materiales no metálicos resistentes ala corrosión*. Barcelona, España: Boixareau Editores.
- Manufacturers, A. o. (2016). *Association of Home Appliance Manufacturers*. Obtenido de https://www.aham.org/AHAM/What_We_Do/Standards/AHAM/What_We_Do/Standards.aspx?hkey=5ac06f0c-75cb-4a66-8b12-813ed98837cc
- Mosquera, G. (2001). *Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo*. Caracas, Venezuela: ISID.
- Santiago, A. Z. (2015). *Dinámica: Mecánica para ingenieros*. México: Grupo Editorial Patria.
- Silva, A. V. (2014). *Análisis de fallas en puertas de automóviles basado en la fuerza de impacto al cierre*. Ciudad de México: UNAM.
- Solutions, F. T. (25 de Agosto de 2016). *Factual Tech Solutions*. Obtenido de <http://factualtechsolutions.com/door-slam-tester/>
- Stapelber, R. F. (2009). *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability ans Safety in Engineering Design*. Australia : Springer .



T. K., D., & Williams, T. (1977). *Historia de la tecnología 1. Desde la antigüedad hasta 1750*. Madrid España: Sigl ventiuno de España Editores.

térmico, A. 9.-A. (2002). Materiales aislantes térmicos. Determinación de la conductividad térmica. Técnica del medidor de flujo de calor. *UNE-E 12667:2002*, (pág. 56).

<http://mexico.ni.com>

<http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>

<https://www.electronicblog.net/simple-angle-meter-using-adxl335-accelerometer-arduino/>

<http://www.transfmetal.com.mx>

<http://www.kistler.com>