



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE FALLAS EN PUERTAS DE
AUTOMÓVILES BASADO EN LA FUERZA
DE IMPACTO AL CIERRE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA MECATRÓNICA

P R E S E N T A:

ANAHÍ VELÁZQUEZ SILVA



ASESOR: DR. ALEJANDRO C. RAMÍREZ REIVICH

MÉXICO 2014







Tabla de contenido

Tabla de contenido	5
Resumen	7
Abstract	8
1. Introducción	10
2. Planteamiento del problema	11
3. Especificaciones	12
1.1 Requerimientos	12
1.2 Objetivos	13
1.3 Alcances.....	13
4. Antecedentes	14
5. Estado del arte	16
5.1 Desarrollo de pruebas de impacto en puertas de automóviles a través del tiempo. ...	16
5.2 Desarrollo de pruebas de impacto en puertas de automóviles en México.	20
5.3 ¿Para qué es útil calcular la fuerza de impacto?	22
6. Elementos del sistema	25
6.1 Puerta	25
6.2 Freno de puerta.....	27
6.3 Sistemas de amortiguación	30
6.4 Factores que influyen en el cálculo de la fuerza	32
7. Análisis dinámico de la fuerza de impacto y descripción del fenómeno físico de forma experimental.	38
7.1 Descripción del fenómeno físico	38
7.2 Análisis dinámico de la fuerza de impacto	39
8. Obtención de la velocidad angular de la puerta y cálculo de la fuerza de impacto.	76
8.1 Velocidad.....	76
8.2 Cálculo de la fuerza de impacto	93
9. Conclusiones y comentarios	97
Trabajo a futuro	99



Apéndice A	100
Programa de integración desarrollado en Matlab®	100
Interfaz gráfica desarrollada en NI LabView®	101
Apéndice B	103
Especificaciones de los componentes comerciales.....	103
Acelerómetro de alta resistencia al impacto	103
Módulo de acondicionamiento de señal datalogger	104
Acelerómetro PCB	105
DAG tarjeta de adquisición de señales.....	106
Bibliografía	107
Referencias.....	107



Resumen

Con este trabajo de investigación se busca determinar la magnitud de la fuerza de impacto de una puerta automotriz sobre el marco de la carrocería así como la dirección, sentido y sobre todo el comportamiento de la misma desde que inicia su trayectoria hasta que se detiene al cerrar. Esta fuerza se calcula considerando la distancia que existe del radio de la bisagra al sensor por lo que es un efecto que se ve reflejado en el acelerómetro, instrumento que se utilizó para observar las vibraciones que se producen en el sistema.

Lo antes mencionado se realiza con el fin de avanzar en la investigación del comportamiento de las puertas automotrices para que posteriormente se aplique el conocimiento adquirido a la creación de un sistema innovador de detección de fallas en puertas de automóviles para asegurar la confiabilidad de la puerta y con esto proporcionar seguridad al usuario así como información de valor a la industria automotriz.

La importancia de este trabajo radica en que no sólo se obtiene la fuerza de la puerta cuando impacta si no que debido a la metodología utilizada para obtener dicho valor se obtuvieron también gráficas que describen el comportamiento de la puerta cuando interactúa con cada uno de sus elementos a lo largo de sus trayectoria de cierre y apertura, es decir, se puede observar el comportamiento de la puerta por cada uno de los pasos del freno, el momento en que la puerta se sujeta del pestillo hasta que al impactar refleja la reacción del marco de neopreno del de la carrocería.

Para llegar al resultado deseado fue necesario recorrer un largo camino que se conforma de distintas etapas que van desde la observación, la experimentación y finalmente el análisis. Con observación me refiero a la acción de **ver**, **oír** e incluso **sentir** los hechos y fenómenos que queremos estudiar, se utiliza fundamentalmente para conocer hechos, conductas y comportamientos colectivos. Observando la interacción entre el usuario y el automóvil se puede determinar la función que desempeña el sistema así como predecir el comportamiento de algunas variables que interfieren en el modelo del sistema.

Los siguientes pasos son experimentar y posteriormente analizar todas y cada una de las variables que se encuentran inmersas en el sistema pero que guardan una estricta relación con el campo de la física, esto con la finalidad de obtener un resultado tangible que nos dé una idea del rango de la magnitud de la fuerza que experimentan las puertas automotrices al ser operadas bajo condiciones reales.



Abstract

With this research is to determine the magnitude of the impact force of an automotive door on the frame of the body and the direction, sense and especially the behavior of the same since it began its path until it is stopped by closing. This force is calculated by considering the distance of the radius of the hinge so that the sensor is a fact that is reflected in the accelerometer, tool used to monitor vibrations which occur in the system.

The above is done in order to advance research on the behavior of automotive doors so that later the knowledge gained to create an innovative system for detecting faults in car doors is applied to ensure the reliability of the door and with this provide user safety and value data to the auto industry.

The importance of this work is that not only the strength of the door when you get hits if not because of the methodology used to obtain this value is also obtained graphs that describe the behavior of the door when you interact with each of its elements along its path of opening and closing , that is, one can observe the behavior of the door for each of the steps in the brake , the time that the door is held in the latch until the impact reflects the reaction frame neoprene the body .

To reach the desired result it was necessary to go a long way conforms to different stages ranging from observation, experimentation and finally the analysis. With observation I mean the act of seeing , hear and even feel the facts and phenomena we want to study , is mainly used for facts, behaviors and collective behavior . Observing the interaction between the user and the car can determine the role of the system and predict the behavior of some variables that interfere in the system model.

The following steps are experiencing and then analyzing each and every one of the variables that are embedded in the system but who keep a strict relation to the field of physics, this in order to get a tangible result to give us an idea of range of the magnitude of the force experienced by automotive doors to be operated under real conditions.





ESPECIFICACIONES

1. Introducción

Actualmente la industria automotriz se ha convertido en un sector estratégico para la economía de México pues es la segunda industria más importante solo precediendo a la industria del petróleo. Sin embargo, para que la economía del país siga en incremento, es necesario que exista desarrollo tecnológico que satisfaga las necesidades de las personas. Una solución para ello es crear nuevas oportunidades que en ocasiones surgen desarrollando proyectos vinculando prestigiosas universidades con la industria como lo realiza actualmente la UNAM.



Fig. 4.1 Prueba de impacto en puertas deslizantes de Ford Transit Custom Van¹

Hablar de tecnología es un tema complicado pues cada uno de los avances que surgen con el paso del tiempo tiene la finalidad de facilitar la convivencia entre el humano y su entorno de forma segura. Es precisamente el término seguridad lo que conlleva a considerar otros aspectos importantes en el diseño.

Aterrizando este concepto es importante que tomemos en cuenta que cuando compramos un automóvil necesitamos sentirnos protegidos y seguros de que no corremos ningún riesgo, para que esto suceda la industria automotriz ha diseñado a lo largo del tiempo muchas y diversas pruebas de repetitividad que se realizan a los automóviles bajo condiciones drásticas para poder evaluar la durabilidad de los autos, sin embargo, en todas las pruebas que se realizan tanto de motor, chasis, puertas, etc., no existe alguna que indique cual es la parte que falló exactamente durante la prueba. Existen bancos de pruebas en los que su tarea principal es llevar a cabo el abrir y cerrar de puertas e indicar en cuál de sus 80,000 ciclos falla la puerta, pero ¿Por qué falló la puerta?

Partiendo de esta pregunta se detectó la necesidad de analizar el comportamiento del fenómeno físico que se desarrolla desde el momento en que se impulsa la puerta para cerrarla hasta el momento en que ésta impacta con la carrocería. La fuerza de impacto es de gran importancia en el análisis de fallas de los componentes de la puerta, por lo que su conocimiento es menester para el estudio de vida, resistencia y vibración de la puerta. En el intento por contestar estas preguntas debemos realizar un análisis exhaustivo del fenómeno que se desarrolla desde que se empuja la puerta para cerrarla hasta que la puerta llega al final de su recorrido.

Partiendo de esta pregunta se detectó la necesidad de analizar el comportamiento del fenómeno físico que se desarrolla desde el momento en que se impulsa la puerta para cerrarla hasta el momento en que ésta impacta con la carrocería. La fuerza de impacto es de gran importancia en el análisis de fallas de los componentes de la puerta, por lo que su conocimiento es menester para el estudio de vida, resistencia y vibración de la puerta. En el intento por contestar estas preguntas debemos realizar un análisis exhaustivo del fenómeno que se desarrolla desde que se empuja la puerta para cerrarla hasta que la puerta llega al final de su recorrido.

¹ YouCar (2012) Automotive News. Recuperado de <http://www.youcar.tv>



2. Planteamiento del problema

Actualmente la seguridad que brinda un automóvil al usuario es un tema de gran preocupación debido a que con el incremento de la población y el creciente índice de accidentes vehiculares, los usuarios arriesgan cada vez más la vida al ir conduciendo un auto. Aparentemente el decir que manejar es arriesgado puede sonar exagerado sin embargo, en ocasiones los accidentes no dependen de la persona que va al volante si no que influyen factores de manera indirecta para poner en peligro la vida de los usuarios.

Si bien es cierto que entre los factores se incluyen el estrés, el manejar en estado de ebriedad o la irresponsabilidad de los conductores, también existen factores de diseño en los automóviles que pasan desapercibidos pero que al ser modificados aumentan la confiabilidad del automóvil.

Como sabemos, un automóvil está compuesto de n elementos que cumplen con diferentes funciones dentro del sistema en general y uno de esos elementos son las puertas vehiculares ya que brindan protección al usuario en caso de impactos (choques automovilísticos) y contribuyen asegurando la permanencia del usuario en el vehículo mientras éste se encuentra en marcha, esto último no se aplica en todos los automóviles pues existen algunos modelos en los que la permanencia del usuario se determina por la calidad de los cinturones de seguridad en ausencia de puertas.

Los análisis que se realizan actualmente a las puertas automotrices determinan su ciclo de vida, es decir, se puede predecir el ciclo de apertura y cierre en el que fallará la puerta, para ello existen diferentes sistemas que se dedican a abrir y cerrar puertas durante miles de repeticiones, pero ¿qué pasa cuando la puerta falla?

Se dice que un producto, servicio o proceso falla, cuando no desempeña de forma satisfactoria, la función que de él se espera. Existen diferentes motivos por los que puede suscitarse una falla, ya sea por error en el concepto, diseño, fabricación, ensamble u operación (FUNDIBEQ Fundación Iberoamericana para la Gestión de la Calidad, 2014).²

Aterrizando el concepto de falla podemos ver que la acción de abrir y cerrar puertas da pie a una **falla de operación** y para poder determinar dicha falla este trabajo de tesis se enfoca en el análisis de la fuerza de impacto de la puerta sobre la carrocería que al ser distribuida a lo largo de la estructura de la puerta genera vibraciones que afectan a los demás sistemas ocasionando que se aflojen los tornillos de sujeción, se flexionen los pernos de las bisagras o incluso se deforme la puerta ocasionando que no se cierre de la forma correcta y poniendo en riesgo al usuario del vehículo.

² FUNDIBEQ Fundación Iberoamericana para la Gestión de la Calidad.(2014). Análisis Modal de Fallos y Efectos A.M.F.E. Recuperado de <http://www.fundibeq.org>



3. Especificaciones

1.1 Requerimientos

La investigación que se plantea en este trabajo se enfoca en realizar el análisis de la fuerza de impacto de la puerta de un automóvil sobre el marco de la carrocería.

Se propone realizar las pruebas en puertas pertenecientes a automóviles de segmento C y D:

- ◆ Los automóviles del **segmento C**: son los más pequeños con cinco plazas completas. Se ubican en torno a los 4200 mm en el caso de hatchbacks y 4500 mm en el caso de sedanes y familiares.
- ◆ Los automóviles del **segmento D**: también tienen cinco plazas pero tienen motores más potentes y maletero más grande. El tamaño es de aproximadamente 4600 mm.³

La finalidad de realizar las pruebas en este tipo de automóviles radica en que utilizan el método de sujeción por tornillería⁴ para colocar sus elementos en la posición correcta por lo que permite el desensamble de sus componentes además de que facilita la alineación de las puertas automotrices.

Las puertas de estos vehículos efectúan su rotación por medio de bisagras colocadas de forma vertical posicionadas en la arista delantera de las puertas (es el método más común de apertura de puertas), es decir, las puertas del lado izquierdo del automóvil giran en sentido horario y las puertas del lado derecho giran en sentido antihorario.

Las pruebas se deben realizar tratando de igualar en la medida de lo posible las condiciones reales de operación por lo que se debe considerar la apertura y cierre

³ Eroski Consumer. (2020), Clasificación de los autos. Recuperado de www.consumer.es

⁴ Groover, Mikell P.(1997). *Fundamentos de manufactura moderna*.(p. 790), Pearson Educación



1.2 Objetivos

Con el fin de dar el primer paso en la investigación de la causa de las fallas de puertas de automóviles se plantearon los siguientes objetivos:

- ◆ Determinar las características y componentes del sistema que se desea analizar así como el identificar los conceptos matemáticos que se aplicarán en la solución del problema..
- ◆ Diseñar las pruebas experimentales que permitan determinar las magnitudes de las variables que intervienen en el análisis dinámico de la fuerza de impacto.
- ◆ Calcular y visualizar la fuerza con la que la puerta de un automóvil impacta sobre el marco de la carrocería al cierre. Esto con el fin de determinar el comportamiento de la puerta y posteriormente aplicar dicha fuerza a los elementos que componen el sistema para predecir la causa de su falla.

1.3 Alcances

Es importante mencionar que este trabajo se restringe al análisis de puertas convencionales, es decir, aquellas en las que la apertura y cierre se lleva a cabo por medio de un eje de rotación vertical colocado en la parte delantera de la puerta. Con esto se descartan puertas del tipo deslizantes, puertas suicidas, puertas de ala de gaviota, puertas de tijera, puertas de mariposa y cualquier otra variante de las mismas. Así mismo es importante mencionar que variables como como la fricción y el comportamiento de los demás elementos que conforman al sistema se incluyen en las gráficas del comportamiento de la puerta pero no se determina la magnitud de la curva que pertenece a dichas variables por lo que se analiza la puerta como un elemento general sin especificar el comportamiento de cada uno de sus elementos.

Para alcanzar los objetivos de este trabajo de investigación se dividió el trabajo en tres etapas, **observación, experimentación y análisis**, esto con el fin de facilitar el entendimiento de un fenómeno físico tan complicado como el que se plantea.

Una vez que se haya determinado el valor de la magnitud de la fuerza de impacto se podrá proponer el trabajo a futuro Posteriormente cuando se haya validado la fuerza y sepamos el rango de valores en que se encuentra, se podrá aplicar dicho concepto al análisis y rediseño de alguno de los elementos que componen la puerta ya que la fuerza con la que impacta en el chasis puede ser un factor detonante de las fallas en el sistema.



4. Antecedentes

Existen diversos conocimientos que se adquieren durante la carrera y que con el paso del tiempo se convierten en herramientas para resolver situaciones que se nos presentan en la vida cotidiana. Esto no quiere decir que pasaremos el resto de la vida resolviendo integrales y derivadas si no que en su momento cada una de esas integrales o derivadas formaron un pensamiento analítico que logra relacionar lo que se experimenta con el conocimiento adquirido para establecer una solución.

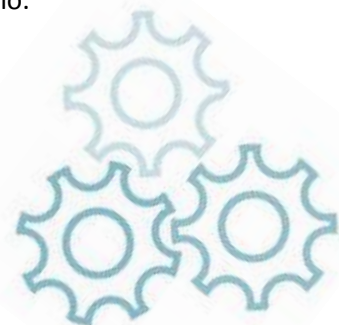
Así pues para realizar el análisis mecánico del sistema que se plantea en este trabajo de investigación debemos recurrir a algunos conceptos contenidos en el área de la mecánica y la electrónica aunados a la instrumentación y adquisición de señales.

Por parte de la **mecánica** podemos tomar parte del curso de **cinemática y dinámica** así como de algunos conceptos de **vibraciones mecánicas** además de asignaturas como cálculo vectorial que son las que por medio del análisis matemático me permitirán observar el comportamiento del fenómeno físico que se desarrolla al realizar una acción como lo es el cerrar la puerta de un automóvil.

Yendo de lo general a lo particular, dentro de la dinámica de una partícula existe un tema denominado **impulso y momentum** que es principio que se aplica a la solución de un problema que involucra velocidad, fuerza y tiempo tal como lo es el análisis de la fuerza de impacto de una puerta automotriz.

Aparentemente podría decirse que un fenómeno tan simple puede entenderse fácilmente, sin embargo es necesaria una amplia capacidad de análisis para poder identificar los factores que influyen en el comportamiento de la puerta pues esta se ve afectada por un freno que disminuye la velocidad, unas bisagras que restringen su movimiento y un sistema de amortiguación que reduce el impacto además de que permite un sellado casi perfecto al cerrar el vehículo.

Para el análisis del sistema se requiere hacer uso de algunos sensores para determinar las variables que intervienen en el cálculo de la fuerza de impacto por lo que es necesario recurrir al área de **instrumentación** para saber qué tipo de acelerómetro es el adecuado y posteriormente adquirir las señales de forma correcta para su estudio.





ESTADO DEL ARTE

5. Estado del arte

5.1 Desarrollo de pruebas de impacto en puertas de automóviles a través del tiempo.

Los automóviles han sido muestra de los avances tecnológicos más importantes en la historia de la humanidad, desde sus inicios se tenían inconvenientes que con el paso del tiempo se fueron corrigiendo. Sin embargo, sí los humanos utilizaban los automóviles debían tener la certeza de que el carro no fuera a causarle algún daño o generar algún accidente que pusiera en riesgo la vida del usuario, es por ello que se inicia con la realización de pruebas en los autos para evitar que salgan al mercado automóviles que posiblemente fallarían. De esta forma se reduce la posibilidad de que surjan accidentes debido a fallas de fabricación o de ensamble del vehículo.⁵

Con el paso del tiempo las pruebas realizadas a los automóviles se fueron perfeccionando de tal forma que cada vez abarcaban más parámetros y partes del auto específicas con las que aseguraban que el carro no fallaría.

Centrándonos en las puertas de los carros, estos son algunos sistemas con los que se realizan pruebas a las puertas para determinar el momento en que fallan.

5.1.1 Banco de pruebas para Daimler Chrysler® de I+D.⁶



Figura 5.1 Equipos de prueba utilizados por DaimlerChrysler para la prueba de resistencia a largo plazo de las puertas del vehículo

Como se ha mencionado, las puertas de los autos, como el caso de las furgonetas tienen que funcionar a la perfección miles de veces. Las pruebas que realiza Daimler Chrysler para asegurarse de que las puertas de sus furgonetas cumplan con este requisito, se basan en un sistema neumático que trabaja con el acoplamiento de un sistema servo-neumático controlado por un software de envío y adquisición de datos marca Festo®, que garantiza resultados congruentes.

Existen numerosos bancos de pruebas que se utilizan para llevar a cabo pruebas de resistencia para corroborar la duración de bisagras y correderas, en modelos como Mercedes-Benz, Sprinter y Vito. La interfaz máquina-humano permite monitorear los valores en tiempo real para analizar el número de ciclos y el estado de error, así como medir la fuerza necesaria para abrir y cerrar la puerta. Brinda la opción de visualizar gráficos de barras correspondientes al funcionamiento del sistema vigilando



Fig. 5.2. Módulo para pruebas instalado al interior del vehículo. Daimler Chrysler.

parámetros como ciclos de carga, fuerzas y la corriente.

La innovación que presenta este sistema es que tiene conexión al servidor de Daimler Chrysler y si el banco deja de funcionar la alarma se transmite al operador a través de SMS.

5.1.2 Prueba de ciclo de vida y durabilidad por MGA Research®⁷

La empresa MGA Research desarrolló un banco de pruebas con elementos neumáticos que permite observar el comportamiento de distintas puertas de autos.



Fig. 5.3 Banco de pruebas para puertas de la compañía MGA

El sistema está formado por perfiles y correderas de aluminio que permiten adaptar la estructura a las medidas de las diferentes puertas.

La acción de abrir y cerrar la puerta se lleva a cabo mediante un pistón de simple efecto que cuando se activa jala un hilo sujeto a la manija de la



Fig. 5.4 Sistema encargado de abrir y cerrar la puerta, empresa MGA Research

puerta y cumple con la función de abrirla, cuando el pistón regresa impulsa un poste de aluminio encargado de cerrar la puerta.

5.1.3 Prueba de resistencia para puertas de autos por Next First Engineering Technologies®.⁸



Fig. 5.5 Sistema externo de brazos y pistones. NextFirst Engineering Technologies

El sistema que ofrece esta compañía se compone de barras de aluminio (perfiles) a manera de brazos actuados por pistones neumáticos de simple efecto que realizan la acción de abrir y cerrar la puerta por fuera. El mecanismo logra dicha acción ya que cuando el primer pistón se acciona, jala un cinturón que abre la puerta, para cerrarla este pistón realiza la carrera en sentido contrario para liberar la tensión en el cinturón y a continuación un segundo pistón se acciona para empujar una barra que cierra la puerta. Lo antes mencionado conforma un ciclo y este banco realiza pruebas de 100,000 ciclos.

Este banco de pruebas también tiene la modalidad de poder abrir y cerrar las puertas por dentro para cumplir con las normas establecidas en cuanto a pruebas de resistencia de puertas se refiere.



Fig. 5.6 Banco interno. NextFirst Engineering Technologies



Fig.5.7 Montaje del sistema de pruebas en un VoltAGE de Chevrolet

5.1.4 Prueba de resistencia de puertas en ambientes a baja temperatura realizada por Chevrolet® para el modelo Volt⁹

La empresa automotriz Chevrolet ha tratado con el paso del tiempo mantenerse a la vanguardia en cuanto a temas de seguridad se refiere. Por tal motivo se encargan de realizar pruebas a los automóviles bajo condiciones extremas como esta que se realiza a -30.3°C para comprobar el funcionamiento del automóvil en climas demasiado

fríos.

El sistema utilizado realiza 1.5 ciclos por segundo y realiza la prueba por 62,000 ciclos, cabe mencionar que un ciclo lo conforman las acciones de abrir y cerrar la puerta. Como se observa en las imágenes, el banco de pruebas de Chevrolet® es un sistema híbrido pues realiza la apertura de las puertas desde afuera y el cierre desde adentro, todo manipulado por sistemas neumáticos que



Fig. 5.8 Sistema de apertura y cierre

permiten efectuar los movimientos con precisión.

El conteo de los ciclos y el monitoreo de la velocidad se realiza mediante un sensor fijo en el piso que detecta el movimiento de la puerta, de tal manera que cuando la puerta ya no pueda abrir y cerrar del modo habitual, es casi imposible que el arreglo del sensor siga funcionando correctamente por lo que se puede detectar fácilmente durante que ciclo falló la puerta.

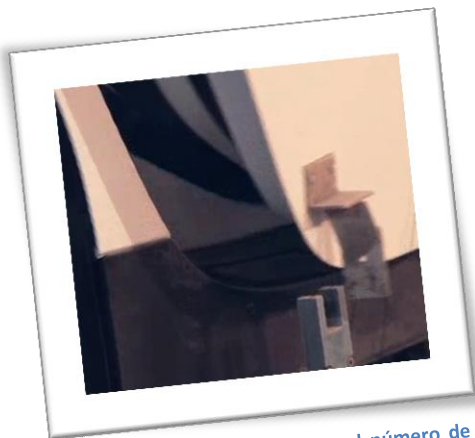


Fig. 5.9 Sensor que registra el número de ciclos efectuados y realiza el monitoreo de la velocidad.

5.1.5 Prueba de calidad y durabilidad en la camioneta Evoque 2012 de Land Rover®

El sistema utilizado por esta marca automotriz se basa en un sofisticado sistema ayudado por robots encargados de realizar la apertura y cierre de las puertas con precisión, de esta forma se puede variar y monitorear la fuerza con la que se realiza cada ciclo haciendo la prueba lo más real posible.

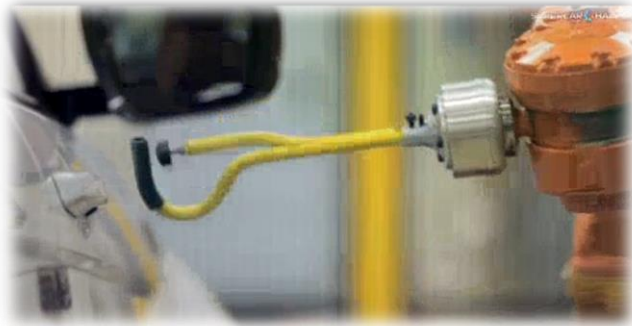


Fig. 5.10 Gripper que simula el movimiento de la mano humana

Como se observa, el gripper que se utiliza, está diseñado de tal forma que sustituye correctamente la acción de la mano humana por lo que las pruebas de repetitividad son muy apegadas a la realidad.

Queda demostrado que el estudio del ciclo de vida de las puertas automotrices ha tenido un gran avance estos últimos años sin embargo, el realizar una búsqueda sobre los dispositivos que se han creado hasta el momento y que se mantienen en operación actualmente en algunas empresas automotrices ayuda a visualizar las deficiencias que existen en cuanto al área de diseño de puertas y el análisis del comportamiento de las mismas. Como ya lo vimos, hay bancos de pruebas muy sofisticados que logran simular el comportamiento de la mano humana al abrir y cerrar las puertas hasta bancos de pruebas muy elementales que abren y cierran la puerta por medio de una cinta o cadena actuada por un pistón de doble efecto.

Los bancos que se han desarrollado hasta el momento, se diseñan para trabajar con los vehículos que produce la empresa en la que opera pero aun realizando las pruebas con el banco más sofisticado, no se ha documentado la existencia de un dispositivo que indique cual fue el motivo de la falla, es por ello que la importancia de crear este sistema radica en que una vez que la puerta ya no cierre de manera correcta, debido a alguna falla de concepto, diseño, manufactura, ensamble u operación, se tenga la certeza de saber que elemento es el que falló y cuáles son las posibles soluciones para tal problemática.

⁵Automóvil del presente (2009), *Historia del automóvil*.

⁶Festo® (2010) *Banco de pruebas para Daimler Chrysler de I + D*.

⁷MGA Research®(2009). *Vehicle Door Slam Testing, Lifecycle and Durability*

⁸NextFirst Engenieering Technologies®.(2010). *Prueba de Resistencia del pestillo en puertas de automóviles*.

⁹General Motors® (2010). *Prueba de impacto bajo condiciones de clima frío para el Chevrolet VoltAGE*

¹⁰Range Rover® (2012). *Prueba de calidad y durabilidad para Evoque 2013*



5.2 Desarrollo de pruebas de impacto en puertas de automóviles en México.

Contenido de carácter confidencial, de ser necesario solicitar la consulta del documento que se encuentra resguardado por:

Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich.

**Jefe del Departamento de Posgrado en Ingeniería
Mecánica**



Contenido de carácter confidencial, de ser necesario solicitar la consulta del documento que se encuentra resguardado por:

Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich

Jefe del Departamento de Posgrado en Ingeniería Mecánica

5.3 ¿Para qué es útil calcular la fuerza de impacto?

Hablar de fuerza es referirnos a uno de los conceptos fundamentales de la Física y se puede interpretar como aquella magnitud que tiende a cambiar el estado de movimiento de un objeto.

Actualmente sabemos que existen cuatro fuerzas en el Universo, la fuerza de gravedad, la fuerza nuclear débil, la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear fuerte indicadas en orden ascendente de intensidad. En mecánica estas fuerzas se consideran como las causantes de los movimientos lineales de los objetos mientras que los causantes de los movimientos rotacionales como es el caso de la puerta de un automóvil, se llaman pares.

Para aplicar el concepto de fuerza a este caso es muy importante analizar el fenómeno que ocurre al momento de cerrar la puerta pues si bien es cierto que todo se origina con una fuerza de empuje debemos corroborar si en verdad esa fuerza con la que se empuja la puerta es la misma con la que impacta y si no lo es, ¿qué es lo que pasa en el trayecto?, una vez que se conozca la magnitud de la fuerza con la que la puerta impacta en la carrocería se puede realizar el análisis de cualquiera de los elementos que conforman la puerta aplicándoles esta fuerza de tal forma que estamos pasando de tener una variable a tener una constante que sea de utilidad al momento de analizar el comportamiento de las bisagras, pernos, sistema de amortiguación, etc.

Una hipótesis que se podría plantear es la de pensar que la fuerza con la que impacta la puerta en el marco de la carrocería es el principal detonante de las fallas en los elementos del sistema. Pues al impactar genera vibraciones que se distribuyen en la puerta llegando a los elementos que la componen, estas vibraciones pueden ser la causante de que se aflojen los tornillos que sujetan las bisagras y causar una falla. Otra vertiente del problema es que el impacto por sí solo puede ocasionar la fractura o flexión de componentes como pernos, pestillos e incluso de la misma puerta lo que puede originar que la puerta no cierre correctamente.



Fig. 5.13 Demostración de una fuerza de empuje durante una prueba de azote.

Observando un poco el fenómeno de estudio, se puede ver que se inicia a partir de una fuerza de empuje sobre la puerta para que incite el comienzo del recorrido. Una vez que la puerta inicia su recorrido lleva una velocidad angular que va disminuyendo a medida que se encuentra con el primer paso del freno de puerta (generalmente son dos pasos o topes). A medida que la puerta disminuye su velocidad al encontrarse con el freno de puerta, también disminuye la fuerza con la que fue impulsada.



Fig. 5.14 Secuencia del cierre de puerta desde que recibe la fuerza que la impulsa hasta el impacto con la carrocería.

Continuando con su recorrido, llega al último paso que detiene la puerta y a partir de este momento ésta deberá recorrer un segmento de arco muy pequeño para impactar con el marco de la carrocería del auto. Una vez que la puerta impacta, lleva una velocidad y una fuerza que al momento de hacer contacto con la carrocería genera efectos que distribuidos en los elementos que forman parte de la puerta generan fallas.

Precisamente en este punto es donde radica la importancia de analizar y validar la fuerza con la que la puerta impacta sobre el marco de la carrocería pues sabiendo la magnitud de la fuerza podemos avanzar un paso más en cuanto al análisis del comportamiento de las puertas y sus elementos para que posteriormente podamos tener sistemas que detecten los diferentes tipos de fallas en las puertas de los automóviles.

Con esto último podemos resolver un problema que hasta la fecha es recurrente en cuanto a automóviles se refiere, pues las puertas son un elemento clave para la seguridad del usuario y pasajeros en un automóvil y si se asegura que éstas no fallarán tendremos una aportación importante.



ELEMENTOS DEL SISTEMA

6. Elementos del sistema

6.1 Puerta

Hablar de la puerta de un automóvil es referirnos a un sistema complejo que se encuentra colocado en un vehículo de manera estratégica. Se compone de elementos que sumados a diversos factores logran describir el funcionamiento de la misma. Tienen como función principal permitir el acceso del conductor y los pasajeros de forma segura al automóvil, sin embargo cumplen de manera alternativa con evitar la expulsión de los usuarios cuando el vehículo está en marcha.



Fig. 6.1 Automóvil con puertas suicidas

En la actualidad existen infinidad de puertas con diferentes formas de apertura y cierre así como variadas formas que se acoplan al diseño del automóvil, sin embargo, la clasificación de las puertas se realiza por la forma en la que abren y cierran, de esta manera podemos encontrar muchos tipos que a su vez se van diversificando. En el mercado podemos encontrar puertas tan raras como las puertas suicidas, que abren al revés de las puertas convencionales, es decir, el eje de las bisagras se encuentra en la parte trasera de la puerta justamente en donde se coloca el pestillo (arnés) de una puerta convencional. Existen puertas llamadas puertas de mariposa, alas de gaviota, puertas de tijera o de navaja, puertas deslizantes etc., algunas más comunes que otras.



Fig. 6.3 Ejemplo de puerta convencional con eje de bisagras al frente y ejemplo de eje de rotación

A pesar de los diferentes tipos de puertas, el análisis de esta tesis se

centra en las puertas convencionales, aquellas que tienen el eje de rotación en la parte delantera como la que se muestra en la figura 6.3. Podría pensarse que son las puertas más sencillas de

analizar pues son las puertas más comunes en el mercado, sin embargo es importante mencionar que a pesar de que son las puertas más utilizadas en los vehículos, ninguna es igual, aunque sí coinciden con algunas características que nos permiten obtener un modelo estandarizado del comportamiento de la puerta.



Fig. 6.2 Automóvil con puertas deslizantes

Para especificar dichas características es necesario observar más allá de lo que percibimos a simple vista, de tal forma que podamos visualizar las características que nos ayuden a estandarizar el fenómeno físico. Así pues tras observar el sistema de la puerta en general, descubrimos que entre las bisagras que conforman el eje de rotación, debe existir cierta simetría. Debemos detectar las piezas que absorben el impacto de la puerta y la sujeción de las bisagras a la carrocería del auto, estas características son muy similares en los distintos modelos de automóviles.

Otro factor importante son los ángulos de posicionamiento de la puerta, existe un ángulo de inclinación de la misma con respecto a la vertical con un valor de aproximadamente 3° , medido con software el ángulo es de 3.6° y medido experimentalmente es de 2.9° como se muestra en las imágenes. La explicación a este ángulo se basa en la aerodinámica del vehículo y justifica la inclinación que tienen las bisagras y el perno.



6.4 Primer ángulo de inclinación de la puerta

El segundo ángulo de inclinación contribuye a la fácil apertura de la puerta ya que dicha inclinación permite que al abrir la puerta ésta también se eleve lo que nos ayuda a evitar que la puerta choque con las banquetas en el momento de la apertura. Este ángulo depende del diseño del auto.

Ambos ángulos son factores de suma importancia pues ayudan a modelar el comportamiento correcto de la puerta. Sin embargo estos elementos se describen con mayor detalle posteriormente.



Fig. 6.5 Segundo ángulo de inclinación de la puerta

Como ya se había mencionado, la puerta es un elemento muy importante en el automóvil pues brinda seguridad a los usuarios y parte de la seguridad de la puerta tiene que ver con que no se desacople de la carrocería cuando el automóvil esté en funcionamiento, para asegurar que esto no suceda las empresas automotrices tienen distintos métodos de sujeción, ya sea soldando las bisagras a la carrocería o atornillándolas, sin embargo ambos métodos tienen sus ventajas y desventajas que dependen del tipo de automóvil y sobre todo del peso de la puerta aunque estos factores van ligados íntimamente con el costo del vehículo, es decir,

dependiendo del tipo de sujeción de la puerta, podemos determinar si el automóvil es económico o no, aunque muchas veces el tipo de sujeción también depende de la marca del carro.

Las bisagras de una puerta son uno de los elementos con mayor importancia pues depende de ellas así como de su posición y ensamble que la puerta se mantenga en el lugar correcto con el paso del tiempo.

Para entender un poco más la importancia que tienen las bisagras podemos observar nuestro automóvil y ver la forma en que las bisagras se encuentran colocadas en la carrocería.

6.2 Freno de puerta

En algunas ocasiones al salir del automóvil cerramos la puerta con una fuerza desmedida, con el paso del tiempo esta acción se vuelve recurrente por lo que se van deteriorando las puertas automotrices. Al ser este un problema muy común se integró en la puerta un elemento cuya función es disminuir la fuerza con la que ésta impactará sobre el chasis una vez que se le aplica una fuerza de gran magnitud. A este elemento se le conoce como **freno de puerta**.

Al igual que la puerta, el diseño del freno depende mucho de la geometría del automóvil así como la relación de masa que existe entre la carrocería y la puerta, esta última influye en demasía pues el freno de puerta únicamente se puede accionar con el **brazo de palanca** que se genera en el extremo de la puerta (posición de la manija). El brazo de palanca es la línea imaginaria que une de forma perpendicular la línea de acción de la fuerza con el centro del momento generado.



Fig. 6.6 Freno de puerta de Chevy 2007

De esta forma si la fuerza se aplica a una corta distancia del freno de puerta, es decir con un brazo de palanca de pequeña magnitud no se logrará cerrar la puerta, sin embargo entre mayor sea el brazo de palanca será más fácil cerrar la puerta. Con lo anterior podemos deducir que el mecanismo del freno de puerta está correctamente diseñado para la distancia en la que se encuentra colocado y esta distancia está dada por la puerta.

En la siguiente imagen se explica el principio del brazo de palanca por medio de una analogía para que quede claro el concepto.



Fig. 6.7 La palanca que compone a la puerta es de segundo grado, es decir, la carga está entre el punto de apoyo y la fuerza.

Como se muestra en el diagrama y hablando matemáticamente al aplicar la fuerza separada cierta distancia del punto de apoyo (freno de puerta) se genera un momento, sí se realiza una diferencia o resta de momentos podemos percatarnos que a medida que se aleja la fuerza aplicada al cerrar del punto de apoyo generamos un momento de mayor magnitud lo que vence al momento generado por la resistencia que opone el brazo de palanca. Sí por el contrario se acerca la fuerza aplicada al punto de apoyo, el momento generado por la resistencia será cada vez mayor al de la fuerza que se aplica al cerrar por lo que será prácticamente imposible mover la puerta.



Fig. 6.8 Imagen detallada del freno de puerta



El mecanismo utilizado en el freno de puerta está formado en la mayoría de los casos por un poste o solera con agujeros que tienen la función de pausar el recorrido de la puerta cada que se introducen en la caja de resortes. Al realizar dicha pausa disminuye la velocidad que la puerta lleva durante su recorrido con lo que también se disminuye la fuerza de impacto de la misma en la carrocería o marco de la puerta.

A decir verdad, no son orificios, son pequeñas cavidades que alojan a un pequeño tope ubicado dentro de la caja de resortes, conforme la puerta va cerrando el poste que contiene a dichas cavidades se va introduciendo en la caja de resortes por lo que el tope embona en el primer orificio y posteriormente en el segundo realizando las pausas en la trayectoria de la puerta. Si se tuviera que accionar el freno con la mano resulta complicado ya que se requiere de una fuerza de gran magnitud para lograr moverlo, es ahí en donde radica la importancia del brazo de palanca.

Un dato importante que no debe pasar desapercibido es que el freno está manufacturado en una aleación metálica que no es revelada por las empresas automotrices y tienen un recubrimiento plástico lo que evita la oxidación y al mismo tiempo disminuye la fricción.

6.3 Sistemas de amortiguación

El sistema que se analiza en este trabajo de tesis está formado principalmente por tres elementos, el primero es la puerta, el freno de puerta es el segundo y el tercer lugar pero no menos importante lo ocupa un elemento que a simple vista solo nos sirve de **aislante** térmico e impermeable, este elemento es el empaque de neopreno o marco de goma.



Fig. 6.9 Empaque de neopreno

Ubicado en la carrocería, este marco de goma manufacturado en neopreno tiene la función de reducir el impacto de la puerta sobre el automóvil. Comúnmente se puede decir que este empaque ayuda a evitar que el agua se introduzca en el carro en climas lluviosos, si bien es cierto cumple con esta cualidad, no es su función principal.

Para entender la importancia de este elemento en la puerta de los automóviles debemos ver más allá de lo **evidente**, con esto me refiero a entender el comportamiento del material, sus

propiedades físicas así como la geometría del marco de goma.

Como ya se mencionó, el marco de goma o empaque está compuesto de **neopreno** (policloprene) que pertenece a una familia de cauchos sintéticos por polimerización del cloropreno. En general tienen una buena estabilidad química y mantiene la flexibilidad en un amplio rango de temperaturas, en la industria automotriz se utiliza en sistemas de control de vibración lo que proporciona un amortiguación al movimiento natural de los motores y las máquinas. Este polímero es útil debido a su capacidad de absorber **energía mecánica**. La ventaja de un sistema de amortiguación es que nos brinda la capacidad de prolongar la vida útil de los motores y accesorios conectados a estos y reducir su ruido de operación.

El siguiente paso para el análisis del marco de goma es observar su geometría ya que la interacción del polímero con el automóvil depende de la configuración de marco. En la imagen 6.10 se puede ver un corte transversal del empaque, sí se observa con detenimiento se puede notar que el perfil con el que se manufacturó el empaque tiene dos **cámaras de aire**, esto provoca que al momento del choque de la puerta en el marco de la carrocería, el empaque absorba el golpe.

Haciendo una analogía muy simple se podría comparar dicho fenómeno con una persona que cae desde 10 metros de altura sobre un colchón inflable, el colchón evitará que la persona impacte directamente en el suelo, de igual forma, las cámaras de aire que tiene el marco de goma o empaque evitan que la puerta impacte directamente sobre el marco de la puerta de la carrocería con lo que evita la **deformación** de la puerta.



Cámaras de aire

Si bien es cierto que el neopreno puede resistir condiciones climáticas extremas, es importante mencionar que para una aplicación como esta en la que se expone al material a comportamientos repetitivos (pruebas de fatiga) tarde o temprano se agotará la vida útil del elemento provocando grietas en el material por las que escape el aire contenido en las cámaras, cuando se llegue a este momento el empaque dejará de cumplir con su función lo que conlleva a que tengamos impactos de mayor magnitud que den pie a la deformación de la puerta o del marco de la puerta sobre la carrocería provocando que al cerrar la puerta del vehículo esta no se coloque en su posición correcta.¹²

Fig. 6.10 Corte transversal del empaque de neopreno

¹²Tecnología de los plásticos (2011) *Policloropreno (Neopreno)*.

6.4 Factores que influyen en el cálculo de la fuerza

Existen algunos factores que no se identifican con facilidad en el fenómeno físico que se describe, sin embargo, son estos factores los que hacen la diferencia entre un sistema ideal y un sistema real. Los factores a los que se hace referencia en este segmento son los ángulos de inclinación de la puerta.

Cuando se realizan las pruebas de durabilidad a las puertas, se someten a las condiciones más extremas y lo más parecidas a la realidad como sea posible, es por ello que no se hace una idealización del sistema pues quizá en el sistema ideal la puerta nunca llegará a fallar por lo que no se podría realizar un análisis de fallas correcto y con esto no se sabrá si el diseño de la puerta es confiable o no.

Ahora bien, cuando se habla de confiabilidad en puertas se hace referencia a la capacidad de la puerta de realizar su función de manera provista sin incidentes por el periodo que le fue especificado y bajo las condiciones indicadas. En este principio radica la importancia de considerar los ángulos pues si son descartados la puerta ya no estaría trabajando bajo las condiciones indicadas.

Los ángulos de inclinación de la puerta, describen la trayectoria de la misma desde el momento en que inicia su carrera impulsada por una fuerza externa y hasta el momento en que impacta con el marco de la carrocería.

Los ángulos forman parte de las variables comunes en todos los modelos de automóviles, todas y cada una de las empresas automotrices tienen diseños muy variados que permiten tener una diversidad en cuanto a este factor se refiere, sin embargo y a pesar de que es un factor común en todas las puertas, la magnitud de este ángulo varía dependiendo del diseño exterior del automóvil.

Los ángulos que se consideraron para realizar este trabajo de tesis son dos, el primero de ellos es el ángulo con el que la puerta va a cerrar y a abrir por lo cual se nombró como ángulo de alineación de las bisagras, el segundo es un factor



Fig. 6. 11. Vista de la inclinación de la puerta con respecto a la referencia vertical

de seguridad cuya función se basa en los principios de la aerodinámica, a este ángulo se le nombró como **ángulo de inclinación de la puerta**.

6.4.1 Ángulo de alineación del eje de las bisagras

Como se ha estado mencionando durante este capítulo, el posicionamiento de los elementos de la puerta dependen en gran medida de la ubicación de las bisagras pues éstas determinan el eje de rotación de la puerta.

El ángulo con el que están alineadas las bisagras trabaja en conjunto con el freno de puerta para determinar el ángulo de apertura y cierre para evitar que al abrirla o cerrarla se dañe al impactar con las banquetas. Cabe mencionar que ésta es una variable con la que todos los automóviles cuentan, sin embargo, al ser un factor que depende totalmente del diseño del automóvil, modifica la trayectoria de la puerta dependiendo de los grados de inclinación que se tenga. Lo que simplifica los cálculos es que este ángulo se puede medir y obtener su magnitud por lo que pasa de ser una variable a una constante en el análisis del fenómeno físico que se estudia.

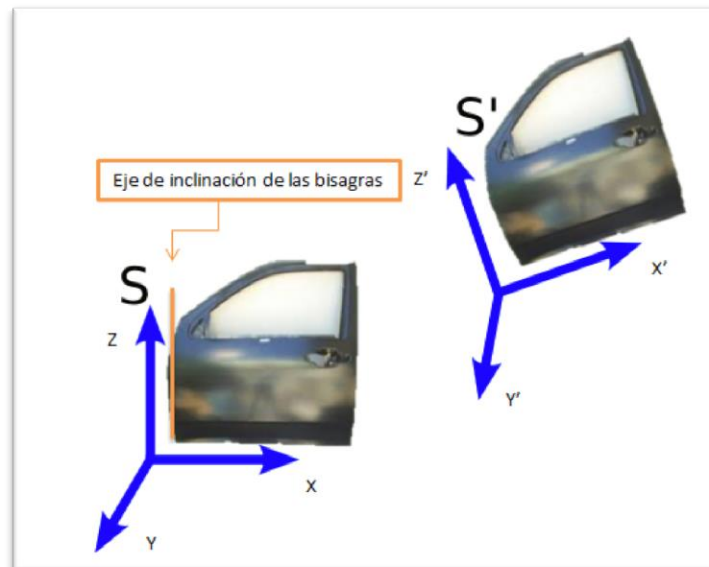


Fig. 6.12 Representación del eje de rotación de la puerta

La figura 6.12 describe la rotación a la que se somete la puerta si el sistema de referencia se coloca en la esquina inferior derecha de la puerta (viendo la puerta desde la perspectiva que se muestra en la figura), es decir, en la parte inferior del eje de rotación, a este sistema se le denomina **sistema de referencia inercial**, posteriormente se presenta de forma exagerada la inclinación que tiene el sistema por lo que ahora se pasa de un sistema inercial a un **sistema de referencia local**. Como ya se había mencionado, no se puede omitir ningún detalle que pueda repercutir en un análisis erróneo.

6.4.2 Ángulo de inclinación de la puerta

El ángulo de inclinación de la puerta es prácticamente imperceptible, se deben realizar algunos experimentos para determinar la existencia del mismo. A diferencia del ángulo de alineación de las bisagras, este ángulo no surge del diseño estético del automóvil si no que se sustenta en los principios de la **aerodinámica** para que su diseño sea preciso.

La aerodinámica es de gran importancia en un elemento que tiene que interactuar con el aire pues con una buena aerodinámica se puede reducir el consumo de combustible y mejorar el comportamiento dinámico al aumentar las velocidades. Haciendo este tipo de consideraciones los fabricantes automotrices buscan ofrecer la **menor resistencia** posible al aire.



Fig. 6.13. Hacia fines del siglo XIX, Aurel Persu un ingeniero rumano concluyo que el vehículo debía tener la forma de una gota de agua, tendencia que tendría influencia hasta la actualidad.

Para entender este fenómeno debemos saber primero que la aerodinámica es la rama de la física que estudia las interacciones entre el aire como fluido y un cuerpo, en este caso el automóvil. Sí se habla específicamente de resistencia aerodinámica, se define como la fuerza que se opone al avance del auto al desplazarse inmerso en el aire y que es resuelta por la potencia del motor. Sin embargo, las fuerzas aerodinámicas se incrementan de manera exponencial con el aumento de la velocidad, influyendo significativamente sobre la estabilidad de marcha.

Daniel Bernoulli (1700-1782) realiza un importante avance científico al analizar el comportamiento del flujo laminar y hasta hoy se ha convertido en un punto crítico en el diseño del automóvil.

Realizando algunos experimentos en los que sometía distintas geometrías a flujos de aire, Bernoulli descubre lo siguiente:

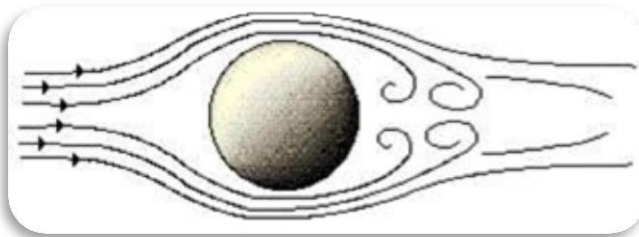


Fig. 6.14. Esfera sometida a un flujo de aire

Una **esfera** experimenta media resistencia al aire pues el viento no choca directamente con alguna de sus caras pues la geometría de la esfera no está conformada por caras planas que detengan el flujo del aire oponiendo una mayor resistencia.

Una geometría parecida a un **ala de avión** minimiza en gran medida la resistencia al aire ya que la posición en la que está colocada permite que el aire siga fácilmente su curso manteniendo la dirección natural del mismo. Igualmente la geometría con superficies redondeadas ayuda a que el viento no choque directamente contra una de sus caras.

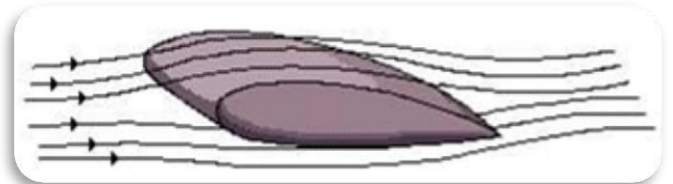


Fig. 6.15. Ala de avión sometida a un flujo de aire.

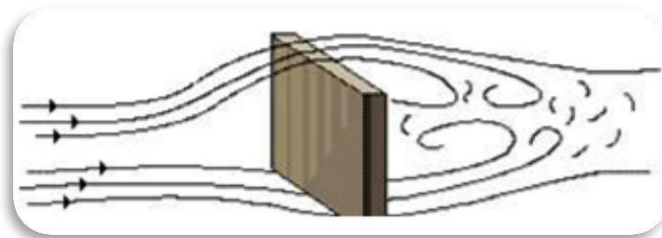


Fig.6.16. Caja de caras planas sometida a un flujo de aire.

La geometría que ofrece mayor resistencia aerodinámica son los **objetos planos** con aristas marcadas, esto se debe a que existe una mayor superficie de contacto entre el aire y el cuerpo por lo que se genera una mayor fuerza de empuje y como reacción a esta fuerza se genera una resistencia que se opone al movimiento

de igual magnitud pero de sentido contrario. Esto podemos observarlo en la figura 6.17 pues se tiene una caja de cara plana colocada de frente al flujo del viento.¹³

Finalmente se debe entender que las láminas de fluido que adquieren mayor velocidad disponen de menor presión por lo que el diseño del automóvil conserva esa misma idea pero a la inversa provocando el empuje hacia el suelo para mejorar la estabilidad y la velocidad en curva.¹⁴

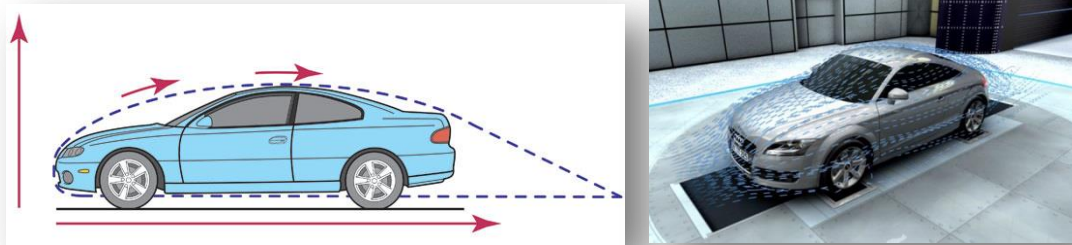


Fig. 6.17 Diseño aerodinámico del vehículo

Como se muestra en la figura de la izquierda la importancia del ángulo de inclinación de la puerta radica en que la geometría del automóvil debe permanecer inmersa en una gota de agua y con esto evitar la resistencia al aire.



¹³Infomanejo (2013) *La aerodinámica en el automóvil*.

¹⁴Audi® (2014) *Eficiencia, Medidas aerodinámicas*.



ANÁLISIS DINÁMICO DE LA FUERZA



7. Análisis dinámico de la fuerza de impacto y descripción del fenómeno físico de forma experimental.

7.1 Descripción del fenómeno físico

Se entiende como fenómeno físico a aquella modificación a un cuerpo en la que **no se afecta la naturaleza de la materia** que lo constituye. Puede darse un cambio en la forma del cuerpo al estirarse, romperse o como en la plastilina cambiar de forma pero la materia permanece en el fondo como al principio pues se sigue teniendo plastilina.

Estos fenómenos desaparecen al cesar la causa que los origina, en su mayoría son fenómenos reversibles. Algunos otros fenómenos físicos son el desplazamiento de un cuerpo, el paso de la electricidad por los cables, la dilatación de un cuerpo al ser calentado, el paso de la luz a través de los cristales de una ventana o de una lente, etcétera.

En este trabajo de tesis se hace referencia a un fenómeno físico que ocurre cuando se desplaza un cuerpo, analógicamente ese cuerpo en desplazamiento es la puerta de un automóvil y la causa que lo origina es la fuerza con la que la puerta se empuja para cerrarla.

Para entender el fenómeno de estudio se plantea la siguiente situación:

Un conductor que acaba de estacionar su vehículo, abre la puerta ya que se dispone a salir del automóvil, se baja del carro y una vez que está de pie junto a la puerta aplica una fuerza sobre la misma que la impulsa de tal forma que ésta inicia su recorrido hasta impactar con el marco de la carrocería. Una vez que la puerta impactó contra el marco de goma que protege a la carrocería, esta se engancha a la carrocería por medio del pestillo o arnés de la puerta y la energía que absorbe el marco de neopreno cuando la puerta se impacta, la transmite nuevamente a la puerta que se mantiene oscilando hasta que lentamente va amortiguándose y la puerta llega al estado de reposo nuevamente.

Haciendo referencia al breve estudio de usuarios que se realizó se observa que este mismo fenómeno se lleva a cabo en cualquier situación que implique cerrar la puerta de un automóvil incluso cuando la persona se ve afectada por su **estado de ánimo**, es decir, cuando se encuentran enojados ya que tienden a cerrar la puerta con una fuerza mayor o cuando se encuentran contentos que cuidan de sobremanera el automóvil.

Cuando se hace referencia a este fenómeno físico, pareciera que es muy sencillo ya que con el paso del tiempo se ha convertido en una acción que se realiza cotidianamente. Sin embargo, cuando se trata de ver más allá de lo evidente surgen algunas preguntas que se deben responder para entender el fenómeno correctamente, analizando el movimiento podrían surgir preguntas como ¿qué pasa cuando esa fuerza con la que la puerta impacta rebasa a la fuerza que el diseño

del automóvil permite?, ¿cómo se acoplan los elementos de la puerta para solucionar dicho problema? ¿Cómo se conoce el punto de la puerta en donde se lleva a cabo el impacto? ¿Qué partes sirven para amortiguar el impacto?

7.2 Análisis dinámico de la fuerza de impacto

7.2.1. Impulso y momentum lineal

Cuando un problema físico involucra **fuerza, velocidad y tiempo**, es un fenómeno que se relaciona con el impulso y momentum. Para entender este principio se parte de la ecuación de movimiento, la cual se integrará con respecto al tiempo. La ecuación de movimiento para una partícula de masa m se puede escribir como:

$$\sum F = ma = m \frac{dv}{dt}$$

Donde a y v se miden desde un marco de referencia inercial. Así pues reordenando los términos e integrando entre los límites $v = v_1$ en $t = t_1$ y $v = v_2$ en $t = t_2$ se tiene:

$$\sum \int_{t_1}^{t_2} F dt = m \int_{v_1}^{v_2} dv$$

O bien

$$\text{Impulso} \rightarrow \left(\sum \int_{t_1}^{t_2} F dt \right) = \left(mv_2 - mv_1 \right) \leftarrow \text{Momentum lineal}$$

A esta ecuación se le conoce como principio del impulso y momentum lineal. A partir de la derivación se puede ver que es simplemente la integración de la ecuación del movimiento con respecto del tiempo. Esta ecuación es un medio directo para obtener la velocidad final v_2 de la partícula después de un periodo de tiempo específico, cuando se conoce la velocidad inicial y las fuerzas que actúan sobre ésta son constantes o pueden ser expresadas como funciones del tiempo.

Para continuar con el análisis, a cada uno de los vectores de la forma $L=mv$ que aparecen en la ecuación de movimiento integrada se le denomina **momentum lineal**. Como m es un escalar

positivo, el vector momentum lineal toma la misma dirección de la velocidad. Las unidades con las que se puede cuantificar este principio son de masa-velocidad como Kg*m/s o bien slug*pies/s.

La integral que aparece en la ecuación $I = \int F dt$ se le llama **impulso**. Este término es una cantidad vectorial que mide el efecto de una fuerza durante el tiempo que ésta actúa. Como el tiempo es un escalar positivo, el impulso actúa en la misma dirección de la fuerza, su magnitud tiene unidades de fuerza-tiempo, es decir, N*s o lb*s. Si la fuerza es expresada como una función del tiempo, el impulso puede ser determinado por la evaluación directa de la integral.

Cuando la fuerza es constante en magnitud y dirección, el impulso resultante es $I = F(t_2 - t_1)$. Para la resolución de problemas la ecuación se reescribe de la siguiente forma:

$$mv_1 + \sum \int_{t_1}^{t_2} F dt = mv_2$$

La cual establece que el momentum lineal de la partícula en t_1 , más la suma de todos los impulsos aplicados a la partícula desde t_1 hasta t_2 , es equivalente al momentum final de la partícula en t_2 . Para entender el tema con frecuencia se elaboran diagramas de impulsos como el que se representa en la figura 7.1 con la finalidad de determinar la dirección del impulso a lo largo de la trayectoria de la partícula.¹⁵

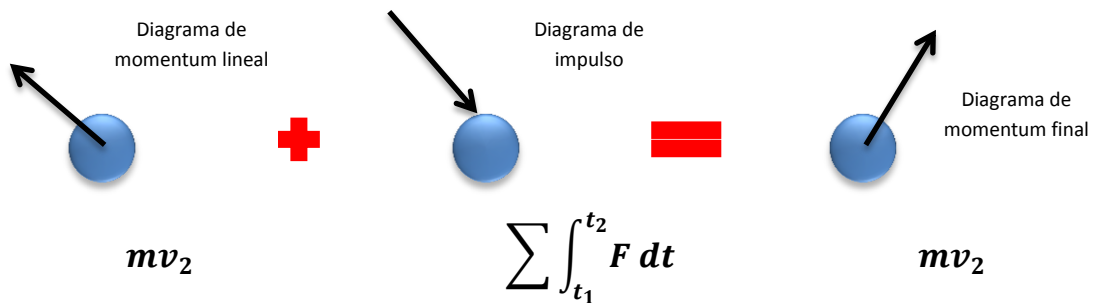


Fig. 7.1 Diagrama de impulso y momentum lineal

¹⁵ Hibbeler, R.C (2006). *Mecánica para ingenieros, dinámica*, (Cap. 15). México: Editorial Continental

7.2.2. Impulso y momentum angular

Hasta este momento se ha establecido el análisis para una partícula que tienen un movimiento lineal, sin embargo el fenómeno en el que se basa este trabajo de tesis es un movimiento rotatorio, que se aplica a un cuerpo rígido el cual describe un movimiento alrededor de un eje, en este caso el eje de rotación de las bisagras por lo que para analizar el fenómeno físico que se plantea debemos aplicar el concepto de impulso y momentum angular.

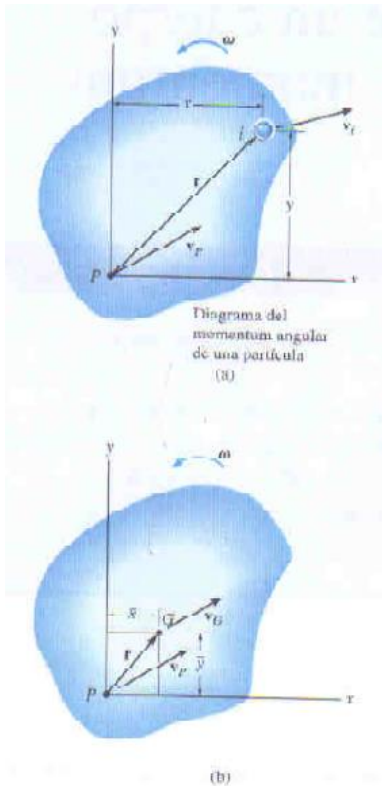


Fig. 7.2 Diagrama de momentum angular de una partícula extraído del libro Mecánica para Ingenieros, Dinámica de R.C. Hibbeler

Considere el cuerpo que se presenta en la figura 7.2a el cual está sometido a un movimiento plano general. 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 figura 7.2b, entonces:

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

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:

$$(H_P)_i = r \times m_i v_i$$

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

$$(H_P)_i k = m_i (xi + yj) \times [(v_p)_x i + (v_p)_y j + \omega k \times (xi + yj)]$$

$$(H_P)_i = -m_i y (v_p)_x + m_i x (v_p)_y + m_i \omega r^2$$

Haciendo que $m_i \rightarrow dm$ e integrando sobre toda la masa del cuerpo, se obtiene:

$$H_P = -\left(\int_m y dm\right) (v_p)_x + \left(\int_m x dm\right) (v_p)_y + \left(\int_m r^2 dm\right) \omega$$

Aquí 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 $\bar{y}m = \int y dm$ y $\bar{x}m = \int x dm$, 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 $I_p = \int r^2 dm$. Entonces:

$$H_p = \bar{y}m(vp)_x + \bar{x}m(vp)_y + I_p\omega$$

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,

$$H_G = I_G\omega$$

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.

Esta ecuación describe sólo la parte del momentum angular, 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:

$$\sum M_G = I_G\alpha = I_G\left(\frac{d\omega}{dt}\right).$$

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

$$\sum M_G = \frac{d}{dt}I_G\omega \dots \dots (1)$$

Multiplicando ambos lados por dt e integrando a partir de $t=t_1, \omega=\omega_1$ a $t=t_2, \omega=\omega_2$, 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:¹⁶

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

¹⁶ Hibbeler, R.C (2006). *Mecánica para ingenieros, dinámica, (Cap. 19)*. México: Editorial Continental

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 este intervalo de tiempo. 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.

La ecuación tres es la que se utilizará para resolver el problema que se plantea en esta investigación, de donde I_O es el momento de inercia de la puerta que se utilice para realizar la prueba,, para ello se debe obtener primero su centro de gravedad también de forma experimental; ω es la velocidad angular del cuerpo en el instante seleccionado y t_1 es el tiempo en que inicia el impacto y t_2 es el tiempo en que finaliza el impacto, estos datos se miden directamente en la gráfica de velocidad para cada prueba según sea el caso. La diferencia entre $t_2 - t_1$ darán como resultado el intervalo de integración.

7.2.3. Reconocimiento de los elementos del sistema

A simple vista se podría ver que existe cierta **simetría** entre las puertas y esto se debe a la función que cumple cada una de ellas en el auto.

Para entender el sistema se desarmó un automóvil, es decir se desmontaron una a una las puertas de vehículo para observar la manera en que están colocadas las bisagras. Con esto se puede observar la **alineación** de las bisagras y algunos factores que influyen en el desempeño de la puerta.

Se desmontó la puerta delantera derecha del carro (puerta de copiloto) para poder observar la



Fig. 7.3 Puerta de copiloto de Chevrolet Malibú 2012

forma en que se encuentran dispuestas las bisagras en el mismo, de tal forma que se puede ver que las bisagras están colocadas simétricamente con respecto a un eje imaginario que parte el automóvil de forma horizontal, es decir, la bisagra de arriba es simétrica con respecto a la de abajo.

El vehículo utilizado para identificar los componentes de la puerta fue uno de gama media por lo que utilizaba tornillería como método de sujeción. De tal

forma que para desmontar la puerta fue necesario desatornillar las piezas que la unen con la carrocería, este paso resultó enriquecedor para identificar la magnitud de apriete en las bisagras. A los tornillos que sujetan la bisagra superior se les aplica un mayor par que a los que sujetan la bisagra inferior, analizando este fenómeno podemos aseverar que esto se debe a que la bisagra superior tienen la mayor carga y la bisagra inferior únicamente da soporte a la puerta, esto último se comprueba con la forma de la puerta.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los factores dependen en gran medida del diseño del automóvil, es decir, el eje de simetría puede diferir de este modelo pero el factor sigue existiendo. A continuación se muestran algunas imágenes de las bisagras de esta puerta y de la posición en la que se encuentran colocadas.

En la figura de la derecha (Fig. 7.4) se observa claramente la simetría que existe entre la bisagra superior e inferior, a cada lado de la bisagra se encuentra colocada una pestaña que sirve para sujetarla a la carrocería, el dato que hay que resaltar es que las pestañas no tienen la misma alineación. Las pestañas internas (pestañas de sujeción recta) sirven para mantener alineadas las bisagras en el mismo eje de rotación y las pestañas externas (pestañas con ángulo) sirven para compensar la curvatura que tiene el diseño de la puerta.



Fig.7.4 Bisagras de puerta de copiloto

Continuando con el reconocimiento de las



Fig. 7.5 Posición de la bisagra en la carrocería

partes del sistema se puede observar que los orificios en los que se colocan las bisagras sobre la carrocería tienen algunos detalles interesantes. Uno de esos detalles es que los barrenos en los que se introducen los tornillos, no son concéntricos como se puede notar en las imágenes (Fig.7.5). Este detalle no es un error de manufactura como podría pensarse, se debe a que bisagras no están colocadas sobre superficies totalmente planas, es decir, se encuentran colocadas en distintos planos por lo que la pequeña **elipse** que se dibuja en torno al tornillo ayuda al ensamble y la movilidad de la bisagra proporcionándole un grado

de libertad .



Otro detalle importante que se percibe en la imagen es el o´ring que se coloca en cada uno de los orificios de los tornillos los cuales tienen la función de absorber las pequeñas vibraciones que tienen los tornillos al cerrar la puerta o simplemente cuando el carro se encuentra en marcha ya que evita que con el movimiento la puerta se afloje e incluso pueda desprenderse del resto del vehículo.

7.2.4. Prueba del rastro de pintura en el impacto

Para cumplir con el objetivo que se plantea en este trabajo de tesis fue necesario realizar algunos experimentos que permitieran detectar los factores o puntos estratégicos que describen el comportamiento de la puerta y que a su vez nos encaminarían a la solución del problema planteado. Basándonos en la observación de las partes que componen al sistema se diseñó la prueba del **rastro de pintura**, la cual consiste en cubrir el marco de neopreno con una mezcla de gis y agua, posteriormente se realiza el impacto de la puerta y se observan los puntos en los que la pintura dejó un rastro sobre la puerta, esto con la finalidad de encontrar aquellos puntos en los que se deberán colocar los sensores posteriormente para realizar los siguientes experimentos. La prueba se llevó a cabo de la siguiente manera:

Objetivo

Detectar por medio de las marcas de pintura que se registran en la puerta al impactar sobre la carrocería, los **puntos estratégicos** de la puerta, es decir, los puntos en los que se lleva a cabo un mayor o menor impacto dependiendo de la marca de pintura transferida del marco de goma a hacia la puerta.

Componentes

- ◆ Polvo de gis o tiza
- ◆ Agua
- ◆ Un automóvil



Fig. 7.6 Componentes de la prueba del rastro de pintura

Protocolo de pruebas

Lo primero que se debe realizar es verificar que la puerta del automóvil se encuentre alineada correctamente, para ello abrimos la puerta y la cerramos de manera normal, es decir, sin aplicar una fuerza de gran magnitud (no azotarla). Al cerrar la puerta se debe observar (sentir) como se engancha el pestillo correctamente y al estar completamente cerrada, los márgenes de la puerta deben coincidir perfectamente con los márgenes de la carrocería, en algunos vehículos el diseño nos ayuda a alinear la puerta pues algunas líneas del diseño físico deben completarse al cerrarla. Cuando las puertas se encuentran desalineadas, al tratar de cerrarlas rozan el pestillo antes de engancharse lo que genera efectos secundarios en el funcionamiento de la puerta.

Con todo lo anterior mencionado, sí la puerta se encuentra desalineada, se debe proceder a alinearla nuevamente.

Una vez alineada la puerta, se realiza la mezcla del polvo de gis con agua (el color de gis que se elija es indistinto), la mezcla debe ser homogénea y lo más líquida posible ya que de esta forma el polvo de gis se mantiene hidratado para que al momento del impacto la pintura no se encuentre seca y no se transfiera a la puerta.

El paso siguiente es colocar la puerta abierta a 90° para que no interfiera al momento de aplicar la pintura sobre el marco de goma (marco de neopreno). Posteriormente se colocará la pintura en el marco de goma y en el aro metálico en el que engancha el pestillo tratando de que sea una capa uniforme de un milímetro de espesor aproximadamente.



Fig. 7.7 Capa de pintura colocada sobre el marco de goma

Inmediatamente después (para evitar que la pintura se seque) se coloca la puerta con un ángulo de apertura de 70° ya que es la magnitud del ángulo que se encuentra antes de los dos pasos del freno de puerta, es decir, con este ángulo la puerta queda apenas un poco más abierta de lo que el primer paso del freno lo permite.

Ya colocada la puerta se procede a empujarla con una fuerza arbitraria pero mayor a la fuerza que se requiere para **vencer la resistencia** del freno de puerta. Seguido a esto, la puerta iniciará su carrera hasta el momento en que se detenga impactando sobre la carrocería del automóvil.

Cuando la puerta haya impactado se debe abrir nuevamente para observar los puntos en los que se tiene una marca de pintura y los puntos en los que no se registró la marcad de pintura.

La prueba se debe realizar con distintas fuerzas de excitación al sistema, es decir, cerrar la puerta impulsándola con fuerzas arbitrarias para ver si ésta se comporta de la misma forma en situaciones diferentes.

Resultados de la prueba del rastro de pintura

Como resultado de la prueba se observa el rastro de pintura sobre las partes de la puerta que tienen contacto con el marco de goma ya que es en donde se colocó la pintura. En la fig. 7.8 se especifican las áreas de mayor y menor impacto resultantes de la prueba.

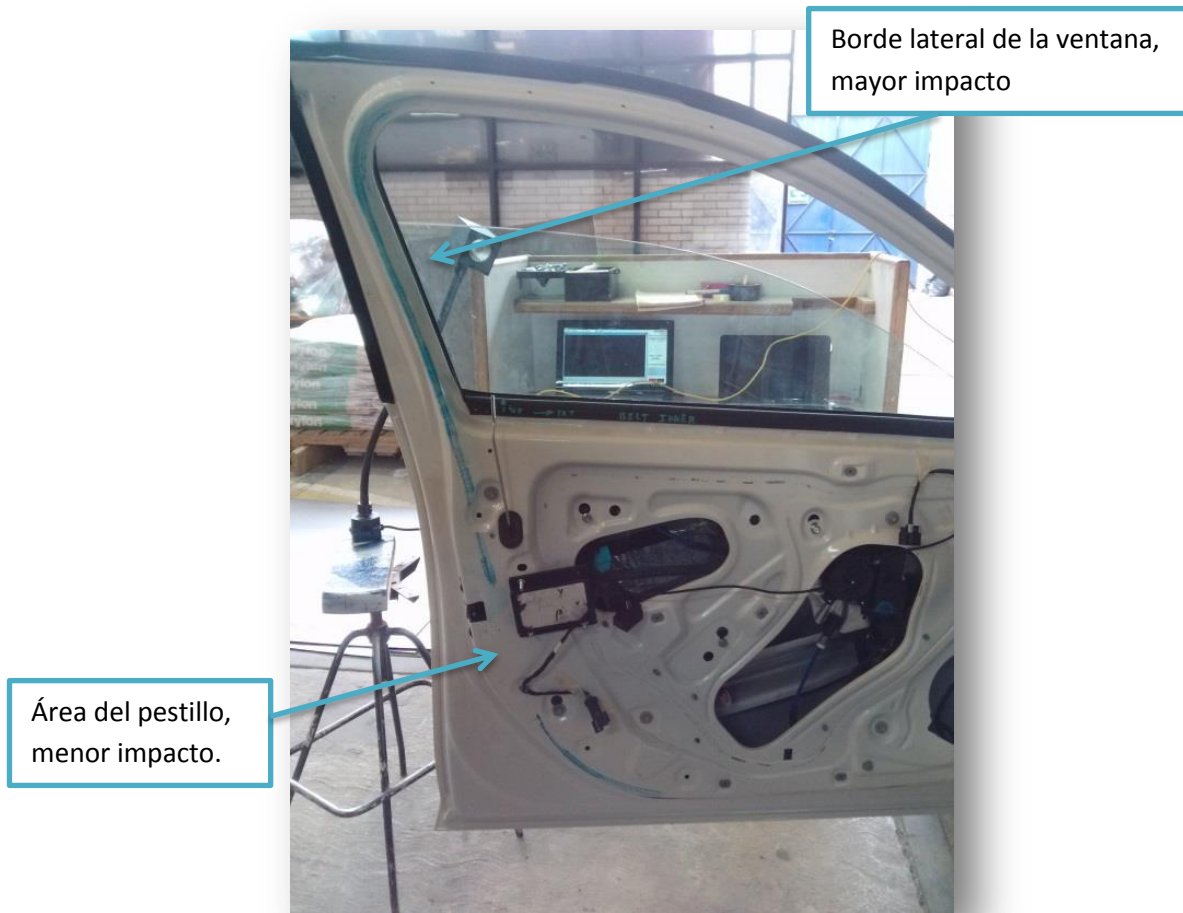


Fig. 7.8 Rastro de pintura sobre la puerta del automóvil

Las áreas se pueden identificar como áreas de menor y mayor impacto debido a que esas secciones determinan los puntos en los que la puerta impacta con mayor fuerza o incluso los puntos en los que no toca el marco de goma, esto se determina con el rastro de pintura.

Hipotéticamente se esperaba que todo el contorno de la puerta presentara un rastro de pintura pero al no ser así se debe profundizar en el análisis de los resultados obtenidos. Pues bien, si nos referimos a la orientación de la puerta de la misma forma en que se encuentra en la fig. 7.8, en la



Fig. 7.9 Falla por deformación en la puerta

parte superior izquierda tenemos una zona de **mayor impacto** lo cual quiere decir que es un área en la que la puerta impacta uniformemente sobre el marco de la carrocería y toca completamente el marco de neopreno cuando impacta, de tal forma que esta esquina de la puerta es un punto débil en la estructura de la misma y es por ello que en ocasiones se encuentran automóviles con las puertas deformadas de las esquinas como el caso que se muestra en la fig. 7.9. Si bien es cierto que la deformación que se percibe es casi insignificante,

es una falla que no permite que la puerta selle de forma correcta al cerrar el automóvil lo que provoca que rompa con el sello hermético de la puerta y en ocasiones permite el paso del agua al interior, sin mencionar que dicha deformación podría dar un indicio de rediseño de la estructura de la puerta.



Fig. 7.10 Rastro de pintura sobre el aro metálico

Posteriormente se debe enfrentar el reto de entender por qué existen áreas de menor impacto y si existen a qué se debe. En la parte inferior izquierda, muy cerca de la manija se encuentra un área de menor impacto, es decir, una sección en la que la puerta no toca completamente el marco de goma y esto nuevamente se puede determinar por el rastro de pintura sobre el contorno de la puerta ya que en esta sección en particular no existe tal. Pero ¿por qué la puerta no impacta directamente en esta sección?, para contestar esta pregunta se debe observar un elemento más en el sistema, dicho elemento no es base de estudio de esta tesis como el marco de goma y las bisagras pero es un elemento que debe tratarse con detenimiento.

Llamado en ocasiones como arnés o pestillo, se localiza justamente en el área de menor impacto de la puerta, su función principal es proporcionar la sujeción de la puerta una vez que ésta se



encuentra cerrada para que cuando el automóvil esté en marcha no corra el riesgo de que la puerta se abra y el usuario sea expulsado del auto. En la figura 7.10, se observa el rastro de pintura sobre el aro metálico sobre el que se sujeta el pestillo o arnés.

La pieza metálica así como el pestillo están diseñados de tal forma que al momento que impacta la puerta se crea una burbuja de aire en el pestillo proporcionándole un muelleo que se comporta como amortiguador y absorbe el impacto. Como el pestillo o arnés se engancha en el aro metálico antes de que la puerta impacte con el marco de neopreno, reduce la velocidad que lleva la puerta durante su recorrido y en ese punto amortigua el impacto.

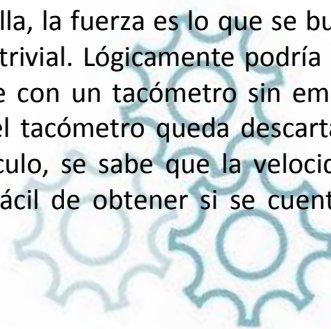
Finalmente con el análisis realizado se tomó la decisión de colocar el sensor (acelerómetro) en el área de menor impacto ya que es una sección en la que se tienen diversos factores que analizar pues hasta el momento influye el brazo de palanca del freno de puerta y el pestillo que son factores que modifican de forma directa en el comportamiento de la puerta.

7.2.5. Prueba preliminar de impacto

Una vez que se ubicaron los puntos de menor y mayor impacto se puede saber qué secciones resulta conveniente monitorear para observar el comportamiento de la puerta. Entendiendo el fenómeno físico se puede determinar qué parámetros es necesario medir para obtener información que detalle el comportamiento de la puerta.

Si bien es cierto que se necesita medir la fuerza de impacto de la puerta sobre la carrocería, es importante saber que existen variables que interfieren indirectamente en el cálculo de la fuerza, uno de estos parámetros es la **aceleración**. Pero ¿de qué nos sirve monitorear la aceleración? Como se describió en el **análisis dinámico**, la puerta es un cuerpo rígido que se encuentra en movimiento y al impactar sobre la carrocería en un instante determinado se vuelve una problemática que se relaciona directamente con impulso y momentum de tal forma que se deben considerar la **fuerza, velocidad y tiempo**.

El tiempo es una variable que se puede medir de forma sencilla, la fuerza es lo que se busca pero hablar de la adquisición de los valores de la velocidad no es trivial. Lógicamente podría pensarse que al ser un sistema angular, la velocidad puede adquirirse con un tacómetro sin embargo, la puerta no completa una revolución al impactar por lo que el tacómetro queda descartado para dicha medición. Regresando a los conceptos básicos de cálculo, se sabe que la velocidad es la integral de la aceleración y la aceleración es una variable fácil de obtener si se cuenta con el acelerómetro correcto.



¿Qué es un acelerómetro?

Un acelerómetro es un dispositivo que mide la aceleración de un cuerpo, la mayoría de los acelerómetros trabajan de manera indirecta. Su funcionamiento se debe a que llevan una masa conocida como **masa sísmica** que se une mecánicamente al objeto que se quiere medir de tal forma que si el cuerpo siente una aceleración, la masa sísmica experimenta una aceleración proporcional a la del objeto medido. .Entonces por medio del acelerómetro se puede deducir a partir de la Segunda ley de Newton que la fuerza ejercida sobre la masa sísmica nos arroja un valor de aceleración:

$$F = ma ; a = \frac{F}{m}$$

Donde **F** es la fuerza medida por el transductor de fuerza y la **m** una cantidad fija conocida por lo tanto el transductor debe estar calibrado para leer unidades de aceleración. Es importante mencionar que algunos acelerómetros miden las fuerzas **G** que no es una medida de fuerza sino una medida intuitiva de aceleración. Está basada en la aceleración que produciría la gravedad terrestre en un objeto cualquiera en condiciones ideales, es decir, sin atmósfera u otro rozamiento.¹⁷

Pues bien, para la realización de esta prueba la selección del sensor resulta de gran importancia ya que los resultados obtenidos dependerán de las características físicas del sensor por tal motivo es necesario tener claro qué se quiere medir. Se sabe que la puerta se comporta de manera diferente dependiendo de la fuerza con la que se impulsa por lo que es probable que el sensor detecte grandes magnitudes de aceleración, es por ello que es mejor utilizar un acelerómetro de gran resistencia al impacto y que nos proporcione datos confiables.

Para esta prueba se utilizó un acelerómetro que se había utilizado en algunos otros proyectos, es de marca Omega modelo OM-CP-SHOCK101-50, es un sensor de alta resistencia a los impactos y con un amplio rango de medición, en la siguiente tabla se especifican los valores nominales con los que trabaja el sensor.

Acceleration Range (g)	±5	±50	±100	±250
Calibrated Accuracy (g)	±0.2	±1	±2	±4
Acceleration Resolution (g)	0.01	0.05	0.1	0.2

Fig. 7.11 Tabla de especificaciones del sensor

¹⁷Maloney, T.J.(2006). *Electrónica industrial moderna*. México: Ed. Pearson Educación.

Objetivo

Determinar mediante el sensor seleccionado las curvas de aceleración de la trayectoria de la puerta desde el momento en que inicia su recorrido hasta el momento en que impacta con la carrocería. Esto con el fin de determinar los instantes de tiempo en los que se experimenta una mayor aceleración e incluso disminución de la misma.

Componentes

- ◆ Puerta de automóvil
- ◆ Acelerómetro OM-CP-SHOCK101
- ◆ Software de adquisición Omega 2.03



Fig. 7.12 Acelerómetro marca OMEGA modelo OM-CP-SHOCK101

Protocolo de pruebas

La prueba se realizará con una puerta automotriz de aproximadamente 30kg perteneciente a un automóvil Chevrolet Malibú 2012 sin los revestimientos internos y que utiliza tornillos como método de sujeción.

1.- Alineación de la puerta: Lo primero que se debe realizar es verificar que la puerta se encuentre alineada, esto quiere decir, que una vez cerrada la puerta del automóvil, el contorno de la puerta coincida casi perfectamente con el marco de la carrocería. Al ser una puerta que utiliza el método de sujeción por tornillería permite ser alineada nuevamente en caso de que no se encuentre en la posición correcta.

2.- Colocación del acelerómetro: El sensor se ubicará en la sección en la que se registró el impacto de menor magnitud. El sensor que se eligió para realizar las pruebas tiene cuatro perforaciones en las esquinas de tal forma que cuando ya se haya determinado la posición exacta en la que se colocará el sensor se deberá sujetar por medio de tornillería, de lo contrario las vibraciones que se presentan al impactar la puerta pueden cambiar la posición del sensor.

3.- Sistema de referencia: El siguiente paso es establecer un sistema de referencia para determinar la posición exacta en la que se colocó el acelerómetro (OM-CP-SHOCK101-50). El objetivo de este sistema es ubicar el eje sobre el que se mide la aceleración con el sensor debido a que el acelerómetro es triaxial.

En la figura 7.12 se ilustra la ubicación del sistema de referencia y la posición en la que se colocó el acelerómetro. Sí se observa la puerta de frente (como se posiciona en la imagen), el sistema de referencia inercial se coloca en la esquina inferior izquierda, una vez asignado el punto de referencia se toma la medida del centro del sensor al origen sobre el eje de las abscisas y la

distancia del centro del sensor al origen sobre el eje de las ordenadas de tal forma que obtengamos las coordenadas del acelerómetro dentro del plano sobre el que se está trabajando.

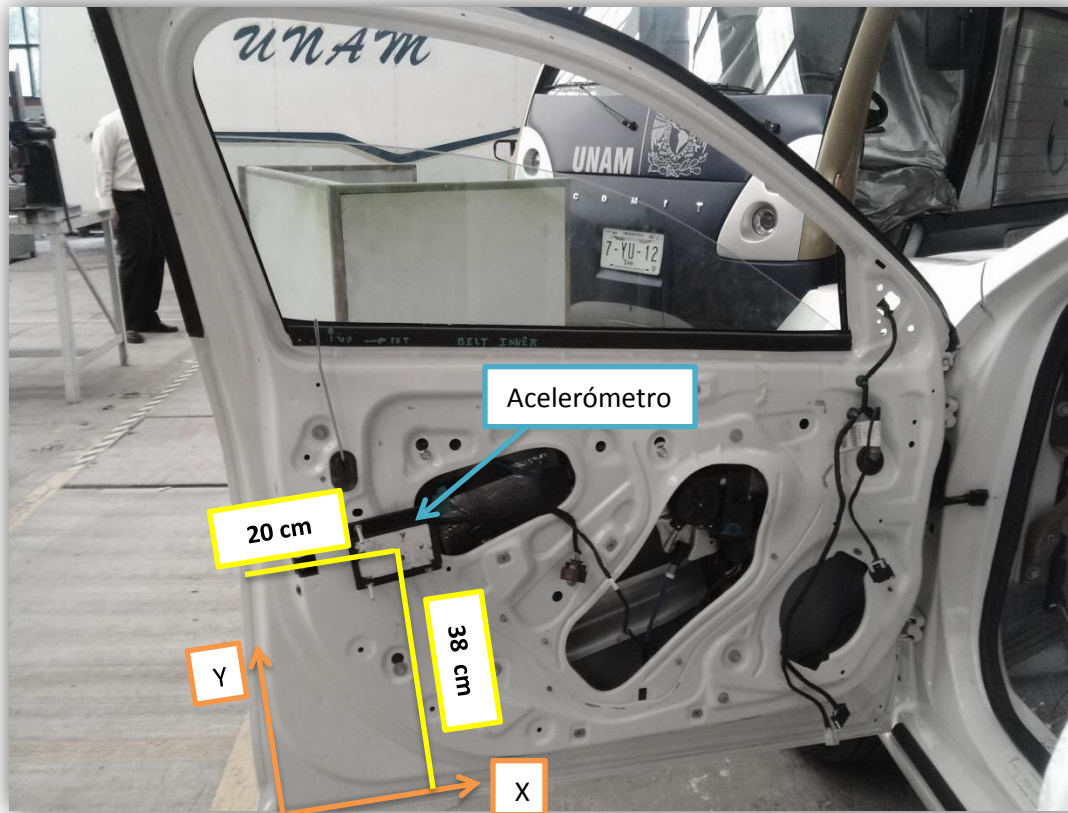


Fig. 7.13 Sistema de referencia en la puerta

4.- Adquisición de datos: El sensor que se seleccionó tiene la capacidad de adquirir los valores de aceleración en los tres ejes de referencia, es por ello que se debe saber sobre qué eje se está realizando el movimiento para determinar qué valores se deben considerar en los cálculos. Observando el sistema de referencia establecido en el paso anterior y relacionándolo con la ubicación del sensor se puede ver que los datos de la aceleración que se requieren son los de la aceleración sobre el eje Z.



Fig. 7.14 Ícono de Omega 2.03

Para la adquisición de datos se deben seguir los siguientes pasos:

- a) Instalar el software Omega 2.03 en la computadora en la que se vaya a trabajar, una vez instalado se tendrá un ícono como el que se muestra en la figura 7.14.

- b) El sensor requiere de una interfaz de registro de datos comúnmente conocido como datalogger. Para iniciar la adquisición de debe conectar de la siguiente forma:



Fig. 7.15 Conexión correcta del cable de adquisición

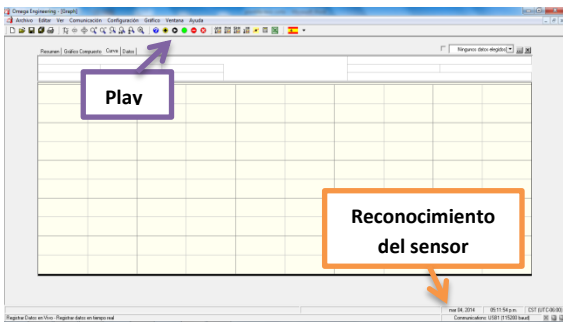


Fig. 7.16 Pantalla de inicio de Omega 2.03

- c) Una vez conectada la interfaz de adquisición de datos y el sensor a la computadora, se debe iniciar el programa con lo que se podrá visualizar la siguiente pantalla (fig. 7.16) en la que se indica que el sensor ya se reconoció en el puerto USB 1 (este puerto variará dependiendo de la disponibilidad de puertos de la computadora).

d) Cuando el software reconozca el sensor con éxito el siguiente paso es dar clic al botón de play (fig. 7.16) y visualizar si el sensor se encuentra calibrado, para ello se debe colocar sobre una superficie plana y tratando de que no experimente ningún movimiento, se debe visualizar una gráfica como la de la figura 7.17 en la que se describe una recta horizontal debido a que el sensor no registra movimiento alguno en ninguna dirección. Cada una de las líneas de colores representa la aceleración en los diversos ejes así como el espectro de frecuencias que experimenta cada señal.

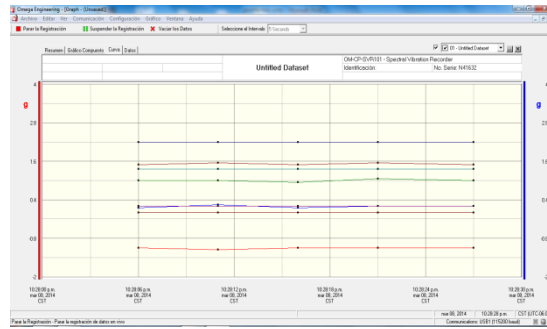


Fig. 7.17 Gráfica de calibración del acelerómetro

e) Debe mencionarse que no existe mayor problema si el sensor se conecta una vez que ya esté instalado o si se instala después de conectarlo. Entonces por facilidad se colocará el sensor en la posición determinada sobre la puerta del carro y posteriormente se procede a conectarse.

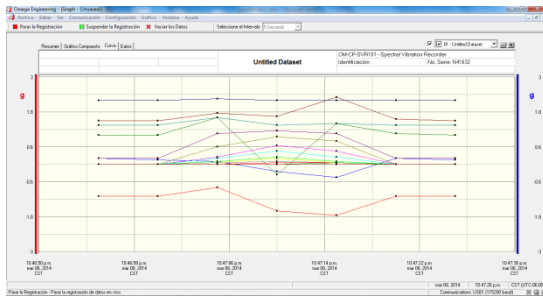


Fig. 7.18 Gráfica de aceleración

f) Cuando el sensor ya se haya colocado y se requiera iniciar con la adquisición, únicamente se debe poner play y el acelerómetro comenzará a registrar los valores de aceleración. Para finalizar la adquisición se selecciona parar la registración y posteriormente finalizar la registración. Una vez que se registran

los valores de aceleración, el software arrojará una gráfica similar a la de la figura 7.18.

5.- Inicio de la prueba: En este paso se asume que se han ejecutado correctamente los pasos anteriores por lo que se procede a llevar a cabo las pruebas. Es importante mencionar que se realizarán pruebas de impacto con mayor y menor fuerza, es decir, para las primeras cinco iteraciones se azotará la puerta y las siguientes cinco se cerrará la puerta como comúnmente se cierra un auto propio. Debido a que se quiere analizar el uso del automóvil en **condiciones reales** se requiere que distintos usuarios tanto hombres como mujeres sin características específicas cierren la puerta para observar las diferentes magnitudes de fuerza a las que se somete cuando se encuentra en uso.



Fig.7.19 Secuencia de la prueba de impacto

Para la prueba de impacto con mayor fuerza (azote) se coloca la puerta completamente abierta con el fin de distinguir en la gráfica la disminución de la aceleración cuando la trayectoria de la puerta se ve pausada instantáneamente por los pasos del freno de puerta. Posteriormente la puerta debe impulsarse con mayor fuerza para que rompa la inercia al inicio de su trayectoria hasta que impacta con la carrocería. Se inicia la adquisición de datos y se debe esperar a que se estabilice el sensor para que registre el momento en que se impulsa la puerta. En la figura 7.18 se describe gráficamente la realización de la prueba.

En el primer cuadro se distingue el momento en que se coloca la puerta totalmente abierta, en el segundo se observa el momento en que la puerta se impulsa aunque es importante ver que para este momento aún no se despegó la puerta de la mano del usuario. En el tercer cuadro la puerta ha continuado por sí sola con el recorrido de su trayectoria para finalmente impactar sobre el marco de la carrocería como se muestra en el último cuadro.

Cabe mencionar que cuando la puerta impacta con la carrocería, el auto experimenta vibraciones por lo que entre cada iteración se debe esperar a que el carro recupere su estado de reposo para no sumar las aceleraciones de

Cuando ya se hayan realizado cinco iteraciones de la prueba de mayor impacto se debe continuar con la prueba de menor impacto, esta prueba es de estilo libre debido a que cada persona tiene una forma peculiar de cerrar la puerta de su automóvil sin embargo requieren de una fuerza para romper el estado de reposo en que se encuentra la puerta abierta antes de cerrarla. Nuevamente se debe realizar esta prueba cinco veces.

Por cada iteración se deben adquirir los datos con el sensor de tal forma que cuando finalicen las pruebas debemos tener diez gráficas diferentes que nos servirán para analizar el movimiento de la puerta.

Análisis de resultados de la prueba preliminar de impacto

◆ Prueba de mayor impacto

Los datos que se obtuvieron con la el software Omega 2.03 se exportaron a Microsoft Excel® por lo que se obtuvo la siguiente gráfica (fig. 7.20), como se observa los valores son negativos debido a que la puerta giraba hacia el lado negativo del eje Z por lo que los valores que se observan se encuentran en el cuadrante de los números negativos.

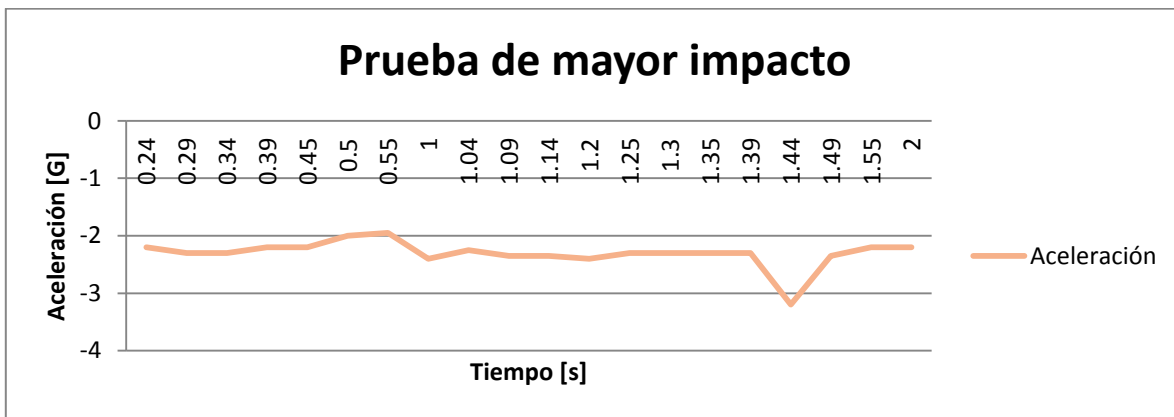


Fig.7.20 Gráfica original de prueba de mayor impacto

Para entender las variaciones que tuvo la aceleración durante el recorrido de la puerta se eliminará la dirección de la aceleración para analizar únicamente la magnitud de la misma en cada uno de los puntos así como también se eliminará el offset (desviación de cero, valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula, si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el offset). La gráfica modificada se presenta en la figura 7.21.

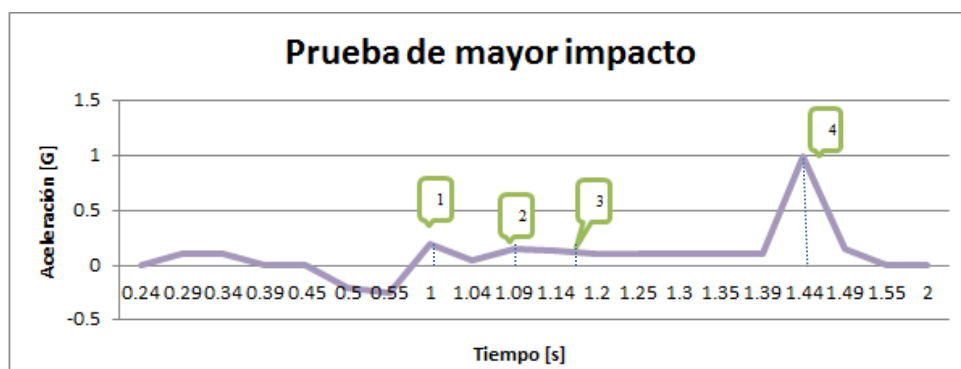


Fig. 7.21 Gráfica de prueba de mayor impacto modificada

Sobre la gráfica de la figura 7.21 se destacan algunos puntos que se explicarán posteriormente.



Para realizar el análisis del movimiento de la puerta se tomó únicamente una gráfica correspondiente a una iteración de mayor impacto y posteriormente una iteración de menor impacto. Ahora bien, se analizarán uno a uno los puntos destacados de la gráfica de mayor impacto (figura 7.21), como se puede observar durante los primeros 0.45 segundos la señal se encuentra **estable** relativamente y la pequeña variación que experimenta se debe al medio, debido a que es el momento en el que la puerta está abierta pero aún no experimenta movimiento alguno, sin embargo se pueden preguntar ¿por qué si no se ha movido la gráfica en esa sección no es una recta? Esto se debe a que el sensor detecta las vibraciones y aunque un cuerpo rígido se encuentre en reposo, el ambiente influye en el movimiento del mismo.

Continuando con el análisis se encuentra el primer punto destacado en un segundo aproximadamente, en este instante se percibe un incremento de la aceleración a 0.2 G lo que se debe al momento en que la puerta es impulsada por el usuario imprimiéndole a la puerta una aceleración inicial. En el punto 2 se observa una disminución de la aceleración con respecto al punto 1, esto se debe a que la trayectoria de la puerta se encuentra con el primer paso del freno de puerta, para el punto 3 nuevamente se observa una disminución en la aceleración con respecto al punto 2 y nuevamente es por el segundo paso del freno de puerta, como ya se había mencionado, el freno tienen la función de reducir la velocidad con las que la puerta impactará en la carrocería. El último punto y el más importante que se debe analizar es el que corresponde al impacto de la puerta que ocurre alrededor de 1.44 segundos, para este instante se describe la mayor de las aceleraciones en el sistema llegando a impactar con 1G de magnitud, posteriormente cuando la puerta se cierra regresa a su estado de reposo y la gráfica nuevamente tiende a cero.

Es importante mencionar que debido a que el sensor tienen una etapa de adquisición y procesamiento de señales, la gráfica que arroja este no requiere ningún filtro. Teniendo en consideración el tiempo en que ocurrió el fenómeno desde que la puerta es impulsada hasta que impacta, solamente han transcurrido **0.44 segundos**.

◆ Prueba de menor impacto

Para la siguiente prueba se seleccionó una iteración en la que la gráfica presentara los mismos puntos que la gráfica anterior para poder comparar el fenómeno con diferentes magnitudes de fuerza. La gráfica original es la que se muestra en la figura 7.22.

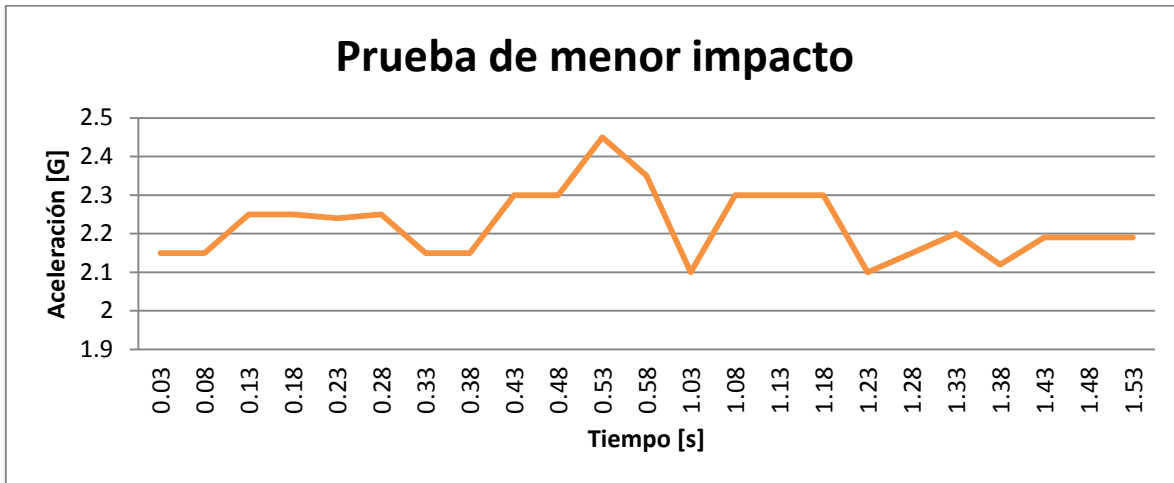


Fig. 7.22 Gráfica original de prueba de menor impacto

Nuevamente se observa que la gráfica se encuentra en el cuadrante negativo lo que significa que el fenómeno se realizó hacia el lado negativo del eje de referencia (eje Z). También se puede ver que los valores de la gráfica no inician en cero lo cual quiere decir que se ve afectada por el offset del sensor que es de 2.2G. La imagen 7.23 muestra la gráfica modificada para que únicamente se pueda analizar las magnitudes de la aceleración.

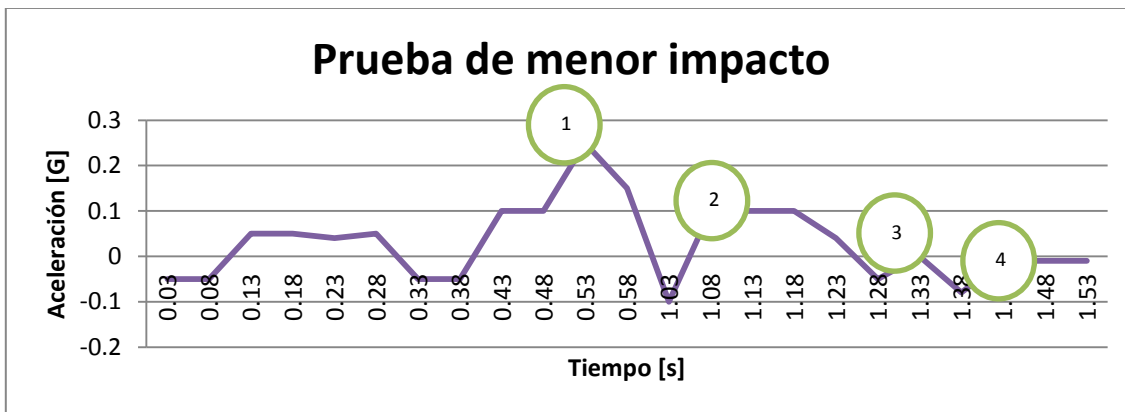


Fig. 7.23 Gráfica modificada de prueba de menos impacto

En esta gráfica (fig.7.23) destacan cuatro puntos que se describirán a continuación.

El punto número uno es el momento en el que el usuario impulsa la puerta para cerrarla, la observación del comportamiento de los usuarios al cerrar la puerta indican que la acción se lleva a

cabo de manera lenta ya que por lo regular las personas tratan de cuidar sus autos y no azotan las puertas. El segundo punto que destaca es la disminución de la aceleración inicial ya que la puerta se encuentra con el primer paso del freno de puerta, al igual que en el tercer punto que es en donde la puerta vence el segundo paso del freno. Cabe mencionar que la variación entre el punto 2 y 3 es casi imperceptible debido a que el usuario va guiando la puerta hasta que logra cerrarla, con lo que aplica la fuerza necesaria para vencer la reacción del freno. Recurriendo al estudio de usuario se observa que cuando la puerta se cierra cuidadosamente es guiada por la persona desde el momento de empujarla hasta el momento en que el pestillo se sujeta en el aro metálico concluyendo la acción de cerrado, en ningún momento la puerta realiza el paso por el freno de puerta sola.

Finalmente el punto cuatro es el que describe el impacto de la puerta, en esta prueba no se lleva a cabo un impacto como tal, sin embargo se refiere al instante en el que la puerta hace contacto con el marco de la carrocería. Se puede ver que la aceleración a diferencia de la prueba anterior, es de menor magnitud debido a que al momento de cerrar no está impactando con mayor fuerza. En la siguiente secuencia de imágenes se describe el proceso de la prueba de menor impacto.

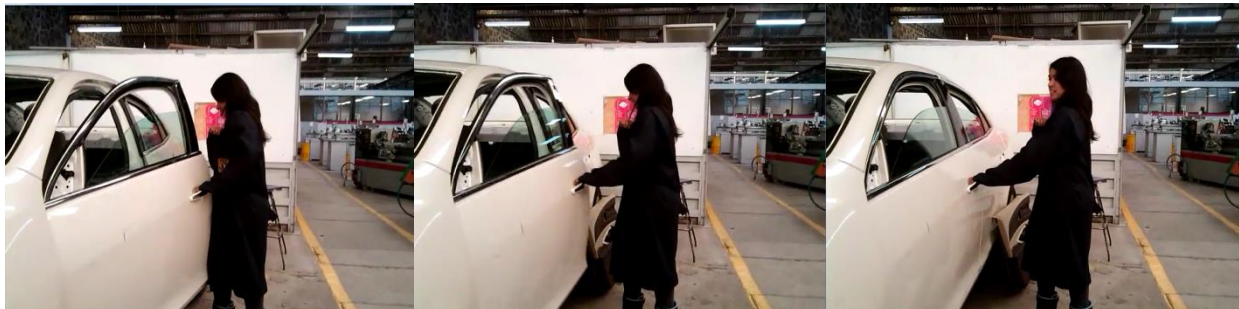


Fig. 7.24 Desarrollo de la prueba de menor impacto

Conclusiones de la prueba preliminar de impacto

Con esta prueba se logró tener un esbozo del comportamiento de la puerta con lo que se cumple el objetivo y se confirma que los puntos seleccionados en la prueba anterior son los correctos para realizar la medición de la aceleración de la puerta. Cabe mencionar que aunque el análisis requiere de la integración de las gráficas, se buscará otro tipo de sensores que tengan una tasa de muestreo mayor para no perder información de los intervalos en los que la puerta no se ve afectada por ningún tipo de impulso o freno, cuando se tengan unas gráficas mejor detalladas se procederá a realizar la integración.

Por el momento se concluye que con esta prueba se alcanzó el objetivo planteado.

7.2.6. Determinación experimental del centro de gravedad de la puerta.

El centro de gravedad es el punto en el cual se puede considerar que todo el peso de un cuerpo está concentrado y representado como una partícula. Cuando la aceleración debida a la gravedad sea constante, el centro de gravedad y el centro de masa coinciden.

Un objeto está en equilibrio estable mientras que su centro de gravedad quede arriba y dentro de su base original.¹⁷

El propósito de encontrar el centro de gravedad de la puerta es que sea el primer paso para determinar el momento de inercia de la misma ya que son datos que influyen en el cálculo de la fuerza de impacto.

Objetivo

Determinar de forma experimental el centro de gravedad de la puerta.

Componentes

- ◆ Puerta automotriz
- ◆ Plomada
- ◆ Marcadores para pizarrón blanco
- ◆ Flexómetro
- ◆ Dinamómetro
- ◆ Grúa o soporte para colgar la puerta
- ◆ Cuerda

Protocolo de pruebas

La obtención del centro de gravedad de la puerta se realizará con la puerta delantera izquierda (puerta del conductor) de un automóvil Nissan APRIO que tiene una masa de 22.5 Kg.

1.- Implementación del sistema: A diferencia de las pruebas anteriores, al hacer referencia a una puerta de automóvil significa que esta vez se necesita tener la puerta separada del automóvil por lo que se tiene que desmontar de la carrocería pero sin quitarle las bisagras ya que servirán para la siguiente prueba y en esta primera parte no afecta que las conserve.



Fig. 7.25 Puerta suspendida con la grúa.

¹⁷Forner Gumbau, M. (2006) *Problemas resueltos de centros de gravedad y momentos de inercia*. Francia: Biblioteca de la Universidad Jaime I.

Una vez desmontada la puerta del automóvil se debe bajar el vidrio completamente para tener de donde sujetar la puerta cuando se requiera tenerla suspendida, este último paso puede omitirse si la forma de la puerta permite colgarla de dos diferentes lugares con el vidrio arriba, es decir, con la ventana abierta.

Haciendo uso de la grúa se amarrará la puerta con la cuerda al arnés y posteriormente se comenzará a elevarla hasta que no toque el piso (no existe un punto específico del cual colgar la puerta).

2.- Sujeción de la plomada: Cuando la puerta se encuentre suspendida se puede ver que el eje de acción de la cuerda es colineal al eje de acción de la fuerza de gravedad así que se debe colocar la plomada colineal a ese eje.

3.- Obtención del centro de gravedad: Cuando la plomada se haya colocado en la primera posición y haya dejado de moverse se debe marcar sobre la puerta la trayectoria del hilo que sostiene a la plomada, esto último se debe realizar con uno de los marcadores para pizarrón evitando así que se dañe la pintura del auto.

4.- Cambio de posición de la plomada: El siguiente paso es colgar la puerta sujetándola de un punto distinto al inicial, una vez que la puerta esté bien sujeta se identifica el eje de acción de la cuerda y nuevamente se coloca la plomada colineal a dicho eje.

Se debe repetir el paso número tres, cuando la plomada deje de moverse se marcará con el plumón su nueva trayectoria de tal forma que en algún punto se cruzará con la trayectoria de la plomada en la primera posición, esta intersección entre las trayectorias determina el centro de gravedad de la puerta.

5.- Obtención de las coordenadas del CG: Recurriendo al sistema de referencia que se había establecido en la prueba del rastro de pintura, se medirán las distancias que separan al CG del origen del sistema inercial, tanto en el eje de las abscisas como en el eje de las ordenadas. Para obtener estas mediciones se puede utilizar el flexómetro. Es importante mencionar que la distancia en X se medirá a partir del eje de rotación de las bisagras.

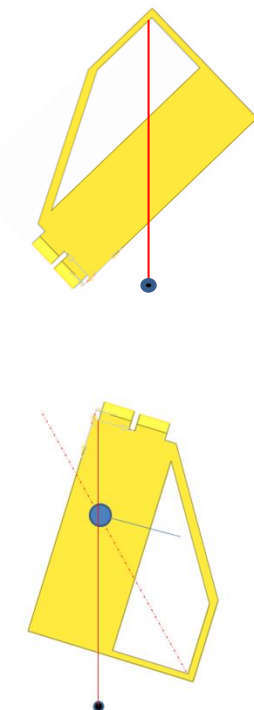


Fig.7.26 Colocación de la plomada en distintas posiciones.

Resultados



Fig. 7.27 Colocación de la plomada en la primera posición



Fig. 7.28 Colocación de la plomada en la segunda posición.

Ejecutando la secuencia de pasos que se establecen en el protocolo de pruebas se obtiene correctamente y de forma sencilla el centro de gravedad de la puerta, en la figura 7.27 se puede observar la plomada en la primera posición y como se indica, el eje de la plomada es colineal al eje de acción de la cuerda.

Después de marcar la trayectoria de la plomada en la primera posición, se coloca la plomada en la segunda posición como se muestra en la imagen 7.28 y al trazar la trayectoria de la plomada en la segunda posición se determina el centro de gravedad de la puerta.

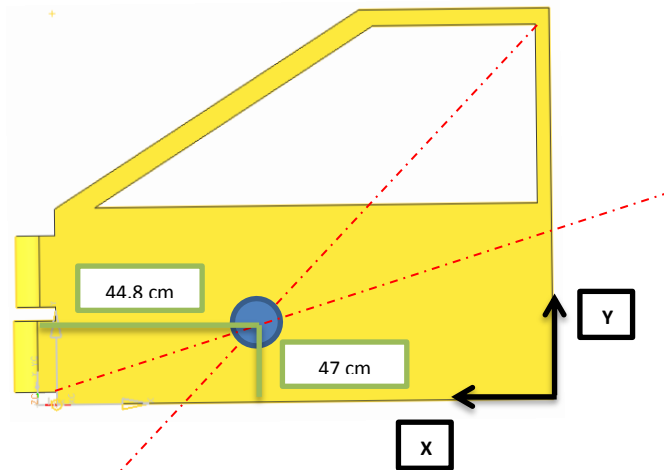


Fig. 7.29 Diagrama de medición de coordenadas del CG

En el diagrama de la figura 7.29 se especifican las distancias obtenidas durante la prueba, datos que como se ha mencionado al inicio, servirán para determinar el momento de inercia y posteriormente introducirlo en los cálculos.

Conclusiones de la prueba

Experimentalmente se ha determinado el centro de gravedad de la puerta, con el fin de obtener sus coordenadas dentro del sistema de referencia que se estableció al inicio. Dichos datos servirán para calcular el momento de inercia de la puerta.

7.2.7. Cálculo del momento de inercia

Como bien es sabido, la **inercia** es la propiedad de la materia de resistir cualquier cambio a su movimiento, ya sea en dirección o en velocidad. Esta propiedad se establece claramente en la **primera ley de Newton** en la que postula que:

“Un objeto en reposo tiende a permanecer en reposo, y un objeto en movimiento tiende a continuar moviéndose en línea recta, a no ser que actúe sobre ellos una fuerza externa”.

Con este concepto se sabe que cualquier cuerpo que efectúa un giro alrededor de un eje, desarrolla una resistencia a cambiar su velocidad de rotación y la dirección de su eje de giro por lo tanto se puede definir al momento de inercia o también denominado **segundo momento de área** como la resistencia que un cuerpo en rotación opone al cambio de su velocidad o dirección de giro.

La principal diferencia que existe entre la inercia y el momento de inercia es que la masa por aceleración es la fuerza de inercia, conocida como inercia y el momento de inercia por aceleración angular es el par de inercia.

Si bien es cierto que existen fórmulas con las cuales calcular el momento de inercia de un cuerpo, estas se complican a medida que el cuerpo va perdiendo la regularidad de sus formas. Por tal motivo se decidió recurrir a la teoría de vibraciones y determinar el momento de inercia de la puerta automotriz de forma experimental.

Decremento logarítmico

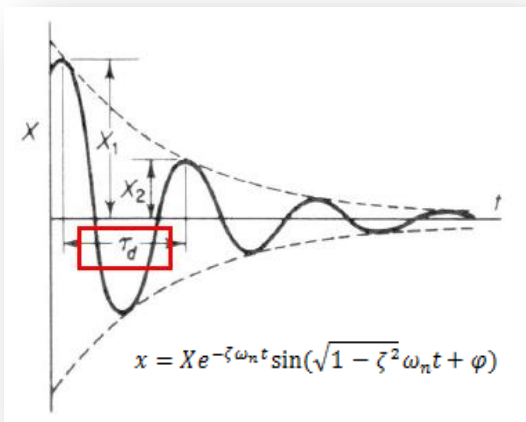


Fig. 7.30 Rango de decremento de una oscilación libre restringida por el logaritmo.

La forma más conveniente de determinar el coeficiente de amortiguamiento de un sistema es midiendo el rango de decremento de las oscilaciones libres. Cuanto mayor sea la amortiguación, mayor será el rango de decremento.

En la figura 7.30 se observa la ecuación que describe la gráfica general de una vibración amortiguada. Posteriormente se debe introducir en dicha ecuación el término que relaciona el **decremento logarítmico** el cual se define como el logaritmo natural de la diferencia de dos amplitudes sucesivas.

De tal forma que la expresión para el decremento logarítmico se convierte en:

$$\delta = \ln \frac{X_1}{X_2} = \ln \frac{e^{-\zeta\omega_n t_1} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_1 + \varphi)}{e^{-\zeta\omega_n(t_1+\tau_d)} \sin[\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n(t_1+\tau_d) + \varphi]} \dots\dots\dots (1)$$

A medida de que el tiempo τ_d incrementa el valor de los senos en la ecuación tomarán el mismo valor, realizando esta simplificación se tiene:

$$\delta = \ln \frac{e^{-\zeta\omega_n t_1}}{e^{-\zeta\omega_n(t_1+\tau_d)}} = \ln e^{-\zeta\omega_n \tau_d} = \zeta\omega_n \tau_d \dots\dots\dots (2)$$

Sustituyendo el periodo de amortiguamiento $\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$ en la ecuación 2 se simplifica la expresión a:¹⁸

$$\delta = \frac{2\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}} \dots\dots\dots (3)$$

Esta última ecuación es la que servirá al final para determinar el momento de inercia de la puerta del vehículo.

Objetivo

Obtener el momento de inercia de la puerta respecto de su eje de rotación (eje de rotación de las bisagras) por medio de su frecuencia de oscilación.

Componentes

- ◆ Puerta automotriz
- ◆ Barra de acero
- ◆ Acelerómetro PCB 303402 SN 15945
- ◆ Tarjeta de adquisición DAQ NI 9234
- ◆ Cable coaxial 5-44
- ◆ Grúa de carga
- ◆ Computadora



Fig. 7.31 Fuente de alimentación y DAQ para adquisición de señales

¹⁸Thomson, W. T. (1998) Teoría de vibraciones, aplicaciones. México: Ed. Prentice Hall

Protocolo de pruebas

La prueba se realizará con la puerta delantera izquierda (puerta del conductor) de un automóvil Nissan APRIO que tiene un peso de 22.5 Kg.

1.- Colocación del sistema: Colgar la puerta de manera que pueda pendular alrededor del eje de sus bisagras, es decir, evitando colgarla de una cuerda que pase por la bisagra ya que se movería mientras la puerta péndula sumándole oscilaciones innecesarias al sistema. Se sugiere colgarla de una barra sólida que soporte el peso de la puerta y que no se flexione mientras la puerta oscila.

2.- Ubicación del acelerómetro: Para realizar esta práctica se utilizaron sensores diferentes al que se había utilizado en la prueba preliminar de impacto debido a que se requería que tuvieran una mayor sensibilidad para detectar frecuencias muy pequeñas (al final se incluyen hojas de especificaciones del sensor). Ahora bien el sensor debe colocarse en la superficie de la puerta de lo más alejado al eje de rotación (eje de las bisagras). En la siguiente imagen se ejemplifica con un diagrama la forma en la que debe colocarse el acelerómetro con respecto al eje de rotación.

Posteriormente se debe sujetar la puerta con un ángulo de no más de 20° de apertura y se inicia la adquisición de datos, cuando la señal en pantalla se haya estabilizado se debe soltar la puerta de tal forma que pendule hasta que regrese a su estado de reposo.

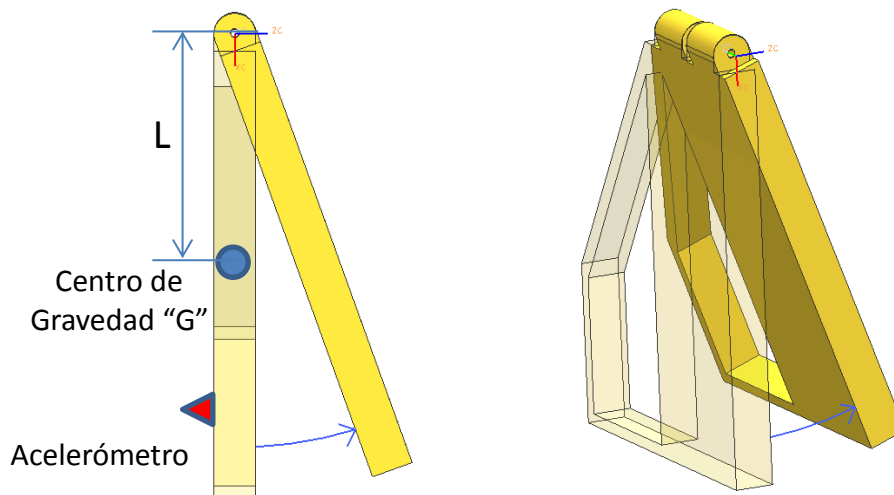


Fig. 7.32 Diagrama de colocación del acelerómetro con respecto al eje de rotación de la puerta

3.- Adquisición de datos: Este tipo de sensor permite obtener los datos por medio de una interfaz creada en LabVIEW® la cual realiza la comunicación entre el software y el hardware por medio de un módulo de adquisición de datos (DAQ NI 9234) diseñado específicamente para aplicaciones de sonido y vibración de muchos canales simultáneamente.

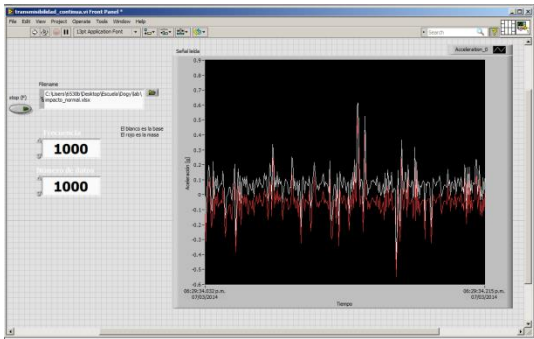


Fig.7.33 Interfaz para la adquisición de datos

realice el filtrado de los datos.

4.- Filtrado de señales: La lectura del acelerómetro deberá ser filtrada y una vez realizado el proceso, ésta tendrá la forma de una senoidal decreciente debido a que inicia la oscilación con una aceleración y con el paso del tiempo se detiene comportándose como un sistema amortiguado decreciente tal y como se muestra en la figura 7.30.

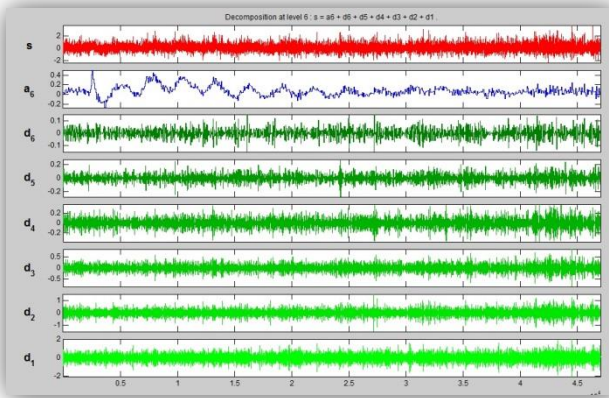


Fig. 7.34 Pantalla del módulo WaveMenu de Matlab

decreciente) se deben realizar los siguientes pasos:

- Tomar nota de la magnitud de dos de las crestas de la gráfica y del periodo de vibración como se indica en la figura 7.30.
- Aplicar la ecuación de decremento logarítmico para conocer el factor de amortiguamiento.
- Posteriormente utilizar la ecuación de la frecuencia de oscilación amortiguada para conocer la frecuencia angular natural del sistema.

El aspecto de la interfaz es el que se presenta en la figura 7.33, permite variar la frecuencia de muestreo, una vez que se adquiere la señal genera un archivo de Excel para que posteriormente se

Como recomendación se sugiere filtrar las gráficas con el módulo de Matlab® WaveMenu el cual permite descomponer la señal en sus diferentes espectros de frecuencia. Para acceder a este módulo basta con teclear el comando wavemenu en el espacio de trabajo.

5.- Obtención de datos: Cuando ya se tenga la señal que se busca (senoidal

- d) Por último, sustituir los valores encontrados en la ecuación de frecuencia angular natural de un cuerpo rígido que pendula:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgL}{J_p}} \quad J_p = \frac{gLm}{\omega^2}$$

Donde J_p es el momento de inercia de la puerta alrededor de las bisagras, g es la gravedad, m la masa de la puerta y L es la distancia que existe desde el eje de las bisagras hasta el centro de gravedad sobre el eje X. Se puede observar a qué distancia se refiere en la figura 7.32.

Análisis de resultados

El análisis de resultado de esta prueba se basa principalmente en la observación y filtrado de las señales que se obtienen con el acelerómetro.

En la figura 7.35 se muestra la señal original, es decir, la señal que se adquirió con el acelerómetro y a la que aún no se ha aplicado ningún tipo de filtro (señal de color azul) y sobrepuesta se muestra la señal filtrada que describe una senoidal decreciente (señal de color rojo).

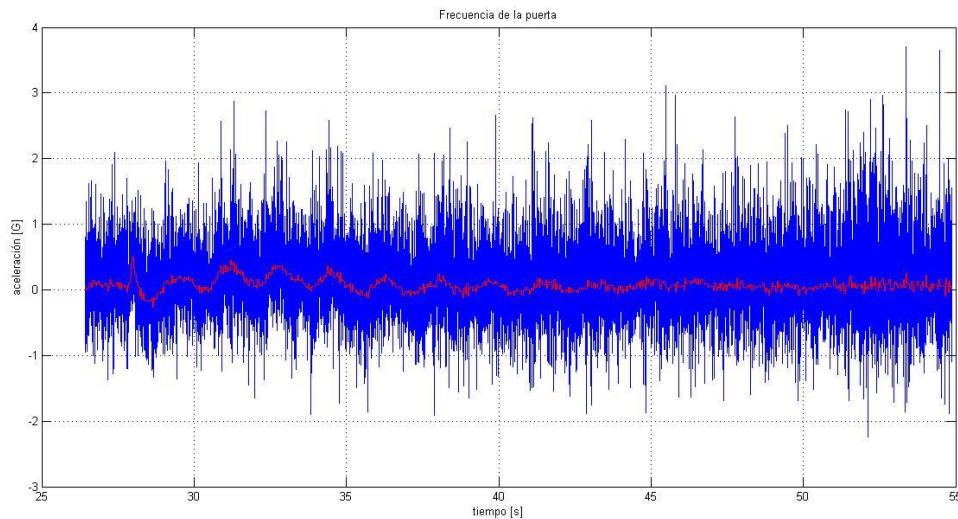


Fig. 7.35 Señal original de oscilación de la puerta y señal filtrada con un filtro de segundo orden (WaveMenu)

La señal en color rojo se encuentra envuelta en la señal completa que describe la puerta al oscilar, si se observa la figura 7.34 se ejemplifica como es que se puede descomponer la señal original en sus diferentes espectros de frecuencias para posteriormente determinar a qué elemento del

sistema corresponde ya que es claro que el sistema se compone de diversos elementos y estos tienen su propia frecuencia natural.

Ahora bien, para continuar con el análisis es preciso separar la senoidal decreciente de la señal original (señal sin filtrar) y una vez realizado se tiene lo siguiente:

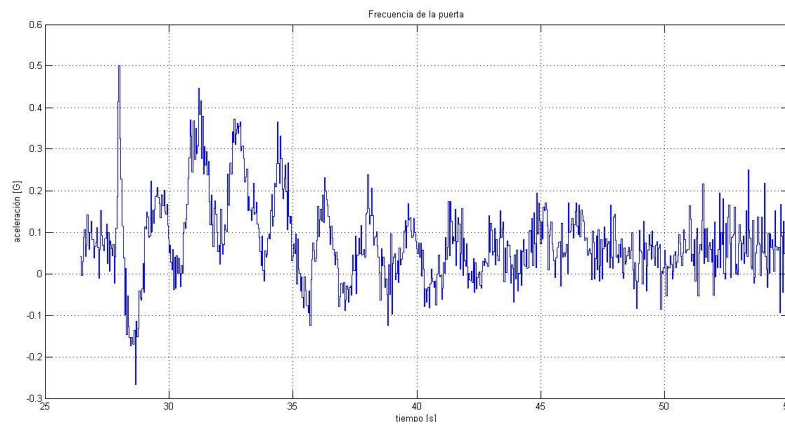


Fig. 7.36 Señal que describe la frecuencia natural de la puerta

Considerando que la señal por medio de la cual se está midiendo la frecuencia natural de la puerta es la aceleración, se debe establecer una unidad de medición que facilite la obtención del momento de inercia, ya que la gráfica aún se encuentra en fuerzas G es necesario transformarla a m/s^2 que corresponde al Sistema Internacional de Unidades para que se pueda hacer el análisis dimensional.

La señal de la aceleración queda entonces de la siguiente forma:

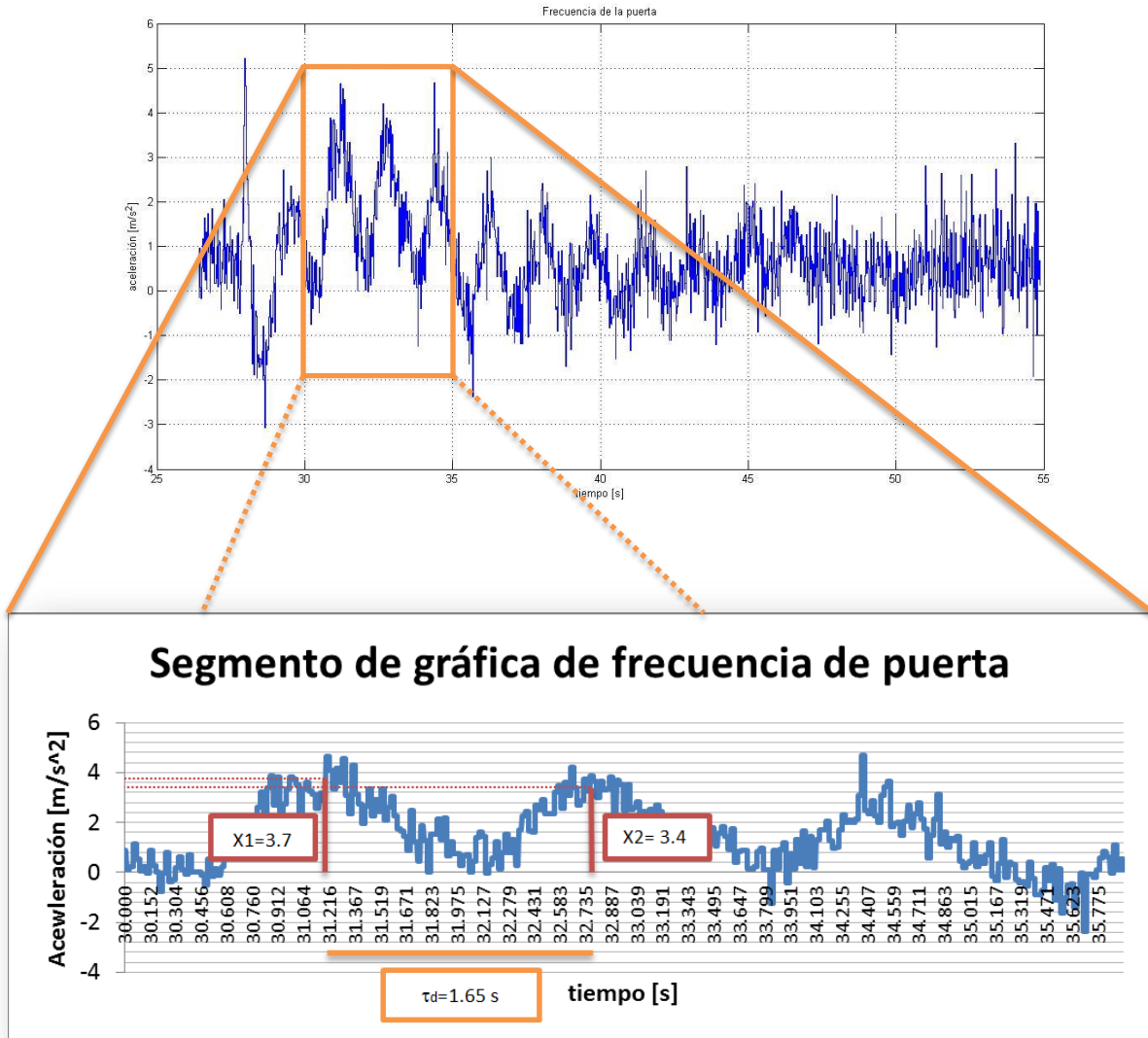


Fig. 7.37 Ampliación de segmento de gráfica de aceleración para determinar parámetros

De la gráfica de aceleración en m/s^2 que se describe cuando la puerta oscila se realiza la ampliación de un segmento que va de los 30 a los 35 segundos aproximadamente, esto con el fin de poder determinar la magnitud de la cresta de dos oscilaciones libres consecutivas así como el periodo de vibración. Figura 7.37.

Una vez que se obtienen los datos de la amplitud y el periodo de vibración se procede a realizarse el análisis matemático como sigue:

- a) Inicialmente se debe calcular el delta de la amplitud de las señales consecutivas:

$$\delta = X_1 - X_2 = 3.7 - 3.4 = 0.3$$

- b) De la ecuación del decremento logarítmico se despeja el factor de amortiguamiento ζ :

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad \zeta = \pm \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} = \frac{0.3}{\sqrt{0.3^2 + 4\pi^2}} = \mathbf{0.0477}$$

Como se observa, la ecuación despejada tiene dos raíces, sin embargo únicamente se considera la raíz positiva ya que lo que se requiere es la magnitud.

- c) Cuando se tenga el valor del factor de amortiguamiento se sustituye en la ecuación de la frecuencia de oscilación amortiguada y se despeja la frecuencia angular natural del sistema ω .

$$\tau_d = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\zeta^2}} \quad \omega = \frac{2\pi}{\tau_d\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi}{1.65\sqrt{1-0.04769^2}} = \mathbf{3.812 \text{ rad/s}}$$

- d) Finalmente se sabe que la frecuencia natural de un cuerpo de pendula está definida por la ecuación:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgL}{Jp}} \quad Jp = \frac{mgL}{\omega^2} = \frac{(22.5\text{Kg})(9.81\frac{\text{m}}{\text{s}^2})(0.448\text{m})}{(3.8123 \text{ rad/s})^2} = \mathbf{6.804 \text{ Kg m}^2}$$

Resuelto el procedimiento que se planteó en el protocolo de pruebas se obtiene la magnitud del momento de inercia la cual es:

$$\mathbf{Jp = 6.804 \text{ Kg m}^2}$$

7.2.8. Obtención del momento de inercia de forma teórica

El valor que se obtuvo se determinó a partir de los experimentos realizados, sin embargo, debemos asegurar que este valor sea confiable ya que es un dato que influye de forma directa en el cálculo de la fuerza con la que impacta la fuerza. Las variaciones con respecto a la medición pueden deberse a los errores de medición, adquisición y filtrado de las señales por lo que es necesario recurrir al método teórico para comprobar la magnitud del momento de inercia obtenido.

Para realizar el cálculo se debe tomar en cuenta el peso de la puerta ya que es el único elemento de estudio, si intervinieran otros elementos también deberían considerarse. Ayudándonos del **teorema de Steiner** o de los ejes paralelos calcularemos el momento de inercia de la puerta del automóvil que rota con respecto al eje Z.

Se deben realizar algunas idealizaciones para simplificar el cálculo de lo contrario tendríamos que descomponer la puerta en figuras geométricas regulares para calcular el momento de inercia, por lo que se hará la suposición de que su forma es un rectángulo sólido como se muestra en la figura 7.38.

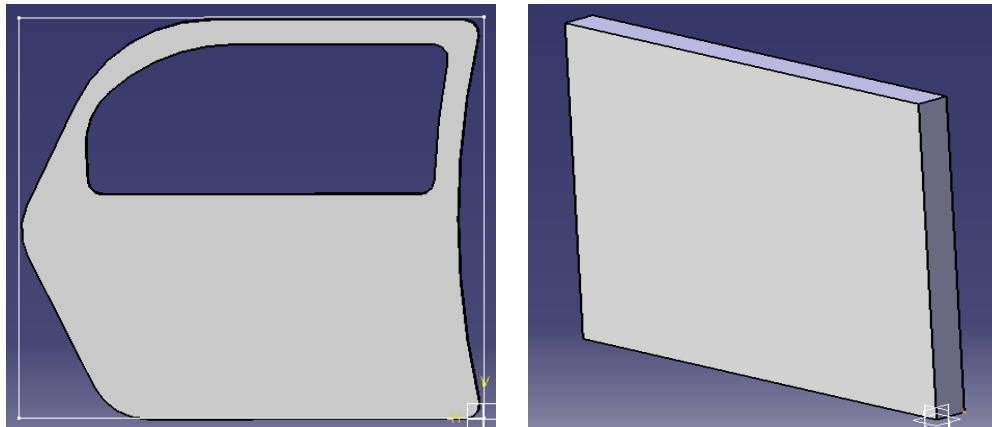


Fig. 7.38 Idealización de la puerta automotriz CAD realizado en Catia V5®

Se sabe que el momento de inercia de un prisma rectangular sólido con respecto al eje que pasa por su centro de masa está dado por:



$$I = \frac{1}{12} M(a^2 + b^2)$$

Fig. 7.39 Diagrama del momento de inercia de un prisma rectangular sólido

Sin embargo, se necesita referir este momento de inercia no al eje que cruza por su centro de masa, si no al eje de rotación **Z** por lo que utilizaremos el teorema de Steiner para el cual basta con adicionar a la ecuación del momento de inercia de un prisma rectangular sólido, el producto de la distancia entre ejes por la masa del elemento **M**.

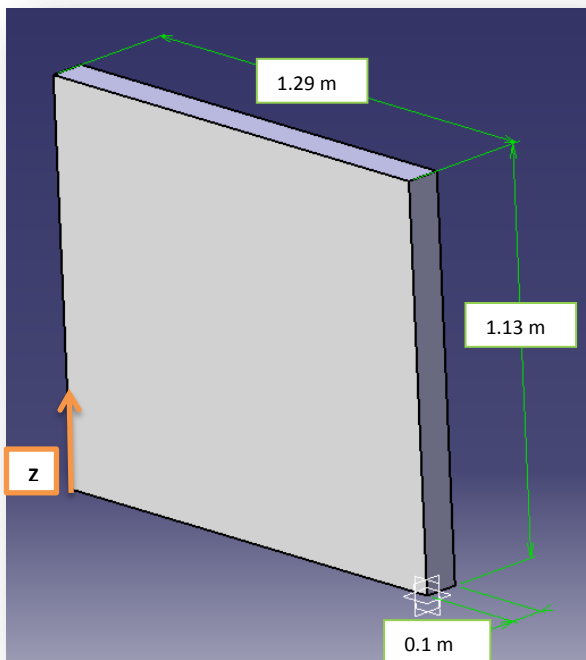


Fig. 7.40 Magnitud del bloque que simula la puerta

Aplicando el teorema de Steiner la ecuación del momento de inercia queda de la siguiente forma:¹⁸

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{12} 22.5(1.29^2 + 0.1^2) \\ &+ 22.5 \left(\left(\frac{1.29}{2} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{2} \right)^2 \right) \\ &= 3.139 + 9.417 \end{aligned}$$

$$= 12.556 \text{ kg m}^2$$



Una vez que se obtiene el momento de inercia de forma teórica del elemento que idealizamos como la puerta del automóvil podemos compararlo con el momento de inercia que obtuvimos de forma experimental y sacar el porcentaje de error.

$$\%E = \frac{12.556 - 6.804}{12.556} * 100 = 45.81\%$$

Como la magnitud del error porcentual es elevando se deben describir las posibles causas por las cuales el valor teórico difiere del valor experimental. La principal causa se debe a que la forma de la puerta que se plantea de idealmente es muy diferente a la forma de la puerta real, aún considerando que ambas tienen la misma masa, la geometría tan diferente influye en los cálculos de manera directa.

²⁰Peralta Roldán, R., Mercado Velazquillo, D. (2013). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para validación de carrocerías*. (pp.

48) Tesis de licenciatura no publicada, UNAM, México Distrito Federal.



VELOCIDAD Y FUERZA

8. Obtención de la velocidad angular de la puerta y cálculo de la fuerza de impacto.

8.1 Velocidad

La velocidad es una magnitud física de carácter vectorial que expresa el desplazamiento de un objeto por unidad de tiempo. Se representa por \vec{v} o \mathbf{v} y sus dimensiones son de longitud recorrida por unidad de tiempo, si la velocidad la medimos en el Sistema Internacional tenemos que sus unidades son el m/s.

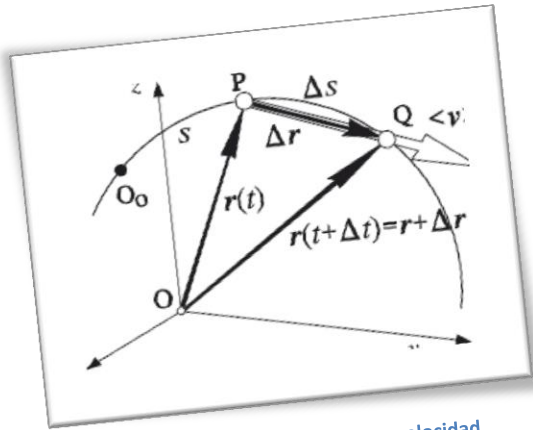


Fig. 8.1 Definición de los vectores velocidad media e instantánea.

En virtud de su carácter vectorial, para definir la velocidad debemos considerar la dirección del desplazamiento y el módulo, el cual se denomina rapidez que es la relación entre la distancia recorrida y el tiempo empleado en completarla.

El concepto que debemos involucrar en el análisis del fenómeno que es objeto de nuestro estudio es que la velocidad es la tasa de cambio de la posición por unidad de tiempo, por consiguiente la aceleración es la **tasa de cambio** de la velocidad por unidad de tiempo.

Este principio es el que utilizaremos para determinar la velocidad del sistema a partir de la señal de aceleración adquirida por medio de los sensores, lo que nos permitirá tener el comportamiento dinámico de la puerta de automóvil ya que integrando la función de aceleración obtendremos la velocidad en cada instante del recorrido de la puerta.

Como se ha venido mencionando desde el planteamiento del problema, el fenómeno que se quiere analizar es un fenómeno dinámico el cual se describe desde que la puerta es impulsada hasta que impacta sobre la carrocería describiendo un movimiento angular para lo cual se debe aplicar el concepto de velocidad angular.

La **velocidad angular** no es propiamente una velocidad en el sentido anteriormente definido sino una medida de la rapidez con la que ocurre un movimiento de rotación. Una vez que se conoce la velocidad de un punto contenido en un sólido y la velocidad angular del sólido se puede determinar la velocidad instantánea del resto de puntos del sólido.²⁰

²⁰Beer & Jonhston (2007) *Mecánica vectorial para Ingenieros "Dinámica"*, México: Mc Graw Hill 8° Edición

Para obtener la magnitud de la velocidad angular es necesario adquirir la aceleración de forma experimental y para conseguirlo se realizó la siguiente prueba.

8.1.1. Prueba de impacto (Door slam test)



Fig. 8.2 Colocación de sensores en la misma línea de acción.

Convencionalmente las empresas automotrices realizan pruebas de apertura y cierre de puertas a los vehículos que están por salir al mercado, durante más de 100, 000 ciclos, esto con la finalidad de saber si cumplirán con el ciclo de vida para el cual fueron diseñadas. Sí la puerta llegara a fallar durante la prueba simplemente se detiene el experimento.

Basándonos en la idea de abrir y cerrar puertas decidimos realizar una prueba similar, con la variante de que no será una máquina la que abra y cierre la puerta si no que serán los mismos usuarios los que realizarán

los diferentes ciclos para tener muestras del comportamiento de la puerta cuando se impulsa con magnitudes diferentes de fuerza.

La prueba consiste en colocar dos acelerómetros sobre la misma línea de acción de la fuerza, uno sobre el cuerpo móvil (puerta) y otro sobre el cuerpo fijo (carrocería). El objeto de colocar los acelerómetros en esta posición es que al momento en que se realice el impacto, la aceleración medida en ambos sensores tendrá la misma magnitud pero en sentido contrario de tal forma que nos arroje el intervalo de tiempo en el que se debe evaluar la integral del impulso para obtener la magnitud de la fuerza de impacto.

Objetivo

- ◆ Determinar por medio de los acelerómetros la gráfica de aceleración de la puerta que se describe cuando el fenómeno físico de estudio se lleva a cabo.
- ◆ Determinar la gráfica de velocidad de la puerta.

Componentes

- ◆ Puerta automotriz acoplada al vehículo
- ◆ 2 Acelerómetros del tipo PCB 303402 SN 15945
- ◆ Tarjeta de adquisición DAQ NI 9234
- ◆ 2 Cables coaxial 5-44
- ◆ Computadora



Fig. 8.3 Componentes requeridos para la prueba

Protocolo de pruebas para la obtención de la velocidad

1.- Colocación de los sensores: Los acelerómetros se deben colocar lo más cerca posible uno del otro para poder ver el tiempo Δt en que ambas velocidades son la misma (después de integrar la gráfica de aceleración). El filtrado e integración de las mediciones es muy importante para poder detectar correctamente ese intervalo de tiempo. Analizando la figura 8.4 se observa que los impulsos $\int P dt$ y $\int R dt$ son contrarios pero de igual magnitud, se localizan en el punto de contacto o en el centroide del área conservando la misma dirección de la línea de impacto. Recordamos que para poder analizar la puerta como una partícula se debe cumplir con la condición de que la aceleración (o velocidad ya integrada) pase por el centro de gravedad de la misma. Se debe considerar que tanto la suspensión del carro como la rigidez interna del chasis y los plásticos de la carrocería reciben parte del impacto y reaccionan a estos impulsos.

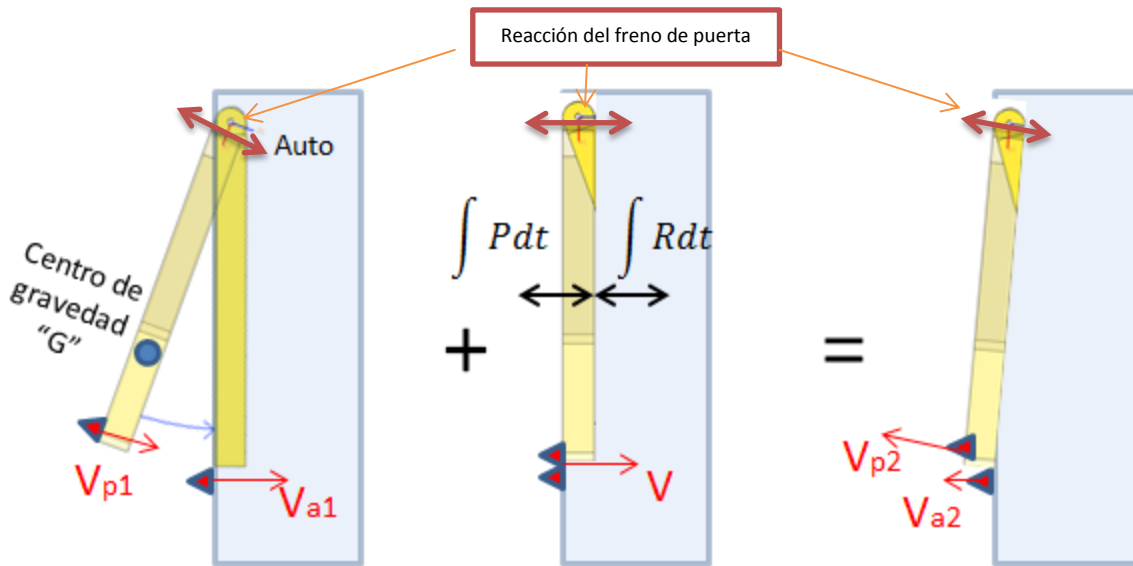


Fig. 8.4 Diagrama de cuerpo libre de la puerta extraído del libro Dinámica para ingenieros, R.C. Hibbeler.

2.- Adquisición de datos: La adquisición de datos para esta prueba se realizará de forma similar a lo que se realizó en la prueba de obtención del momento de inercia, es decir, se utilizará la interfaz que se utilizó para el momento de inercia, con la cual se podrá adquirir los valores de aceleración y posteriormente escribirlos en un archivo de Microsoft Excel® para su fácil manipulación.

3.-Realización de la prueba: Como se mencionó en un principio, la prueba de apertura y cierre de puertas se llevará a cabo mediante la interacción de los usuarios con el vehículo para analizar las distintas magnitudes con las que se impulsa la puerta. La prueba se realizará en dos modalidades, la prueba de azote y la prueba de cerrado normal con el fin de tener el rango de valores de fuerza a los que se puede someter la puerta.

◆ **Prueba de azote**

En esta prueba, los usuarios impulsarán la puerta con una mayor fuerza, cabe mencionar que la magnitud de esta fuerza dependerá de la condición física de cada individuo por lo que se tendrán diferentes muestras. La prueba se realizará llevando a cabo los siguientes pasos y repitiéndolos cinco veces:



Fig. 8.5 Ejemplo de un usuario durante la prueba de azote

- a) Colocar la puerta abierta en su totalidad
- b) Iniciar la adquisición de datos
- c) Dejar pasar aproximadamente 2 segundos para que se estabilicen los sensores
- d) Impulsar la puerta con la mayor fuerza posible
- e) Una vez que la puerta ha impactado, esperar un segundo y detener la adquisición de datos.

Por cada iteración, es decir, cada que un nuevo usuario cierre la puerta, se debe iniciar y detener la prueba para obtener las gráficas de ambos sensores y analizar los eventos por separado.

Las gráficas que se obtienen al final de cada iteración deben tener el siguiente patrón:

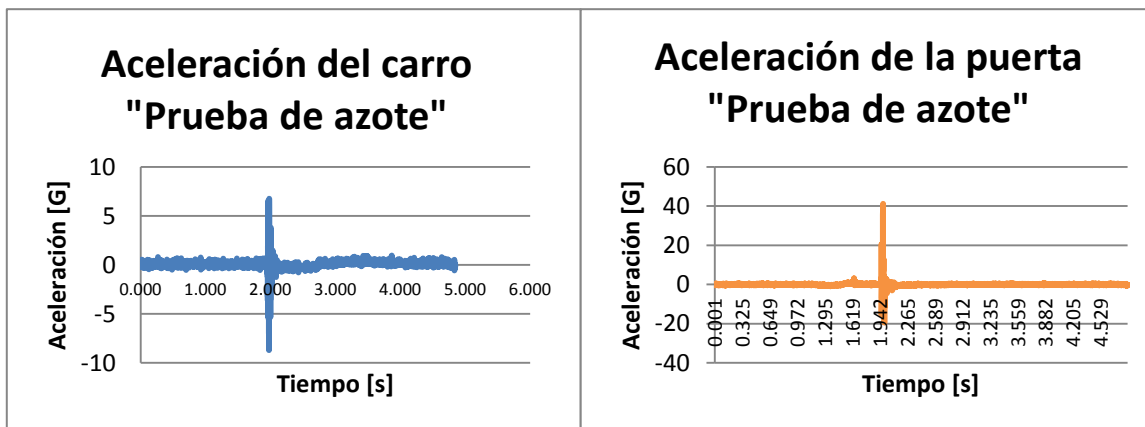


Fig.8.6 Gráfica que por medio de la aceleración describe el trayecto de la puerta hasta el momento del impacto

Es importante resaltar que la gráfica que se muestra en la figura 8.6 aún no ha pasado por ningún proceso de filtrado de señales.

◆ **Prueba de cierre normal**

A diferencia de la prueba anterior, en ésta la puerta debe cerrarse como usualmente se haría, tratando de no azotarla para poder determinar el rango inferior de valores a los que se somete cuando se desempeña bajo condiciones reales. La prueba se realizará llevando a cabo los siguientes pasos:



Fig. 8.7 Ejemplo de un usuario durante la prueba de cerrado normal.

- a) Colocar la puerta abierta en su totalidad
- b) Iniciar la adquisición de datos
- c) Dejar pasar aproximadamente 2 segundos para que se estabilicen los sensores
- d) Cerrar la puerta de forma normal sin una fuerza excesiva al impulsarla.
- e) Una vez que el pestillo de la puerta se sujeta con el aro metálico colocado en la carrocería y que la puerta queda completamente cerrada, esperar un segundo y detener la

adquisición de datos.

Nuevamente las gráficas que se obtienen deben tener el siguiente comportamiento:

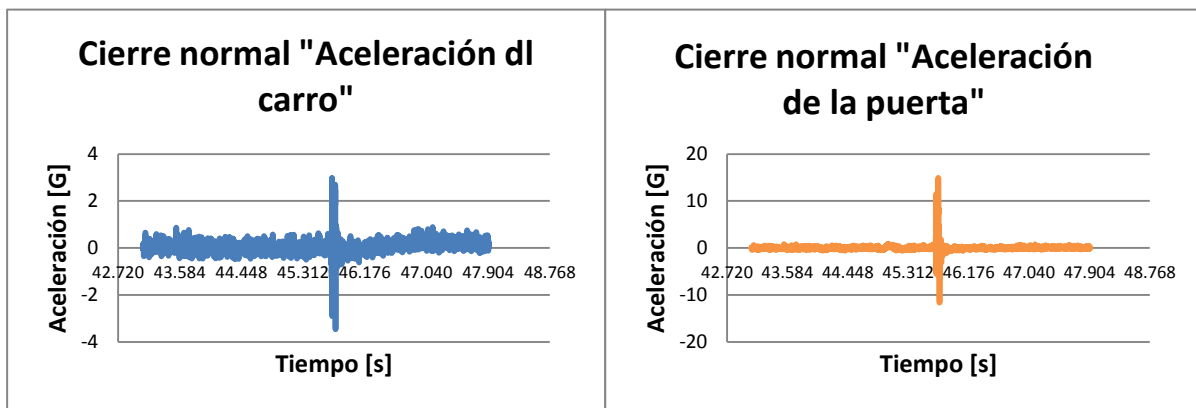


Fig. 8.7. Gráfica que por medio de la aceleración describe el comportamiento de la puerta

Al igual que en la primera etapa de esta prueba, se debe realizar cinco iteraciones.

Análisis de resultados

Una vez que se concluyeron las pruebas se obtienen 20 gráficas diferentes, 10 que describen el comportamiento de la puerta cuando se somete a un fuerte impacto y 10 que describen su comportamiento cuando opera bajo condiciones reales normales. Como ya se mencionó, el hecho de realizar la prueba dividida en dos etapas tiene como objetivo el detectar el rango de valores a los que se puede someter la puerta cuando se desempeña en condiciones reales, desde un máximo hasta un mínimo. Sin embargo al no ser una prueba normalizada, la variación de la fuerza de impacto depende directamente de la condición física de las personas que colaboraron a realizar las pruebas.

En análisis de velocidad lo realizaremos tomando en cuenta el mayor y el menor impulso, esto quiere decir, que de todas las iteraciones realizadas se considerará la que presente los valores más altos de aceleración en cuanto a la prueba de azote se refiere y la que presente los valores más bajos de aceleración durante la prueba de cierre normal. A continuación se realiza el análisis para cada caso.

◆ Prueba de azote

Partiendo de las gráficas originales, es decir de las gráficas que aún no se han filtrado, podemos observar que la aceleración de la puerta es mucho mayor a la aceleración que experimenta el auto de tal forma que la puerta alcanza en un fuerte impacto alrededor de 40 G mientras que el auto lo máximo que experimenta son alrededor de 7 G, abordando lo que se estudió cuando se describió el modelo matemático del fenómeno. El comportamiento del marco de neopreno se debe a que una vez que se registra el impacto, la goma absorbe la fuerza y al ser un elemento dinámico (amortiguador) devuelve al sistema la energía acumulada.

En la figura 8.8 se observa la gráfica sin filtrar de la aceleración que experimenta la puerta de automóvil y se destacan los puntos relevantes de la misma.

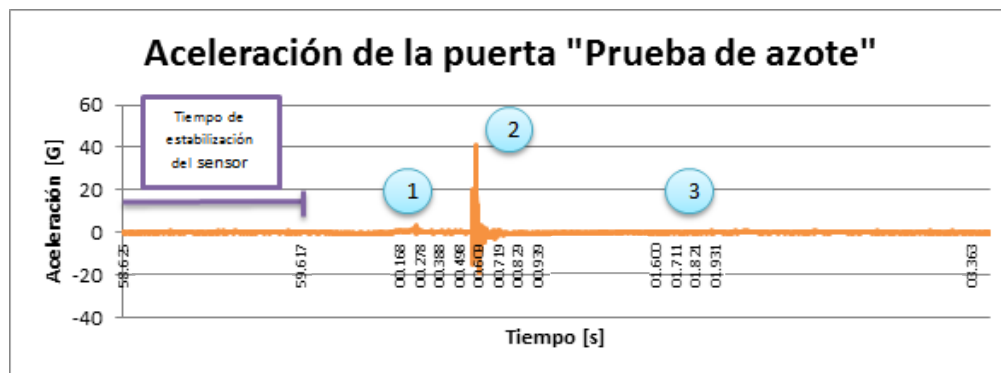


Fig. 8.8 Gráfica de aceleración de la puerta sin filtrar

Después del periodo de estabilización del sensor se destacan tres zonas importantes dentro de la gráfica. La zona número **uno** representa describe el paso de la puerta por el freno, la zona marcada con el número **dos** describe la vibración que experimenta la puerta al momento del impacto. Posteriormente el sistema vuelve a su estado de reposo y es lo que se observa en la **tercera** sección de la gráfica.

Para la aceleración del automóvil se presenta un fenómeno diferente y éste se describe en la gráfica de la figura 8.9.

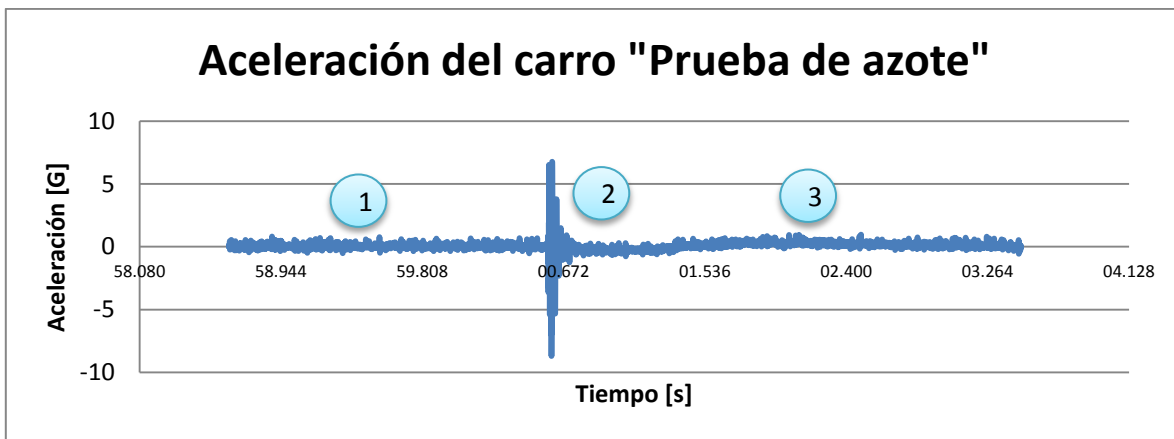


Fig. 8.9 Gráfica de aceleración del carro sin filtrar

La primera etapa que se destaca en la gráfica de aceleración del automóvil representa el periodo de estabilización del sensor, como se puede ver, en esta gráfica no se observa el momento en que la puerta pasa por el freno debido a que este cuerpo (el automóvil) no se enfrenta a dicho proceso. La segunda etapa es la vibración que experimenta el automóvil cuando se ve impactado por la puerta y finalmente, a diferencia de la gráfica de aceleración de la puerta, en esta zona se presenta la transmisión de la energía a acumulada en el marco de goma, podemos ver como aumenta la aceleración en sentido positiva después de que se llevó a cabo el impacto.

Como en ambas gráficas se consideró el tiempo de estabilización del sensor, en las siguientes gráficas ese tiempo se discriminara para reducir el número de datos con los que se debe trabajar debido a que la tasa de muestreo es de 0.001 milisegundos y manipular un elevado número de valores resulta complicado.

En la siguiente gráfica se muestra la interacción que existe entre la aceleración del carro y la aceleración de la puerta con esto se observa claramente el significado de colocar los sensores sobre la misma línea de acción, además de que colocando ambos sensores se podrá obtener el intervalo durante el que las velocidades son iguales. Nuevamente se destacan las tres zonas de la gráfica que se habían explicado con anterioridad.

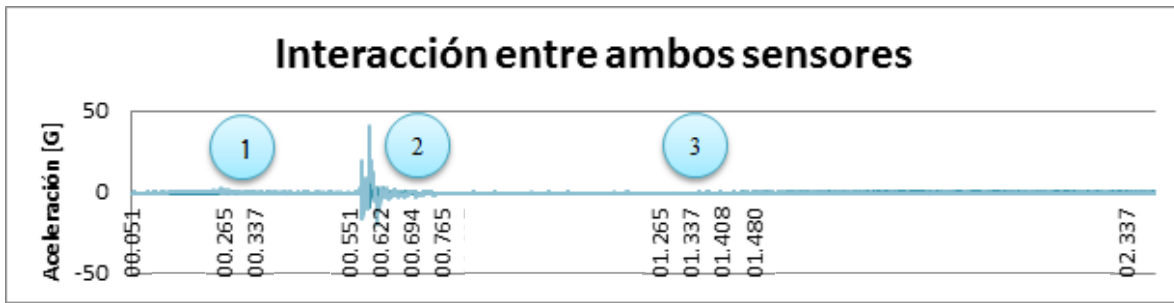


Fig. 8.10 Interacción de la aceleración del carro y la aceleración de la puerta.

En las gráficas consecutivas se presentará un acercamiento a cada zona de la gráfica en la que interactúan ambas aceleraciones. En la figura 8.11 se observa claramente como la puerta es la única que experimenta el paso por el freno.

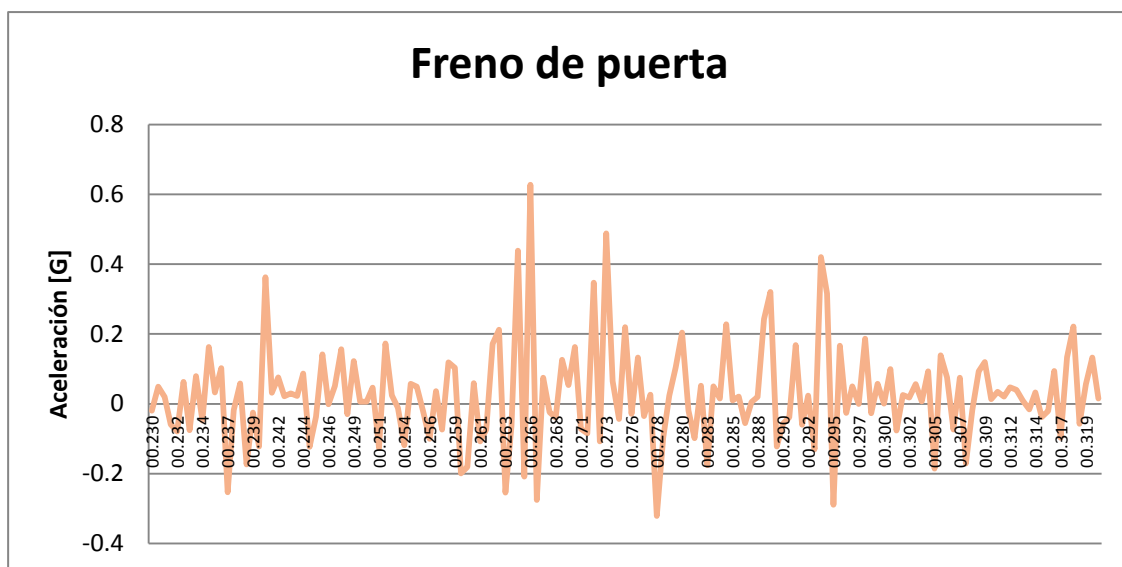


Fig. 8.11 Gráfica de la zona No.1 Freno de puerta

La gráfica que representa a la zona dos es la gráfica que describe el intervalo de tiempo durante el que se lleva a cabo el impacto, se observa que la puerta experimenta vibraciones mayores a las que experimenta el automóvil. Para que no exista confusión, la aceleración de la puerta se representa con los colores claros y la aceleración del auto se representa con los colores oscuros.

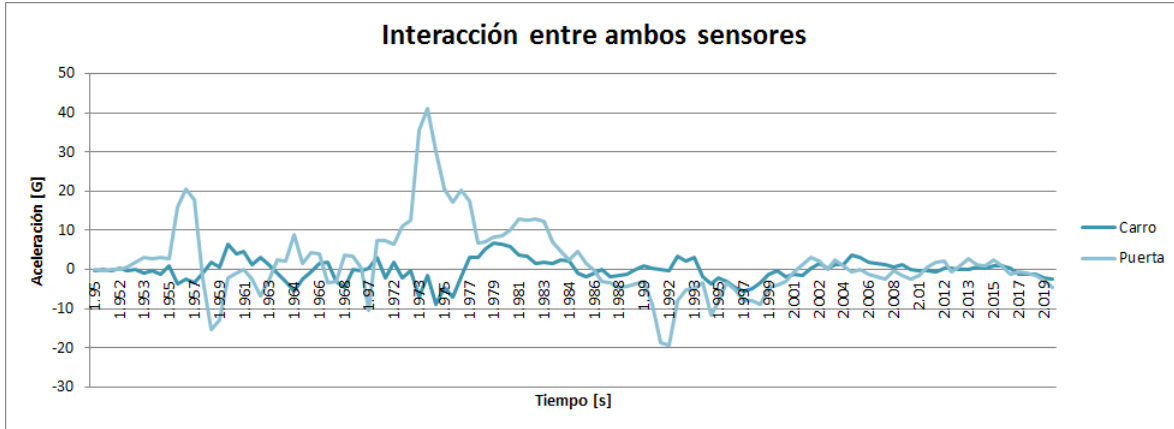


Fig. 8.12 Ampliación de la zona dos "Impacto"

La última zona se representa por la siguiente gráfica, aquí se puede observar la forma en la que el marco de neopreno regresa a la puerta la energía que absorbió durante el impacto, fig. 8.13. Los valores de la aceleración del carro cubren a los valores de aceleración de la puerta debido a que la puerta no experimenta ese fenómeno debido a que el marco está sujeto al carro.

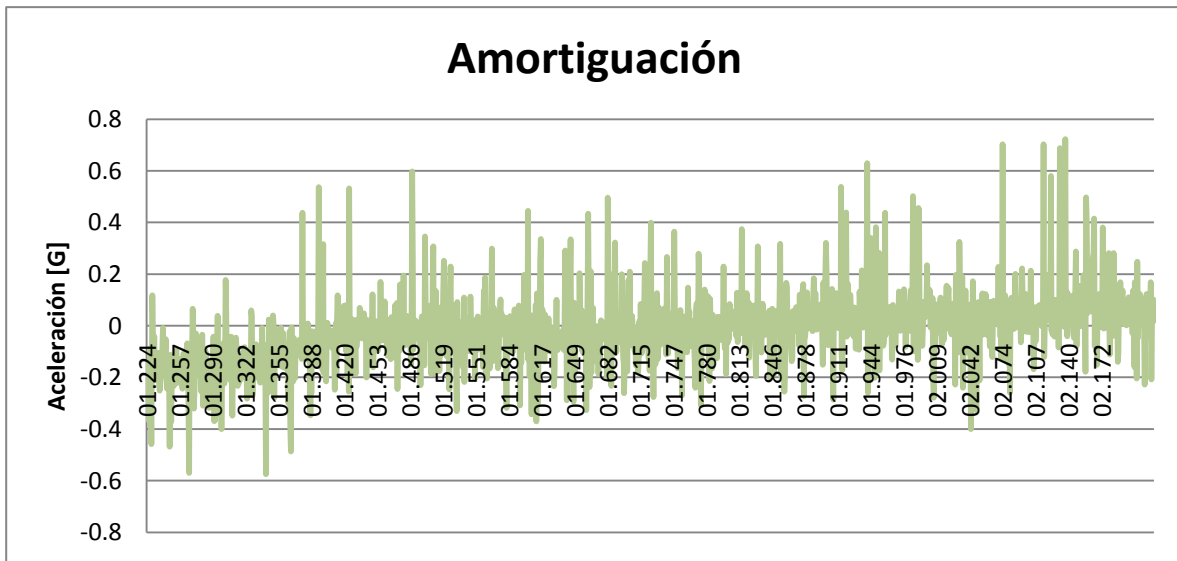


Fig. 8.13 Ampliación de la zona tres "Amortiguación"

Hasta este punto se han descrito las gráficas sin filtrar, sin embargo para que estos datos sean de utilidad requieren someterse a un proceso de filtrado para que se realicen los cálculos de forma correcta. El realizar un proceso de filtrado previo al análisis dinámico nos permite cerciorarnos de que no se está iterando con magnitudes de ruido. Para filtrar las señales se utilizará el módulo de filtrado **wavemenu** que descompone la señal en sus diferentes espectros de frecuencia para que finalmente nos quedemos con la señal de interés. Una vez que se haya aplicado el filtro a la señal original, la gráfica quedará de la siguiente forma:

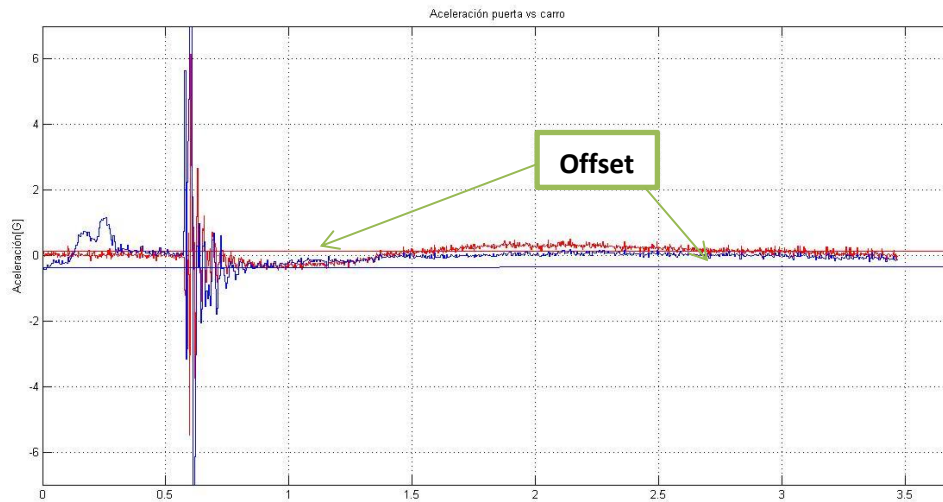


Fig. 8.14 Gráfica de aceleración de ambos sensores filtrada

El filtro que se aplicó a la señal es un **filtro de primer orden** que separó el espectro de frecuencia en tres niveles diferentes (estos niveles se pueden elegir por el usuario dependiendo de la resolución deseada), sin embargo vemos que la gráfica aún se ve afectada por el **offset** con el que trabaja el sensor. Sí la señal está compensada por el sensor no estamos midiendo las magnitudes correctas por lo que es necesario colocar las señales en cero como se muestra en la figura 8.15.

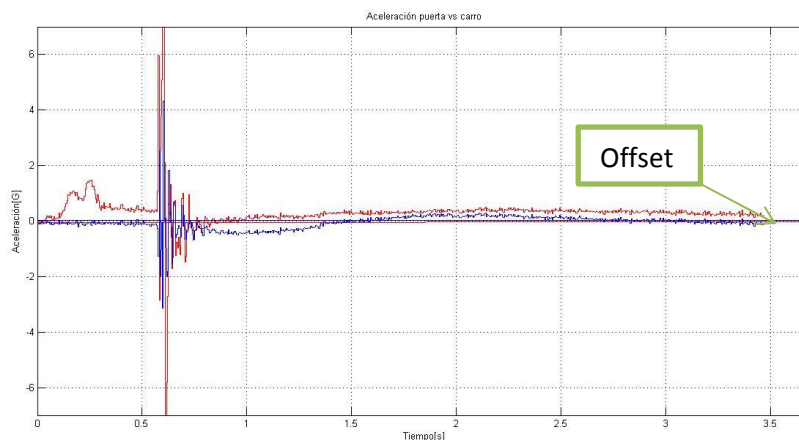


Fig. 8.15 Señal filtrada y sin offset

Una vez que la señal se encuentra filtrada se puede observar con una mejor resolución el momento en que la puerta pasa por el freno y el momento en que el marco de goma regresa la energía acumulada a la puerta, aquí es importante mencionar que cuando la gráfica aún no se filtraba no se veía claramente que la puerta experimentara ese movimiento. Es claro que cuando la señal se ha filtrado se pueden ver comportamientos a lo largo de la gráfica que no se observaban anteriormente como el caso de la reacción del marco de neopreno que también afecta a la puerta y que inicialmente no se percibía, sin embargo en el momento del impacto la gráfica no se modifica y esto se debe a que el umbral de medición está por encima del ruido lo que quiere decir que la magnitud del impacto es mucho mayor en comparación con la magnitud de las vibraciones de los demás elementos por lo que estos comportamientos se pueden despreciar.

Si bien es cierto que la gráfica del comportamiento de la puerta exalta diferentes puntos importantes, se debe tener claro que el fenómeno de estudio se centra en el **impacto** por lo que para realizar la integración de la gráfica de aceleración se discriminará el efecto del freno de puerta y el efecto de la amortiguación quedándonos únicamente con el impacto. Cabe mencionar que las unidades de aceleración con las que estamos trabajando no son las correctas para realizar el análisis dimensional por lo que debemos convertir las unidades de la aceleración de **G** a m/s^2 .

Realizando los cambios debidos, la gráfica que vamos a integrar es la siguiente.

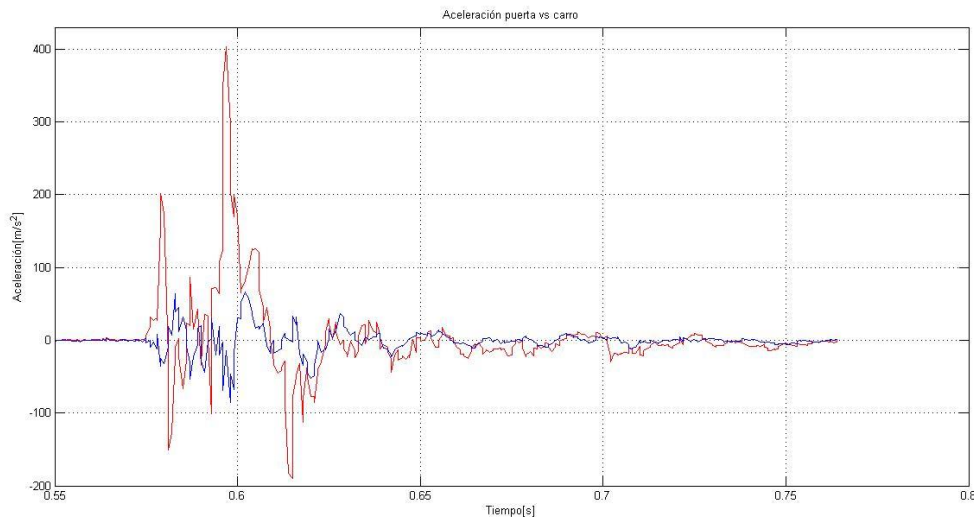


Fig. 8.16 Gráfica filtrada de zona dos "Impulso" sin offset y unidades del Sistema Internacional

Sabiendo que la aceleración es la tasa de variación de la velocidad por unidad de tiempo, debemos aplicar el proceso inverso, es decir, en lugar de derivar una función tendremos que integrarla.

Para integrar la aceleración debemos aplicar el concepto de integración numérica y para ello existen diferentes métodos numéricos, el método que se utiliza en este trabajo de tesis para integrar la gráfica de aceleración se denomina **método de Euler** y se explica con detalle en el **apéndice A**

Una vez aplicado el método de integración a los datos, se obtiene la gráfica de la figura 8.17 en la que se señala el punto en que las velocidades de ambos sensores son iguales, lo cual quiere decir que es el instante en que se presenta el impacto, posteriormente se observan las vibraciones del sistema como respuesta al movimiento.

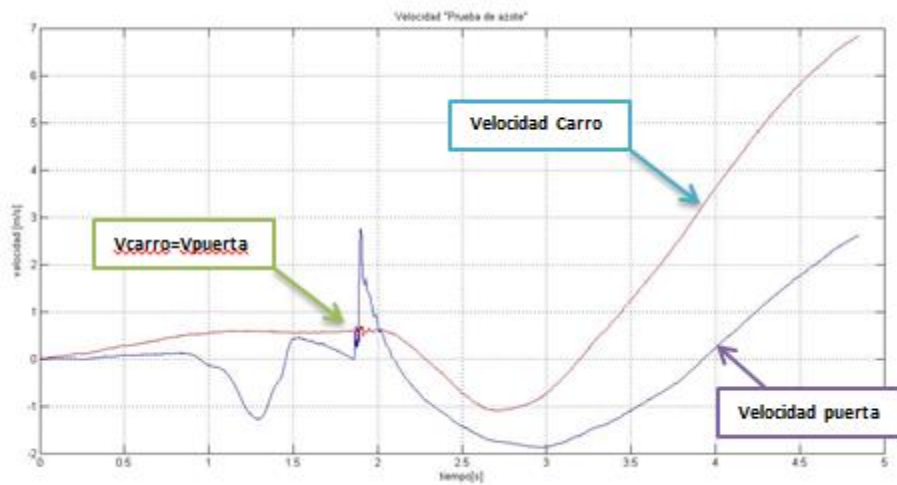


Fig. 8.17 Gráfica de velocidad para prueba de azote

Como se especificó en el apartado del análisis dinámico, para hacer uso de la ecuación de impulso y momentum angular se deben cumplir dos condiciones:

- ◆ Que la línea de acción de la velocidad se encuentre en la misma línea de acción del centro de gravedad.
- ◆ Que se tenga definido el intervalo para evaluar la integral de la fuerza o el impulso

La primera condición se ha cumplido satisfactoriamente colocando el sensor en la misma línea de acción del centro de gravedad y para cumplir con la segunda condición se debe determinar el intervalo de la gráfica en el que la medición de ambos sensores tenga la misma magnitud lo que indicará que es el momento justo en el que impacta la puerta.

Realizando un acercamiento al punto que se señala en la figura 8.17 ($V_{\text{carro}}=V_{\text{puerta}}$), se puede medir el intervalo de tiempo para saber los límites de integración del momento de fuerza perteneciente a la ecuación que modela el fenómeno físico.

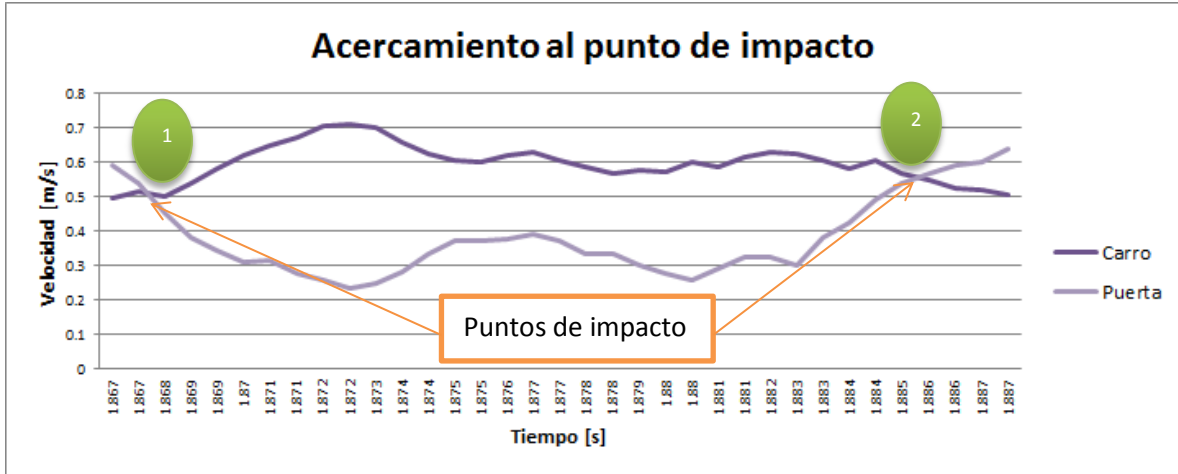


Fig.8.18 Acercamiento al punto de intersección de la velocidad de ambos sensores

Finalmente en el software en que se realizó la integración se puede obtener el dato del tiempo con sólo posicionar el cursor sobre el punto deseado, cabe mencionar que se trabajará con los valores correspondientes al primer punto de impacto así que después de iniciada la prueba se toma el tiempo en el que ocurrió el impacto de tal forma que se obtienen los siguientes parámetros:

$$t_1=1.867[s] \quad V1=0.541m/s$$

$$t_2=1.868 [s] \quad V2=0.453 m/s$$

$$\Delta t=t_2-t_1=1.868-1.867=0.001[s]$$

◆ Prueba de cierre normal

Partiendo nuevamente de las gráficas originales, podemos observar el comportamiento de la puerta cuando no es sometida a un impulso fuerte. Al igual que la prueba anterior, es complicado determinar la fuerza con la que se impulsa la puerta ya que es un factor que depende de la condición física del usuario pero que ayuda a predecir el comportamiento de la puerta cuando se desempeña bajo condiciones reales.

La primera gráfica que se muestra es la que corresponde al sensor de la puerta (Fig. 8.20), en ella se destacan los puntos de estabilización del sensor, impulso, el paso por el freno de puerta y finalmente el impacto. Cabe mencionar que es notable la reducción de la aceleración que experimenta la puerta en comparación con la de la prueba de azote.

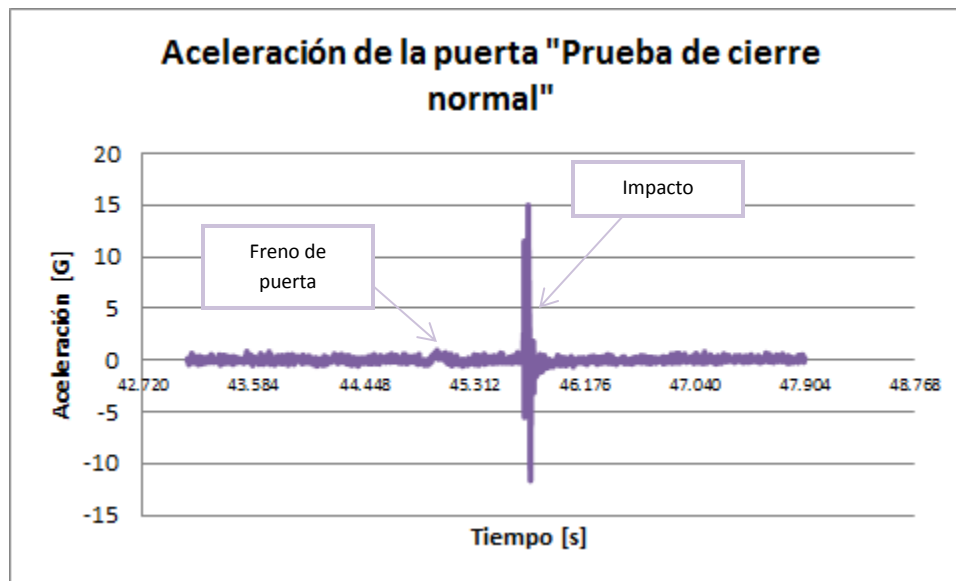


Fig. 8.19 Gráfica original de aceleración de la puerta

La siguiente gráfica corresponde a la aceleración del sensor del carro y podemos identificar las zonas en las que se lleva a cabo el impacto así como la zona en la que se transmite la fuerza que almacena el marco de neopreno. (Fig. 8.20)

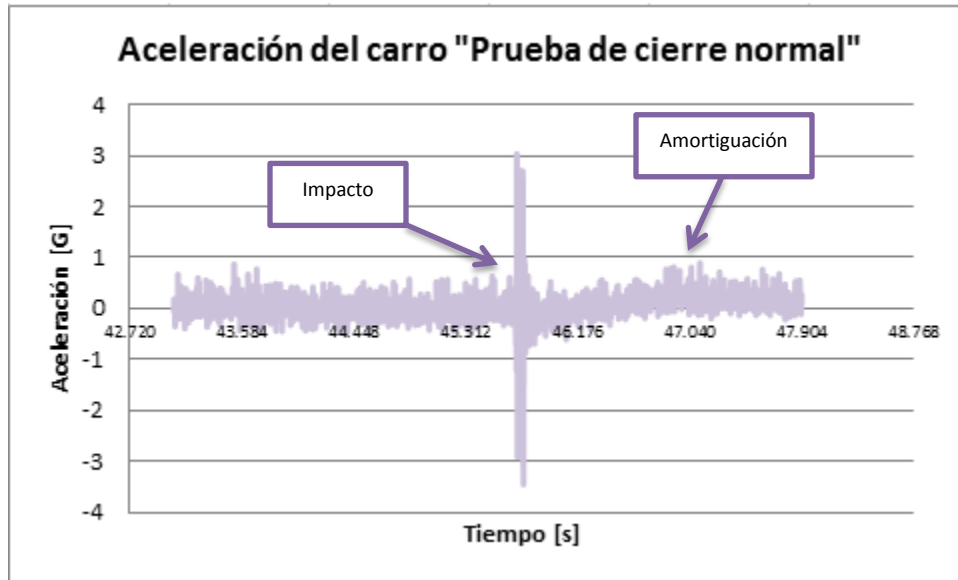


Fig. 8.20 Gráfica original de la aceleración del carro

El siguiente paso que se debe realizar es el filtrado de las señales para observar el comportamiento de la puerta durante su trayectoria. Utilizando el módulo de filtros **Wavemenu de Matlab®** descomponemos la señal en sus diferentes espectros de frecuencia, para obtener la nitidez adecuada en las gráficas se descompusieron en tres niveles, la gráfica filtrada queda de la siguiente forma:

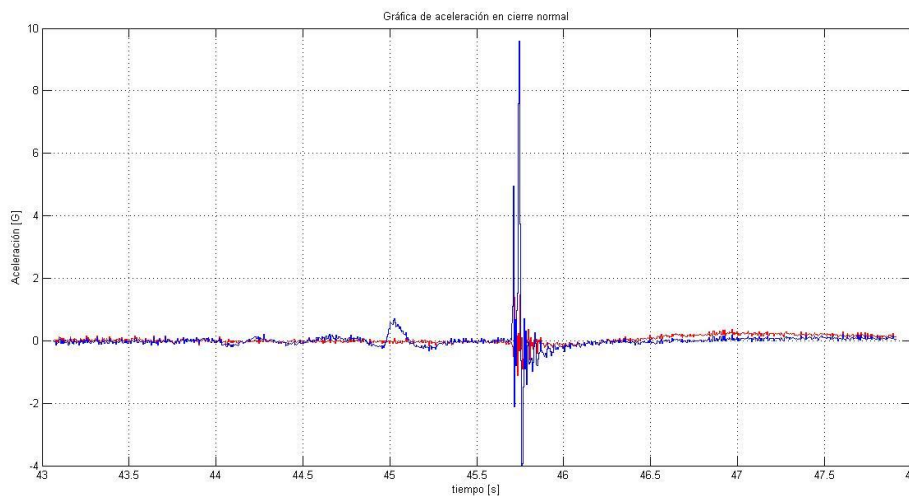


Fig. 8.21 Gráfica filtrada de aceleración en prueba de cierre normal

Como ya se ha mencionado, el objeto de estudio se basa en el momento en que impacta la puerta sobre la carrocería de tal forma que se discriminaran las zonas de la gráfica que se refieren al paso de la puerta por el freno y la amortiguación por parte del marco de goma. Realizando los cambios mencionados y transformando las unidades de la aceleración a m/s^2 , nos queda lo siguiente:

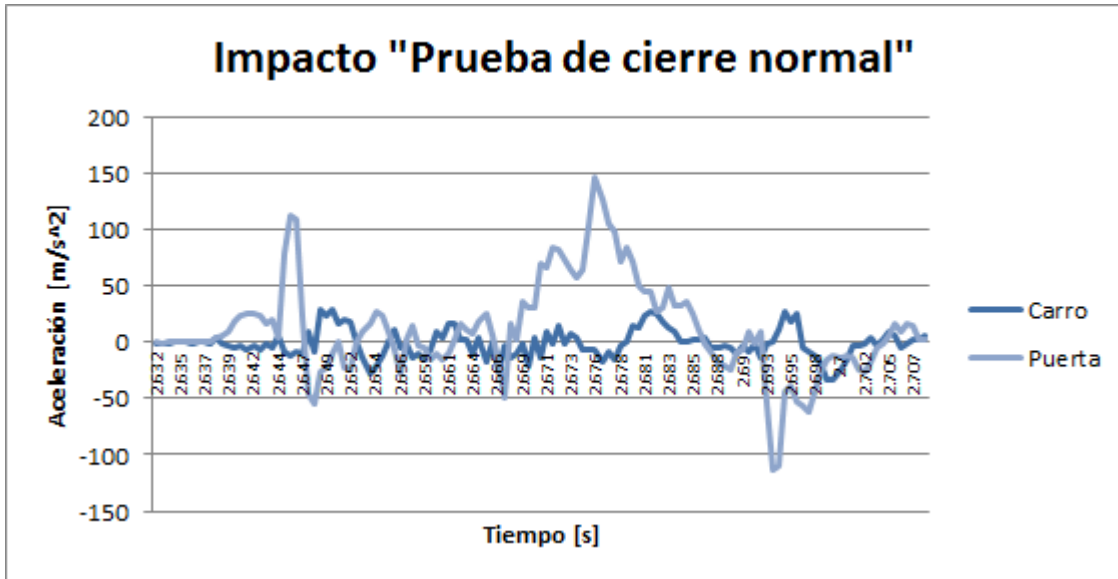


Fig. 8.22 Gráfica correspondiente a la zona de impacto

El siguiente paso es realizar la integración de la trayectoria de la puerta durante el impacto y detectar el punto en el que las velocidades de ambos sensores se igualan, cuando el punto se haya detectado se podrá obtener el intervalo de integración que ayudará a la obtención de la fuerza en ese punto.

La gráfica de velocidad (gráfica integrada) queda de la siguiente forma:

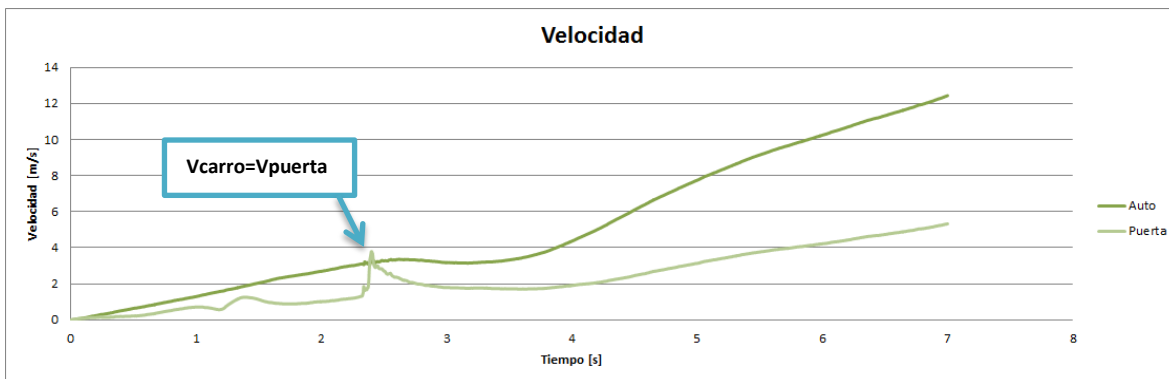


Fig.8.23 Gráfica de velocidad "prueba de cierre normal"

Para poder determinar el intervalo de tiempo en que las velocidades se intersectan se realiza un acercamiento a la gráfica de la figura 8.23.

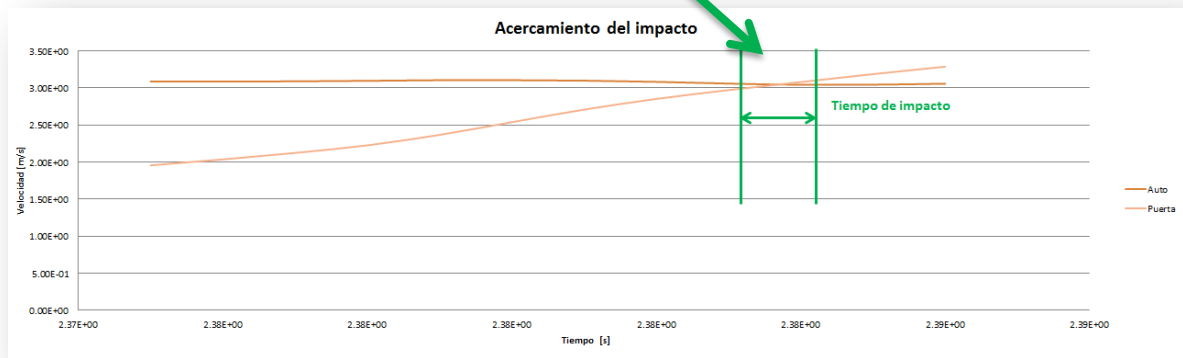
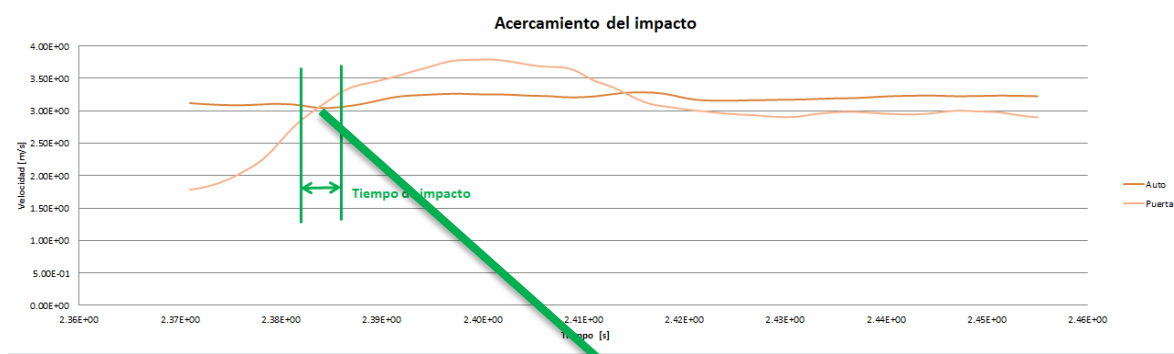


Fig. 8.24 Gráfica de acercamiento del impacto

Finalmente se pueden obtener los datos correspondientes al tiempo y la velocidad del intervalo en que coinciden ambos sensores. Para fines matemáticos se debe obtener la velocidad en el momento inminente antes y después del impacto para aplicar el valor a la ecuación que modela el fenómeno.

$t_1 = 1.441 \text{ [s]} \quad V_1 = 3.09 \text{ [m/s]}$
 $t_2 = 1.448 \text{ [s]} \dots V_2 = 3.11 \text{ [m/s]}$
 $\Delta t = 0.007 \text{ [s]}$



8.2 Cálculo de la fuerza de impacto

Después de haber realizado detenidamente todas las pruebas que se describen en este trabajo de tesis, llegamos al momento en el que se tienen que aplicar todos los valores obtenidos para el cálculo de la fuerza de impacto.

Recordando el concepto de velocidad angular, se sabe que la velocidad que calculamos durante las pruebas con el acelerómetro, es la velocidad instantánea de un punto a lo largo del recorrido de la puerta. Si bien es cierto que en el instante en que se realiza el impacto las velocidades son iguales, se debe considerar un punto antes y un punto después para realizar la comparación y saber que velocidad llevaba la puerta cuando impacta.

Para realizar el cálculo de la fuerza aplicaremos el concepto de impulso y momentum angular:

$$J_p \omega_1 + \sum \int_{t_1}^{t_2} M dt = J_p \omega_2$$

El primer paso para el cálculo de la fuerza es calcular la relación que existe entre la velocidad instantánea del sensor y la rapidez con la que recorre la trayectoria completa, esto con el fin de determinar la velocidad angular del sistema. Dicha relación se puede calcular a través de la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{V_m}{r}$$

Donde V_m es la velocidad instantánea de la partícula y r la distancia que existe horizontalmente desde el eje de rotación de la puerta (eje de las bisagras) hasta el punto en que se colocó el acelerómetro.

Es importante mencionar que la integral del impulso se debe evaluar en el instante en que se tomó el valor de la velocidad, considerando que se tomó un valor antes y uno después del impacto, el valor de tiempo está dado por Δt .

En el siguiente apartado se presentan los cálculos de la fuerza correspondientes a ambas pruebas.

8.2.1 Cálculo de la fuerza de impacto en la prueba de azote

Datos

Variable	Magnitud
Distancia del eje de rotación al sensor	r=98.8 cm=.988[m]
Momento de inercia	Jp=6.804 [kg m²]
Tiempo inicial	t1=1.867 [s]
Tiempo final	t2=1.868 [s]
Velocidad inicial	V1=0.541 [m/s]
Velocidad final	V2=0.453 [m/s]

Lo primero que se debe realizar es calcular la relación que existe entre la velocidad instantánea y la velocidad angular por medio del radio de la circunferencia que describe la puerta. Es importante mencionar que la distancia se toma a partir del eje de rotación de la puerta (eje de las bisagras).

$$\omega_1 = \frac{V_m}{r} = \frac{0.541 \text{ m/s}}{0.988 \text{ m}} = \mathbf{0.547 \text{ rad/s}}$$

$$\omega_2 = \frac{V_m}{r} = \frac{0.453 \text{ m/s}}{0.988 \text{ m}} = \mathbf{0.458 \text{ rad/s}}$$

Despejando el momento de fuerza de la fórmula de impulso y momentum angular se obtiene:

$$(1) \sum \int_{t_1}^{t_2} M dt = Jp\omega_2 - Jp\omega_1 \quad (2) M(t_2 - t_1) = Jp\omega_2 - Jp\omega_1$$

$$(3) M(\Delta t) = Jp\omega_2 - Jp\omega_1 \quad (4) M = (Jp\omega_2 - Jp\omega_1) \left(\frac{1}{\Delta t} \right)$$

Posteriormente se deben sustituir los datos de la tabla de variables en la ecuación número cuatro:

$$M = (Jp\omega_2 - Jp\omega_1) \left(\frac{1}{\Delta t} \right) = \left[(6.804 \text{ gm}^2 * 0.547 \frac{\text{rad}}{\text{s}}) - (6.804 \text{ Kg m}^2 * 0.458 \text{ rad/s}) \right] \left(\frac{1}{0.001 \text{ s}} \right) \\ = \mathbf{605.556 \text{ Nm}}$$



Se sabe que cuando se aplica una fuerza en algún punto de un cuerpo rígido, dicho cuerpo tiende a realizar un movimiento de rotación en torno a algún eje. Ahora bien, la propiedad de la fuerza aplicada para hacer girar al cuerpo se mide con una magnitud física que llamamos **torque o momento de la fuerza**.

Entonces, se llama torque o momento de una fuerza a la capacidad de dicha fuerza para producir un giro o rotación alrededor de un punto y se define como:

$$^{(5)} M = F * d$$

Donde M es el momento que calculamos con la ecuación de impulso y momentum angular, d=r es la distancia medida desde el eje de rotación de la puerta hasta el punto en que actúa la fuerza, F es la magnitud de la fuerza con la que impacta la puerta en el instante antes mencionado por lo tanto se debe despejar F de la ecuación cinco.

$$F = \frac{M}{r} = \frac{605.556 \text{ Nm}}{0.988 \text{ m}} = 612.911 \text{ N}$$

8.2.2. Cálculo de la fuerza de impacto en la prueba de azote

Los cálculos correspondientes a la prueba de cierre normal se realizan de la misma forma que como se realizaron para la prueba de azote por tal motivo describen de forma simplificada a continuación:

Datos

Variable	Magnitud
Distancia del eje de rotación al sensor	r=98.8 cm=.988[cm]
Momento de inercia	Jp=0.6967 [kg m²]
Tiempo inicial	t1=1.441 [s]
Tiempo final	t2=1.448 [s]
Velocidad inicial	V1=3.09[m/s]
Velocidad final	V2=3.11 [m/s]

Calculo de la relación entre la velocidad instantánea y la velocidad angular por medio del radio de la circunferencia que describe la puerta:

$$\omega_1 = \frac{V_m}{r} = \frac{3.09 \text{ m/s}}{0.988 \text{ m}} = 3.128 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = \frac{V_m}{r} = \frac{3.11 \text{ m/s}}{0.988 \text{ m}} = 3.147 \text{ rad/s}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de impulso y momentum angular se tiene:

$$M = (Jp\omega_2 - Jp\omega_1) \left(\frac{1}{\Delta t} \right) = \left[\left(6.804 \text{ Kg m}^2 * 3.147 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) - \left(6.804 \text{ Kg m}^2 * 3.128 \text{ rad/s} \right) \right] \left(\frac{1}{0.007 \text{ s}} \right) = 18.468 \text{ Nm}$$

El siguiente paso es deducir a partir del momento de fuerza, la fuerza con la que impacta la puerta en el marco de la carrocería.

$$F = \frac{M}{r} = \frac{18.468 \text{ Nm}}{0.988 \text{ m}} = 18.692 \text{ N}$$



9. Conclusiones y comentarios

El realizar un trabajo de investigación en ocasiones representa un desgaste tanto mental como físico, en lo personal creo que cuando un tema es del agrado de la persona que desarrolla el trabajo, el desgaste es sólo la consecuencia de realizar un pequeño avance en la investigación. El hablar de un tema que se relacione con la industria automotriz me ha hecho entender una pequeña parte de una de mis grandes pasiones. Tras desarrollar algunas etapas que guiaran el conocimiento para la obtención de un valor como es la fuerza de impacto, se descubrió el comportamiento de las puertas automotrices así como la interacción de la misma con cada uno de sus elementos.

Es importante mencionar que para obtener el valor que se buscaba y cumplir con los objetivos, fue necesario tomar parte de conocimiento adquiridos durante la licenciatura pero que al paso del tiempo se convirtieron en herramientas que nos ayudan a plantear la problemática de manera correcta para llegar a su solución. Yendo desde la observación hasta el modelo matemático, observamos que el fenómeno físico involucra variables que no son sencillas de visualizar como lo son los ángulos de inclinación de la puerta, aceleraciones y vibraciones, por lo que una vez que se detectó la función de la puerta, se plantea el diseño de las pruebas que ayudarán a obtener todas y cada una de las variables que no se tienen en primera instancia.

Cuando se han obtenido las variables necesarias para el cálculo de la fuerza se procede a determinar la magnitud de la misma. Como se observa en la sección de cálculos de fuerza, el dato que se obtiene es un valor numérico que encierra un profundo análisis, es decir, si hablamos de la **prueba de azote** sería lógico que la fuerza que la magnitud de la fuerza sea mucho mayor con respecto al que se obtiene en la prueba de cierre normal, sin embargo no es así, aunque la fuerza que se obtienen al cerrar la puerta normal no es por mucho mayor a la fuerza que se obtienen en el azote, esto se debe a que cuando la puerta recibe un fuerte impulso para cerrarla se rompe la inercia de sus elementos de permanecer en reposo, con esto me refiero a que todos los elementos se conjugan para realizar la función para la que fueron diseñados y de esta forma evitar que la puerta impacte con gran fuerza sobre el marco de la carrocería.

Con lo anterior mencionado puedo decir que el verdadero valor de mi tesis no es el obtener la magnitud de alguna variable si no el análisis que se realizó para obtener el valor de dicha variable. Utilizando las gráficas que se obtienen al desarrollar cada una de las pruebas se puede analizar el comportamiento de la puerta a lo largo de su trayectoria, lo cual nos permite observar el desempeño de sus elementos para poder predecir si es que éste fallará o tendrá un desempeño confiable.

Es importante mencionar que para el análisis matemático del fenómeno en cuestión se realizaron algunas idealizaciones para simplificar el cálculo de la fuerza, entre ellas se encuentran las siguientes:

- ◆ Sistema sin fricción
- ◆ Eliminación de ángulos de inclinación de la puerta
- ◆ Se considera la puerta con todos sus elementos como un sistema en general, no se analiza cada elemento por separado.
- ◆ Se realizan las pruebas de forma general, es decir, se prescindieron de ninguno de los elementos que conforman al sistema.

Finalmente debo mencionar que analizar un fenómeno que por sí mismo es complejo, ha resultado un gran reto para mí ya que no sólo se requiere aplicar los conocimientos y habilidades que se adquieren a lo largo de carrera sino que se necesita tener una gran capacidad de análisis para ver más allá de lo que es evidente.

Cuando inicié el proyecto de tesis parecía trivial el saber cómo se abren y cierran las puertas de los automóviles ya que es un ejercicio que se ejerce cotidianamente, sin embargo, conforme el proyecto fue avanzando fue claro que una puerta tratándola como sistema encierra n variables y n elementos que se comportan de forma diferente, es muy complicado tratar de normalizar su comportamiento y más si se desempeña bajo condiciones reales ya que depende en gran medida del usuario.

Si bien es cierto que una puerta de auto representa un pequeño sistema del mismo, es importante observar cómo cada uno de los sistemas se diseñan correctamente para que se acoplen con los demás sistemas y de esta forma obtener un objeto funcional. Como lo mencioné en un principio este trabajo me ha permitido enriquecer el conocimiento que tenía del sector automotriz y aunque es una parte muy pequeña me es satisfactorio dar un pequeño avance en cuando a la innovación automotriz se refiere.





Trabajo a futuro

El objetivo de esta tesis cumple con una pequeña parte del objetivo general del proyecto ya que se pretende realizar un sistema innovador que determine ¿por qué fallan las puertas de los automóviles? Sin embargo el primer paso para lograrlo es definir la función crítica de lo que se quiere hacer. Al realizar esto nos pudimos dar cuenta que la puerta de un automóvil tienen la función de mantener seguras a los usuarios dentro del automóvil cuando éste se encuentra en marcha así pues si la puerta falla la función no se cumple. Parte de las causas de las fallas en las puertas consiste en la fuerza de impacto ya que ésta se distribuye a todos los elementos de la puerta por medio de vibraciones que en ocasiones son la causa de que los tornillos se desajusten o incluso que los pernos que le dan movilidad a las bisagras, se flexionen.

Por lo anterior mencionado existen puntos que aún quedan por desarrollarse y estos puntos son:

1.- Considerando la fuerza de impacto como una constante, ya que se puede calcular, extrapolar la magnitud para relacionarla con el análisis de todos y cada uno de sus elementos.

2.- Una vez que se haya realizado el análisis matemático se puede continuar con el diseño de un sistema mecatrónico que involucre todas las variables adquiridas, este sistema se conformará por distintas áreas del conocimiento como lo son:

- ◆ Diseño
- ◆ Instrumentación
- ◆ Control
- ◆ Programación

3.- Cuando se tenga el diseño del sistema, la siguiente etapa consistirá en implementar el sistema realizando pruebas bajo condiciones reales ya que el sistema debe poder operar en todas las condiciones a las que se somete un automóvil para que de esta forma se obtengan resultados confiables.

4.- La finalidad de este sistema es que determine las posibles causas de las fallas en las puertas automotrices, es decir, que realice un análisis para detectar si el diseño de sus componentes es el correcto y de no serlo plantear el rediseño.



Apéndice A

Programa de integración desarrollado en Matlab®

Método de Euler

Considere el problema de calcular la pendiente de una curva desconocida que comienza en un punto dado y satisface una cierta ecuación diferencial dada. Se puede pensar en la ecuación diferencial como una fórmula que nos permite calcular la pendiente de la recta tangente a la curva en cualquier punto de la curva, siempre que el punto se conozca.

La idea es que a pesar de que la curva es desconocida en principio, su punto de comienzo es conocido. Entonces, de la ecuación diferencial se puede computar la pendiente de la curva en el punto inicial y por lo tanto la recta tangente a la curva.

Ahora, dando un pequeño paso sobre dicha recta, podemos tomar un nuevo punto A1 y suponer que dicho punto pertenece a la curva, entonces seguimos el mismo razonamiento aplicado anteriormente y volvemos a calcular la pendiente de la recta tangente a la curva en el punto A1. Luego de varios pasos tendremos formada una curva poligonal A0 A1 A2 A3...An. En general esta curva que obtenemos al aplicar el método no diverge lejos de la curva original, además el error entre ambas curvas se puede minimizar si se dan pasos muy pequeños al avanzar sobre la recta tangente a la curva y además el intervalo sobre el que trabajamos es finito.

```
%% PROGRAMA QUE CALCULA LA INTEGRAL NUMERICA
%% *****
% clear all % limpia las variables de workspace
clc % limpia pantalla de comandos
clf
close all % cierra ventanas de las imágenes

%% DEFINICION DE LAS VARIABLES DESEADAS
t0=0; % Tiempo inicial
tf=354; % Tiempo final
n_steps=1; % Número de divisiones para tamaño de
h=(tf-0)/(n_steps*tf); % Tamaño de paso

impacto=[introducir el arreglo de valores]
tiempo1=[introducir el arreglo de valores]
t=tiempo1;
plot(t,impacto')
grid on

%% DEFINICION DE LA FUNCIÓN A INTEGRAR
funcion=zeros(1,n_steps); % inicializamos al vectorde la funcion
funcion=impacto % (t);%sin(t);%t.^2;% Función a definir

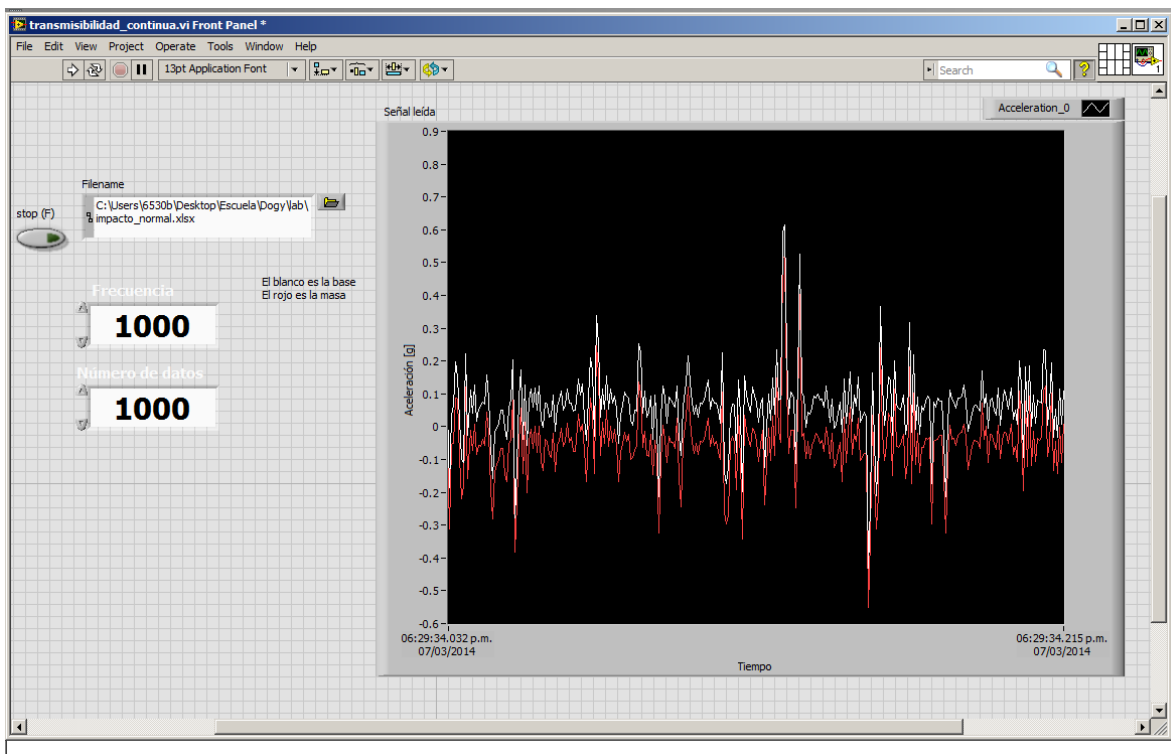
%% INTEGRAL DE LA FUNCIÓN
%Ifuncion=zeros(1,n_steps); % inicializamos el vector de la derivada
Ifuncion(1)=0; %
% 1RA APROXIMACION DE LA INTEGRAL
```

```

%*****
for k=1:1:n_steps*tf%[delta:delta:4*pi]
    %u=t(k);
    Ifuncion(k+1)=Ifuncion(k)+funcion(k)*h;% integral numérica
end
plot(t,funcion,'b','LineWidth',1.5);
grid on
hold on
plot(t,Ifuncion','r--','LineWidth',1.5);
grid on
    
```

Interfaz gráfica desarrollada en NI LabView®

En las siguientes imágenes se muestra la interfaz utilizada para la adquisición de señales, sin embargo como se mencionó en el texto no podemos dar detalles específicos de la misma debido a que es un programa protegido diseñado y programado por el Maestro en Diseño Mecánico Daniel Briseño.



Interfaz gráfica, pantalla de comunicación con el usuario

La segunda imagen presenta un fragmento del código (diagrama de bloques) de la aplicación.

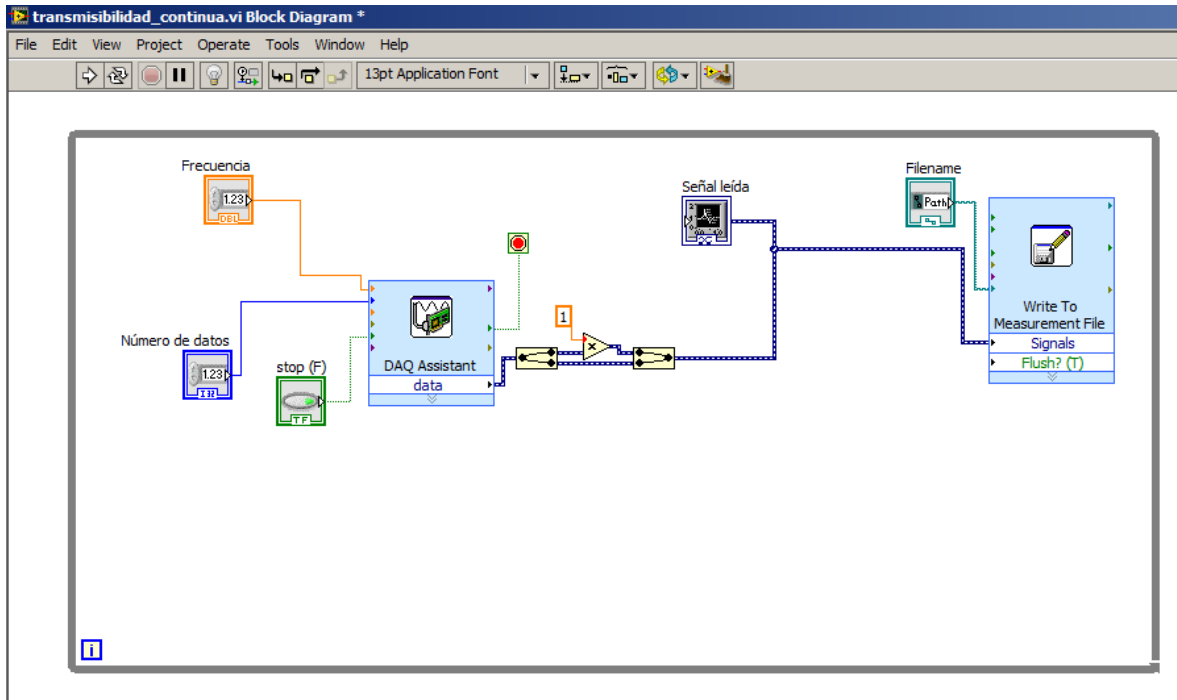


Diagrama de bloques de la aplicación

Apéndice B


Especificaciones de los componentes comerciales

Acelerómetro de alta resistencia al impacto

DATA LOGGERS

Tri-Axial Shock Data Logger Part of the NOMAD® Family

OM-CP-SHOCK101



- ✓ Built-In Accelerometers
- ✓ Measures Dynamic and Static Acceleration
- ✓ Real-Time Operation
- ✓ Programmable Start Time
- ✓ Compact
- ✓ Reuseable

The OM-CP-SHOCK101 is a battery powered, stand alone 3-axis shock recorder.

The OM-CP-SHOCK101 measures and records shock as the peak acceleration levels over the user-defined interval.


The OM-CP-SHOCK101 is specifically designed for documenting dynamic environments such as moving vehicles, trucks, containers, ships, etc. The device is also valuable in characterizing environments such as production and assembly lines of delicate electronics, IC fabrication, communications and computer components. This compact, portable, easy to use device will measure and record up to 349,525 measurements per channel. The storage medium is non-volatile solid state memory, providing maximum data security even if the battery becomes discharged.

The OM-CP-SHOCK101 makes data retrieval quick and easy. Simply plug it into an empty COM or USB port and our user-friendly software does the rest.

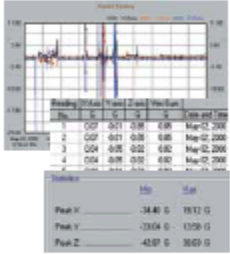
The Windows software converts your PC into a real time strip chart recorder. Data can be printed in graphical or tabular format and can also be exported to a text or Microsoft Excel file.

Specifications
Acceleration Type:
MEMS semiconductor

Acceleration Range (g)	±5	±50	±100	±250
Calibrated Accuracy (g)	±0.2	±1	±2	±4
Acceleration Resolution (g)	0.01	0.05	0.1	0.2



OM-CP-SHOCK101-50 shown smaller than actual size



OM-CP-IFC200 Windows software displays data in graphical or tabular format

Sampling Rate: 1.953 ms/512 Hz (note: data is sampled at this rate, only peak values are written at the end of a recording interval)

Frequency Response: 0 Hz to approx. 400 Hz

Memory: 349,525 readings per channel (1,398,100 total memory)

Recording Interval: 64 Hz to 5 minutes for shock, selectable through software

Real Time Recording: May be used with PC to monitor and record instantaneous acceleration in real time (1 sec or slower reading rate)

Start Modes: Immediate or delay start

Programmable Start Delay: Up to 180 days from PC launch

Password Protection: An optional password may be programmed into the device to restrict access to configuration options. Data may be read out without the password

Calibration: Digital calibration through software

Calibration Date: Automatically recorded within device

Power: 9V lithium or alkaline battery (included)

Battery Life: 7 days typical with lithium battery

Data Format: Date and time stamped, G and mG

Time Accuracy: ±1 minute per month at 20 to 30°C

Computer Interface: USB or serial interface (cable required) 115,200 baud

Software: XP SP3/Vista/7 and 8 (32-bit and 64-bit)

Operating Environment: -20 to 60°C (-4 to 140°F)
0 to 95% RH non-condensing

Dimensions: 89 H x 112 W x 26 mm D (3.5 x 4.4 x 1.0")

Weight: 340 g (12 oz)

Material: Anodized aluminum

To Order	
Model No.	Description
OM-CP-SHOCK101-5	Tri-axial shock data logger, ±5 g range
OM-CP-SHOCK101-50	Tri-axial shock data logger, ±50 g range
OM-CP-SHOCK101-100	Tri-axial shock data logger, ±100 g range
OM-CP-SHOCK101-250	Tri-axial shock data logger, ±250 g range
OM-CP-IFC200	Windows software and 1.8 m (6') USB interface cable
OM-CP-SVP-SYSTEM	FDA 21 CFR part 11 compliant IQ/OQ/PQ secure software validation workbook and software package (unlimited users, license per computer)
OM-CP-BAT103	Replacement 9V lithium battery
OM-CP-SHOCK-MAG-KIT	Magnet mount kit for data logger

Comes complete with 9V lithium battery.
Operator's manual and USB interface cable are included with the OM-CP-IFC200 Windows software and USB interface cable (required to operate the data logger, sold separately).
Ordering Example: OM-CP-SHOCK101-5 tri-axial shock data logger and OM-CP-IFC200 Windows software and USB interface cable.

Módulo de acondicionamiento de señal *datalogger*

Windows Software for the OM-CP-Series Data Loggers and OM-CP-RF Series Wireless Transmitters Part of the NOMAD® Family

OM-CP-IFC110, OM-CP-IFC200,
OM-CP-IFC102, OM-CP-RFC101A,
OM-CP-RFC200A

Starts at
\$99

- ✓ Real Time Alarm Notification
- ✓ Multiple Data Set Graphing
- ✓ Real-Time Recording
- ✓ Data Exporting
- ✓ Statistics Calculations
- ✓ Graphical Cursor
- ✓ Digital Calibration
- ✓ Automatic Time Synchronization
- ✓ Data Annotation

OMEGA'S data recorder software is an easy-to-use, Windows-based software package allowing the user to collect, display and analyze data effortlessly. A variety of powerful tools allow the user to examine, export and print professional looking reports with just the click of a mouse. Our cutting-edge software is designed for the continuous monitoring and alarming of all Omega's OM-CP Series data loggers and OM-CP-RF Series wireless transmitters. The software can collect and display real-time data from any OM-CP Series logger directly connected to the user's PC, a local area network, or even remotely through the use of Omega's OM-CP-RF Series radio frequency transceivers.

Omega's software offers a real-time alarm notification function which lets the user monitor user-defined alarm limits. Omega's software is ideal for applications when notification of out-of-range conditions is required. Alarm messages can be sent in real-time right to your desktop or sent remotely via email or pager.



Windows software provides a time-based graph of data

It offers a straight-forward, user-friendly tool to provide a complete monitoring and reporting system for all of your needs. Let Omega's software make quality control easy for you. The logical evolution from the existing strip chart recorders, Omega's software allows you to efficiently monitor critical systems continuously without having to leave your desk.

Alarm Notification: Omega's software offers a real-time alarm notification function which lets the user monitor user-defined alarm limits. Alarm messages can be sent in real time to your desktop or sent remotely via email or pager. The alarm notification feature is available for the Real Time Chart Recording mode only (the logger must be connected to the PC, and the PC controls the collection of data).

Before starting the recording, the user can select the "Recording Setup" command from the toolbar to set up the alarm limits and type of notification. The real-time alarming feature is available for virtually all of the OM-CP series data loggers.

The alarm messages can be displayed in a window in the software, the software can send an email to a user-specified address, or it can dial a phone number using the PC modem and leave a numeric message code (e.g. "911").

The OM-CP software real-time alarming functionality is not intended to be used as the sole reporting mechanism in mission-critical applications, or in situations where personal safety may be at risk.

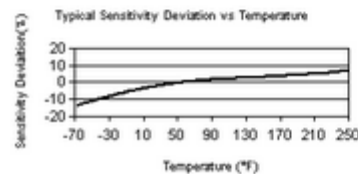
Acelerómetro PCB



Product Specifications

	ENGLISH	SI	
Performance			
Sensitivity ($\pm 10\%$)	100 mV/g	10.2 mV/(m/s ²)	
Measurement Range	± 50 g pk	± 491 m/s ² pk	
Frequency Range ($\pm 5\%$)	0.5 to 10000 Hz	0.5 to 10000 Hz	
Frequency Range ($\pm 10\%$)	0.3 to 12000 Hz	0.3 to 12000 Hz	
Frequency Range (± 3 dB)	0.2 to 20000 Hz	0.2 to 20000 Hz	
Resonant Frequency	≈ 35 kHz	≈ 35 kHz	
Phase Response ($\pm 5^\circ$) (at 70°F [21°C])	2 to 6000 Hz	2 to 6000 Hz	
Broadband Resolution (1)	0.00016 g rms	0.0015 m/s ² rms	[3]
Non-Linearity	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	[1]
Transverse Sensitivity	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	[2]
Environmental			
Overload Limit (Shock)	± 5000 g pk	± 49050 m/s ² pk	
Temperature Range (Operating)	-65 to +200 °F	-53 to +93 °C	[4]
Base Strain Sensitivity	≈ 0.005 g/ μ s	≈ 0.05 (m/s ²)/ μ s	[3]
Electrical			
Excitation Voltage	18 to 30 VDC	18 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	≈ 300 Ohm	≈ 300 Ohm	
Output Bias Voltage	8 to 12 VDC	8 to 12 VDC	
Discharge Time Constant	0.8 to 2.4 sec	0.8 to 2.4 sec	
Settling Time (within 10% of bias)	< 10 sec	< 10 sec	
Spectral Noise (1 Hz)	60 μ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$	588 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[3]
Spectral Noise (10 Hz)	16 μ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$	157 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[3]
Spectral Noise (100 Hz)	5 μ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$	49 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[3]
Spectral Noise (1 kHz)	1.5 μ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$	14.7 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[3]
Physical			
Size - Height	0.73 in	18.5 mm	
Weight	0.070 oz	2.0 gm	[3]
Sensing Element	Ceramic	Ceramic	
Size - Hex	9/32 in	9/32 in	
Sensing Geometry	Shear	Shear	
Housing Material	Titanium	Titanium	
Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic	
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack	
Electrical Connection Position	Top	Top	
Mounting Thread	5-40 Male	5-40 Male	
Mounting Torque	8 to 12 in-lb	90 to 135 N-cm	

All specifications are at room temperature unless otherwise specified.



DAG tarjeta de adquisición de señales



Technical Sales
United States
(800) 531-9285
info@ni.com

Ordering Information | Detailed Specifications | Front/Back Panel Connections
For more resources and downloadables, visit the product page resources tab on ni.com.

Last Revised: 2010-11-03 16:35:13.0

4-Channel, ± 5 V, 51.2 kS/s per Channel, 24-Bit IEPE NI 9234



- 24-bit resolution
- 100 dB dynamic range
- 4 simultaneous analog inputs
- ± 5 V input range
- Antialiasing filter
- TEDS read/write
- Supported in NI CompactDAQ, CompactRIO, and Hi-Speed USB carrier

Overview

The National Instruments 9233 and 9234 are four-channel dynamic signal acquisition modules for making high-accuracy measurements from IEPE sensors. The NI 9233 and 9234 C Series analog input modules deliver 100 dB of dynamic range and incorporate IEPE (2 mA constant current) signal conditioning for accelerometers and microphones. The four input channels simultaneously acquire at rates from 2 to 50 kHz or, with the NI 9234, up to 51.2 kS/s. In addition, the modules include built-in antialiasing filters that automatically adjust to your sampling rate. Compatible with a single-module USB carrier and NI CompactDAQ and CompactRIO hardware, the NI 9233 and 9234 are ideal for a wide variety of mobile/portable applications such as industrial machine condition monitoring and in-vehicle noise, vibration, and harshness testing.

[Back to Top](#)

Comparison Tables

Model	Max Sampling Rate	IEPE	Coupling
NI 9233	50 kS/s	Always enabled (2 mA)	AC coupling
NI 9234	51.2 kS/s	Software selectable (0 or 2 mA)	Software selectable AC/DC coupling

[Back to Top](#)

Application and Technology

Hardware

Each simultaneous signal is buffered, analog prefiltered, and sampled by a 24-bit delta-sigma analog-to-digital converter (ADC) that performs digital filtering with a cutoff frequency that automatically adjusts to your data rate. The NI 9233 and 9234 feature a voltage range of ± 5 V and a dynamic range of more than 100 dB. In addition, the modules include the capability to read and write to transducer electronic data sheet (TEDS) Class 1 smart sensors. The NI 9233 and 9234 provide ± 30 V of overvoltage protection (with respect to chassis ground) for IEPE sensor connections. The NI 9234 has three software-selectable modes of measurement operation: IEPE-on with AC coupling, IEPE-off with AC coupling, and IEPE-off with DC coupling. IEPE excitation and AC coupling are not software-selectable and are always enabled for the NI 9233.

The NI 9233 and 9234 use a method of A/D conversion known as delta-sigma modulation. If, for example, the data rate is 25 kS/s, then each ADC actually samples its input signal at 5.2 MS/s (128 times the data rate) and produces samples that are applied to a digital filter. This filter then expands the data to 24 bits, rejects signal components greater than 12.5 kHz (the Nyquist frequency), and digitally resamples the data at the chosen data rate of 25 kS/s. This combination of analog and digital filtering provides an accurate representation of desirable signals while rejecting out-of-band signals. The built-in antialiasing filters automatically adjust themselves to discriminate between signals based on the frequency range, or bandwidth, of the signal.



Bibliografía

- ◆ MECÁNICA PARA INGENIEROS, DINÁMICA. Russel C. Hibbeler. Ed. Compañía editorial continental. Tercera edición
- ◆ MECÁNICA DE MATERIALES, Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnson, Jr. John T. DeWolf, Ed. McGrawHill, Tercera Edición.
- ◆ MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS, DINÁMICA . Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, David F. Mazurek, Elliot R. Eisenberg. Ed. McGrawHill. Novena Edición.
- ◆ TEORÍA DE VIBRACIONES, APLICACIONES. William T. Thomson. Ed. Prentice Hall.
- ◆ ELECTRÓNICA INDUSTRIAL MODERNA. Timothy J. Maloney. Ed. Pearson Educación. 2006
- ◆ PROBLEMAS RESUELTOS DE CENTROS DE GRAVEDAD Y MOMENTOS DE INERCIA. Manuel Forner Gumbau. Biblioteca de la Universidad Jaume I.

Referencias

- ¹YouCar (2012) Automotive News. Recuperado de <http://www.youcar.tv>
- ²FUNDIBEQ Fundación Iberoamericana para la Gestión de la Calidad (2014). Análisis Modal de Fallos y Efectos A.M.F.E. Recuperado de <http://www.fundibeq.org>
- ³Eroski Consumer. (20202), Clasificación de los autos. Recuperado de www.consumer.es
- ⁴Groover , Mikell P.(1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (p. 790), Pearson Educación
- ⁵Automóvil del presente (2009), *Historia del automóvil*. Recuperado de: <http://www.automovildelpresente.blogspot.mx/>
- ⁶Festo® (2010) Banco de pruebas para Daimler Chrysler de I + D. Recuperado de: <http://www.festo.com>
- ⁷MGA Research ®(2009). MGA Research Vehicle Door Slam Testing, Lifecycle and Durability. Rrecuperado de <http://www.youtube.com>
- ⁸NextFirst Engenieering Technologies®.(2010). *Prueba de Resistencia del pestillo en puertas de automóviles. (Automotive Door Latch Endurance Test Right)*. Recuperado de: <http://www.youtube.com>



⁹General Motors® (2010). *Prueba de impacto bajo condiciones de clima frío para el Chevrolet VoltAGE (Chevrolet Volt Cold Door Slam Test)*. Recuperado de: <http://www.videoatgm.com>

¹⁰Range Rover ® (2012). *Prueba de calidad y durabilidad para Evoque (Quality and Durability Testing for Evoque)*. Recuperado de: <http://www.youtube.com>

¹¹Peralta Roldán, R., Mercado Velazquillo, D. (2013). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para validación de carrocerías*. Tesis de licenciatura no publicada, UNAM, México Distrito Federal.

¹²Tecnología de los plásticos (2011) *Policloropreno (Neopreno)*. Recuperado de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx>

¹³Infomanejo (2013) *La aerodinámica en el automóvil*. Recuperado de: <http://www.infomanejo.com>

¹⁴Audi® (2014) *Eficiencia, Medidas aerodinámicas* Recuperado de: <http://www.audi.es>

¹⁵Hibbeler, R.C (2006). *Mecánica para ingenieros, dinámica, (Cap.15)*. México: Editorial Continental

¹⁶Hibbeler, R.C (2006). *Mecánica para ingenieros, dinámica, (Cap. 19)*. México: Editorial Continental

¹⁷Forner Gumbau, M. (2006). *Problemas resueltos de centros de gravedad y momentos de inercia*. Francia: Biblioteca de la Universidad Jaume I.

¹⁸Thomson, W. T. (1998) *Teoría de vibraciones, aplicaciones*. México: Ed. Prentice Hall

¹⁹Peralta Roldán, R., Mercado Velazquillo, D. (2013). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para validación de carrocerías*. (pp. 48) Tesis de licenciatura no publicada, UNAM, México Distrito Federal.

²⁰Beer & Jonhston (2007). *Mecánica vectorial para Ingenieros "Dinámica"*, México: Mc Graw Hill 8° Edición

Paginas comerciales

www.omega.com

www.pcb.com

www.ni.com