



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA – MECATRÓNICA

DISEÑO DE SISTEMA MECATRÓNICO PARA EL ANÁLISIS DE
DEFORMACIONES EN LÁMINAS

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

RODRÍGUEZ ESPÍNDOLA VÍCTOR HUGO

TUTOR PRINCIPAL

DR. MARCELO LÓPEZ PARRA, UNAM, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. ENERO 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich

Secretario: Vicente Borja Ramírez

Vocal: Marcelo López Parra

1^{er.} Suplente: Víctor Javier González Villela

2^{d o.} Suplente: María del Pilar Corona Lira

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. MARCELO LÓPEZ PARRA

FIRMA

RESUMEN

El Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica (CDMIT) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), diseñó y fabricó para la empresa Ford Motor Company, un “banco de pruebas para validación de carrocerías” con el cuál se evalúa la calidad y durabilidad de los componentes de las puertas de sus vehículos.

En este proyecto de investigación y diseño conceptual se propone desarrollar, como estudio complementario a las pruebas de durabilidad del ciclo de vida de las puertas y bajo ciertas especificaciones establecidas por desarrolladores de tecnología del Centro de Ingeniería Avanzada (CIA), un sistema mecatrónico que mida sin contacto y en tiempo real deformaciones en la lámina que está cerca de las manijas o lámina no rígida.

Usando los métodos propuestos por Ulrich y Eppinger de su libro “Diseño y desarrollo de productos”, se dividió el proyecto en varios sistemas. La investigación del presente documento ha sido enfocada a la actividad de planeación y experimentación de tres conceptos: “sensor ultrasónico y PLC”, “interferometría con láser y visión por computadora” e “inspección con luz estructurada”; además de la selección de uno de ellos como el sistema de medición (SM) encargado de adquirir información de las deformaciones sin tocar la lámina; siendo el SM uno de varios sistemas que requiere el sistema mecatrónico para el análisis de deformaciones híbrido (SMAD/h) para funcionar adecuadamente.

Al realizar el diseño a nivel sistema de esos tres conceptos, se obtuvo que implementar el SM con la “inspección con luz estructurada” es la opción que satisface con la mayoría de las especificaciones, y al realizar los experimentos se encontró que las interacciones fundamentales e incidentales tienen menor o nulo impacto en los resultados que en los otros dos conceptos.

Como trabajo futuro, se puede abordar a profundidad la técnica de inspección con luz estructurada haciendo especial énfasis en obtener la relación entre la deformación de la lámina y los colores que se presentan en la imagen comparada, y pasar del hecho de “obtener información de deformaciones” a “obtener medidas de las deformaciones”.

Palabras clave: Diseño y desarrollo de productos, medición sin contacto, sensor ultrasónico, interferómetro tipo Michelson, luz estructurada.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Marcelo López Parra, por darme la oportunidad de colaborar con usted. Por regalarme su confianza, compromiso y amistad, muchas gracias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y todos los profesores, por la gran labor de encausar a sus alumnos hacia nuevas oportunidades profesionales. Al CCADET, en especial a los integrantes del laboratorio de pulsos cortos Dr. Garduño, Mtro. Gustavo Castro y Mtro. Pablo. Al CDMIT, en especial al Dr. Chong del laboratorio de PLC. Gracias por brindarme nuevos conocimientos, además de su apoyo y confianza al prestarme los materiales e instalaciones para experimentar.

A mis queridas amigas y My Friends, por ser tan únic@s y especiales, en cada un@ veo virtudes que me inspiran a seguir realizando mis sueños. Mtra. Naybi, gracias por darme vigor en días lluviosos. A todos, gracias por su amistad y cariño incondicional.

A todos mis Buddy's, por enseñarme que en la vida hay una infinidad de posibilidades y que el mejor regalo es aquel que puedo obtener al mantenerme en mi ser.

Familia, aun estando lejos sé que están presentes en mi vida. Señorita Robles, por compartir tu tiempo, alegría, esencia y vida conmigo. Papá Ubaldo, mamá Lan, por ser una fuente de amor. A todos, gracias por creer en mí, los amo.

A mi mamá y papá, Lupita y Tino, ustedes son mi inspiración profesional, todo lo que he alcanzado es gracias a los valores que me han inculcado. Gracias por respetar mis decisiones y darme siempre su apoyo y su amor incondicional. Lo que soy es gracias a ustedes. Los amo.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	4
1.2 CONTRIBUCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	7
PLANEACIÓN DEL PROYECTO	10
2.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DEL CLIENTE.....	11
2.2 MISIÓN DEL PROYECTO	16
2.3 ESPECIFICACIONES OBJETIVO DEL PRODUCTO.....	20
DESARROLLO DEL CONCEPTO.....	27
3.1 GENERACIÓN DE CONCEPTOS	28
3.2 SELECCIÓN DE CONCEPTOS	36
DISEÑO A NIVEL SISTEMA. SENSOR ULTRASÓNICO Y PLC	44
4.1 PRUEBA DEL CONCEPTO	46
4.2 ARQUITECTURA PRELIMINAR DEL PROTOTIPO	49
4.3 PLANEACIÓN DEL PROTOTIPO	54
4.4 EXPERIMENTACIÓN.....	56
4.5 RESULTADOS	60
DISEÑO A NIVEL SISTEMA. INTERFEROMETRÍA CON LÁSER Y VISIÓN POR COMPUTADORA.....	63
5.1 PRUEBA DEL CONCEPTO	63
5.2 ARQUITECTURA PRELIMINAR DEL PROTOTIPO	68
5.3 PLANEACIÓN DEL PROTOTIPO.....	71
5.4 EXPERIMENTACIÓN.....	72
5.5 RESULTADOS	72
DISEÑO A NIVEL SISTEMA. INSPECCIÓN CON LUZ ESTRUCTURADA.....	76
6.1 PRUEBA DEL CONCEPTO	76
6.2 ARQUITECTURA PRELIMINAR DEL PROTOTIPO	80
6.3 PLANEACIÓN DEL PROTOTIPO	84
6.4 EXPERIMENTACIÓN.....	84
6.5 RESULTADOS	87

DISCUSIÓN.....	97
7.1 PROPUESTA DE SISTEMA DE MEDICIÓN (SM).	98
7.2 ALCANCES DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS. AUTOEVALUACIÓN	100
7.3 OBSERVACIONES FINALES.....	101
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	102
REFERENCIAS.....	105

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.

CDMIT - Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica.

UNAM - Universidad Nacional Autónoma de México.

CIA - Centro de Ingeniería Avanzada.

SMAD/h - Sistema Mecatrónico para el Análisis de Deformaciones / híbrido.

SM – Sistema de Medición.

SB – Sistema de Brazo robótico.

SCMAD – Sistemas Comerciales de Medición para el Análisis de Deformaciones.

CCADET - Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico.

C.U. – Ciudad Universitaria.

Subj. – Subjetiva.

Imp. – Importancia.

No. – Número.

S – Segundos.

m/m – metro entre metro.

Rad – Radianes.

Pa – Pascales.

m – Metros.

°C – Grados centígrados.

dB – Decibeles.

US\$ - Dólar americano.

N.O. – No se ocupa.

N.I. – No divulgan información.

M.H. – Medición humana realizada.

PC – Computadora Personal.

PLC – Controlador Lógico Programable.

CA – Corriente Alterna.

CD – Corriente Directa.

RF – Radio Frecuencia.

He-Ne – Helio-Neón.

OM – Objetivo de Microscopio.

L# – Lente número #.

DH – Divisor de Haz.

λ – Longitud de onda.

nm – Nanómetros.

EP – Espejo Plano.

SupM – Superficie a Medir.

PO – Plano Opaco.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica (CDMIT) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), diseñó y fabricó un “banco de pruebas para validación de carrocerías” figura [1.1] y figura [1.2] para la empresa Ford Motor Company, bajo las especificaciones y normas de calidad establecidas por la firma mediante un manual de procedimientos. Esta empresa, como parte de su estrategia tecnológica [1], decidió invertir en el diseño y desarrollo del banco de pruebas, con el cual se evalúa de forma rigurosa la calidad y durabilidad de los componentes estructurales de las puertas de sus nuevos modelos de automóviles y camionetas, mediante pruebas confiables.



Figura [1.1] tomada de [1]. Distribución del banco de pruebas.

El banco de pruebas valora la durabilidad de la apertura y cierre de puertas mediante el conteo de ciclos para diferentes casos establecidos en el manual. Un ciclo es igual a abrir y cerrar la puerta, poner y quitar los seguros. El procedimiento es usado para detectar defectos de durabilidad que pueden ocurrir durante operaciones normales y condiciones ambientales (temperatura y humedad), condiciones usadas por el cliente, y el cierre con golpe del sistema.

En esta tesis, que corresponde a un proyecto de investigación y diseño conceptual, se propone un estudio complementario a las pruebas de durabilidad del ciclo de vida de las puertas: conocer la deformación que se presenta en la lámina que está cerca de las manijas, debido a cargas aplicadas; cumpliendo con las especificaciones establecidas por desarrolladores de tecnología del Centro de Ingeniería Avanzada (CIA) de la UNAM, que colaboran con Ford.



Figura [1.2] tomada de [2]. “KLT Bench – Ford” en el edificio del CIA, FI, CU, UNAM.

El objetivo final del proyecto será desarrollar un sistema mecatrónico que mida sin contacto y en tiempo real, deformaciones en láminas no rígidas. Para tales fines, se utilizarán aparatos que generen y registren ondas electromagnéticas como son láser y espectro visible. Además se integrará esa tecnología a un brazo robótico en cierta configuración que signifique:

- Una mejora incremental a los productos ya existentes.
- Que el proceso de medición sea en tiempo real y con gran precisión.
- Que no exista contacto con la lámina.

El prototipo final se llamará sistema mecatrónico para el análisis de deformaciones / híbrido (SMAD/h). En la figura [1.3] “SMAD/h” observamos la descripción funcional del prototipo sin implicar un principio específico de solución física.

La investigación y diseño conceptual que se presenta en esta tesis, se basa en los métodos propuestos por K. T. Ulrich y D. S. Eppinger de su libro “*Diseño y desarrollo de productos*”, ya que los planteamientos para resolver un problema de desarrollo de un producto son tratados como una guía, y no como teoría rígida, para un amplia variedad de objetos [3]. En mi experiencia, el punto fuerte de los métodos que presentan los autores es la mezcla de conocimiento sobre ingeniería, diseño industrial y administración de empresas, para mostrar la visión e impacto que puede tener cada miembro de un grupo de trabajo multidisciplinario de desarrollo de productos.

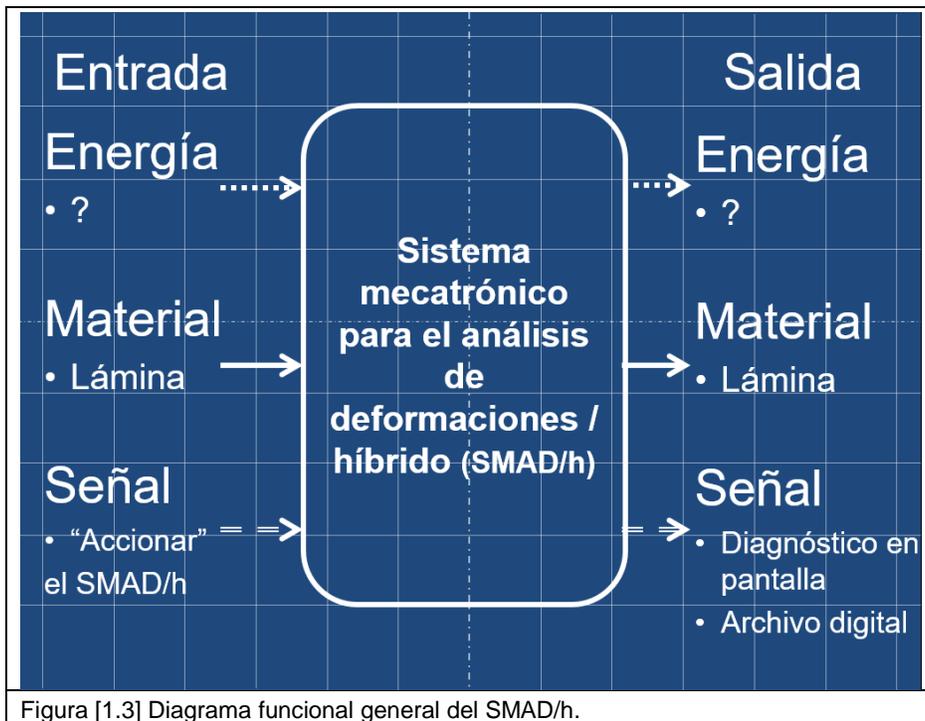


Figura [1.3] Diagrama funcional general del SMAD/h.

Esta tesis solo comprende las tres primeras fases de la metodología del "Diseño y desarrollo de productos", por lo que el presente trabajo se enfoca a la actividad de planeación, experimentación y selección de uno de tres conceptos ("sensor ultrasónico y PLC", "interferometría con láser y visión por computadora" e "inspección con luz estructurada") como el sistema de medición (SM) encargado de adquirir información de las deformaciones. Una vez seleccionado el concepto final, se realizó la discusión, conclusión y trabajo a futuro.

1.1 ANTECEDENTES

Actualmente existen diferentes sistemas comerciales de medición para el análisis de deformaciones (SCMAD) en láminas rígidas de vehículos, como son:

Galgas de nivel

Sistema de medición por comparación formado por reglas, varillas, ganchos de fijación al vehículo, miras o agujas centrales; cuyo campo de uso es para estructuras de automóviles y camiones.

El sistema funciona de la siguiente manera: se sitúan las varillas con sus reglas a lo largo de los bajos del vehículo. La altura de cada varilla es definida por el manual del fabricante o plano de referencia. El usuario se coloca enfrente del vehículo y observa cada una de las reglas, estableciendo el diagnóstico de la deformación. Las miras o agujas centrales deben estar alineadas y las reglas deben estar situadas en el mismo plano de referencia [4].

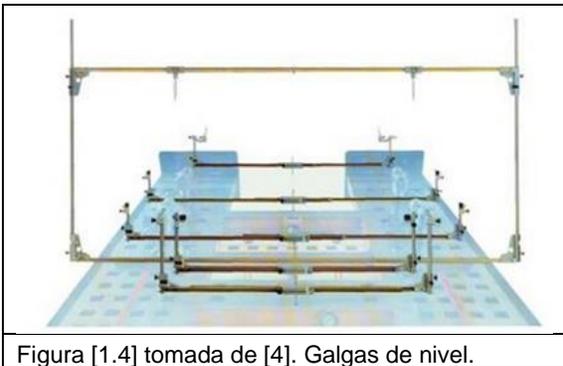


Figura [1.4] tomada de [4]. Galgas de nivel.

Un automóvil grande, por ejemplo un Shelby convertible 2013, tiene las siguientes medidas [5]: alto 1.42 [m], ancho 1.877 [m], largo 4.78 [m]. Por lo que este sistema de reglas tiene que ser mayor a esta medida, como podemos ver en la figura [1.4] galgas de nivel.

Sistemas de medición electrónicos

Estos sistemas llevan computadoras y software para gestionar la información de los puntos de control estructurales del chasis según tres coordenadas: longitudinal, transversal y altura. La mayoría de estos aparatos están formados por una fuente de ondas electromagnéticas que manda una onda que incide sobre la escala colocada en el plano estructural a medir, determinando la posición sobre el plano en medidas reales guardadas en un software. Para las galgas de nivel, una variante es midiendo la desalineación utilizando equipo óptico o de rayo láser. Algunos modelos comerciales de sistemas de medición electrónicos son:

Global Scan (escáner)

GlobalScan (figura [1.5] lado izquierdo) de la compañía Globaljig International, permite ver gráficamente en cada vehículo la comparación de la medición de corriente con las especificaciones exactas del vehículo y más puntos de medición en tiempo real, proporcionando actualizaciones continuas a lo largo de la reparación [6]. Sus componentes son: Computadora, software, escáner, estación de trabajo, detectores o blancos reflectantes, puente “McPherson”.



Figura [1.5] tomada de [6]. GlobalScan y blancos reflectantes.

El escáner que es compacto y fácil de maniobrar, se coloca debajo del vehículo, lo que permite al sistema determinar y mostrar inmediatamente los valores de video en las tres dimensiones de cada punto detectado.

Los blancos reflectantes intercambiables (figura [1.4] lado derecho), llamados genéricamente "detectores", que se diferencian sólo por la longitud del tallo y están equipados con códigos de barra especiales que permiten la reflexión de los rayos emitidos desde el escáner y su identificación con el mismo. Todos numerados desde el No. 1 al No. 45, para mayor comodidad del operador.

El software, proporciona una base de datos con las medidas de varios vehículos, con un archivo fotográfico actualizado, por lo que es posible visualizar en el monitor la imagen de cada punto del vehículo.

Touch portable (brazo medidor y punteros)

El equipo Touch portable de la compañía Spanesi, es un sistema dirigido por una laptop, que permite realizar el control de varias cotas del vehículo, a través de diferentes puntos de la carrocería. Su campo de uso es para estructuras de automóviles, motocicletas y llantas. Está compuesto (figura [1.6] lado izquierdo) de: brazo medidor, sensores detectores de posición, prolongaciones, punteros, carro de trabajo con ruedas, laptop, batería, funda protectora, software para automóviles, software para alineación de ruedas, software para motocicletas.



Figura [1.6] tomada de [8] y [7]. Sistema Touch portable y comprobación de la alineación de las ruedas.

El brazo medidor dispone de cinco sensores de ángulos para detectar la posición exacta del brazo. Posee cinco articulaciones con las que consigue alcanzar cualquier punto de medición de la carrocería. Dispone de tres punteros de diferente longitud, e insertables en 3 posiciones diferentes. El brazo se sitúa encima de la guía puente, calibrada con anterioridad, y sus desplazamientos longitudinal, transversal y en altura sobre los puntos estructurales del vehículo, se detectan mediante los tres sensores de ángulo. Estos sensores determinan la posición del brazo en cualquier momento, y esta información es analizada por el software, el cual compara la medición de estos puntos con los que tiene en memoria, diagnosticando si existe desplazamiento. El ordenador realiza los cálculos para presentar en pantalla las desviaciones de la carrocería. La impresora en color permite presentar en papel los resultados obtenidos en la medición [7].

Las medidas del sistema son [8]: alto 1.325 [m], ancho 4 [m], brazo 1.7 [m], si al brazo se le coloca la prolongación su largo aumenta a 5.2 [m].

1.2 CONTRIBUCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

A pesar de la existencia de diferentes SCMAD, en todos los casos anteriores, los sistemas solo miden láminas rígidas y se requiere colocar escalas, guías, reglas o algún aditamento que tenga contacto con la carrocería.

Una contribución del presente trabajo de investigación y diseño conceptual es la propuesta de un sistema que presentará las siguientes ventajas de diseño y operación:

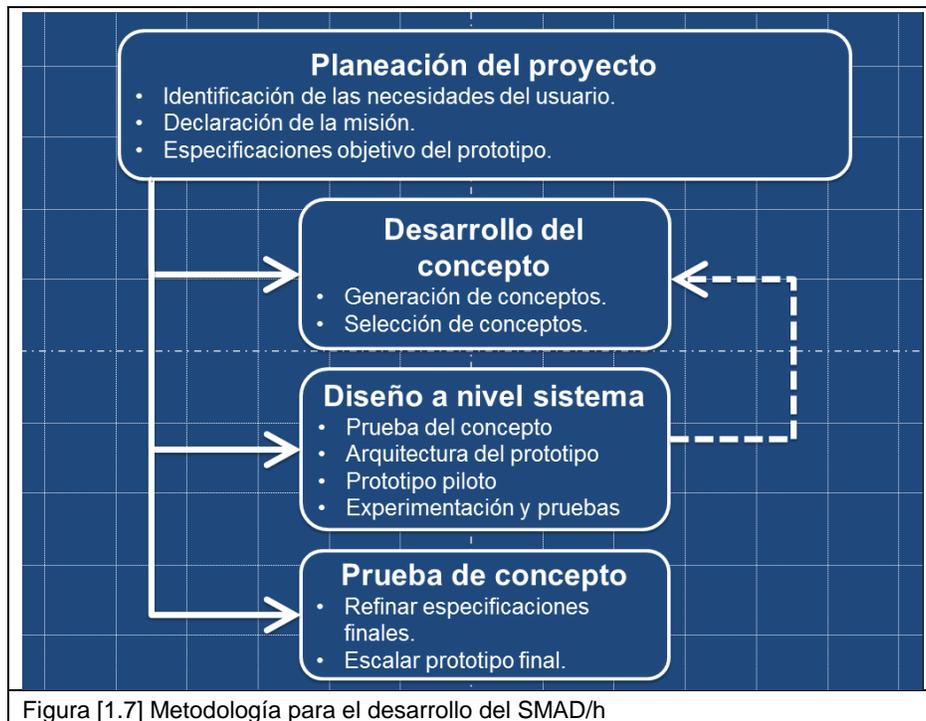
- Se integrará el SMAD/h en cierta configuración que acelerará el proceso de medición y lo hará más preciso, lo realizará sin contacto con la superficie y se adaptará a láminas no rígidas.
- Se usará en conjunto al banco de pruebas o de manera independiente.
- Estará conformado de pocas piezas para un mantenimiento sencillo.
- Operará bajo condiciones ambientales extremas: Entre 100°C y -40°C de temperatura, entre 30% y 40% de humedad relativa.
- Identificará y determinará la deformación y comunicará al usuario las medidas obtenidas.
- La flexibilidad que tendrá el aparato será adaptarse a la medición de deformaciones en puertas de automóviles.

Por otra parte se realiza un análisis que compara las ventajas y desventajas de los resultados experimentales de los tres conceptos propuestos para el SM. Esto con la finalidad de obtener un concepto que cumpla con la mayoría de las ventajas de diseño y operación.

Por último una serie de conjeturas que podrían minimizar las interacciones fundamentales e incidentales del concepto elegido como SM.

La metodología planeada para el desarrollo total del SMAD/h se divide en cuatro fases, y entre la fase 2 y 3 tiene una retroalimentación, como se muestra en la figura [1.7], de tal manera que el trabajo de tesis se desarrolla de la siguiente manera:

El objetivo de la primera fase “planeación del proyecto”, capítulo 2, consiste en recopilar datos del usuario acerca de sus necesidades a satisfacer. Las necesidades deben quedar claras ya que son la base para generar “las especificaciones objetivo del producto”, que son la descripción precisa y medible de lo que el producto tiene que hacer en términos técnicos. “La misión del proyecto” son aquellas declaraciones que: describen la función básica del producto; describen la propuesta de valor, que son las razones por las que el cliente compraría el producto; describen algunas suposiciones, las cuales ayudan a mantener en un campo manejable el proyecto.



El objetivo de la segunda fase “desarrollo del concepto”, capítulo 3, es generar diferentes descripciones aproximadas de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto, cuyo fin es satisfacer las necesidades del cliente. Una vez que se han averiguado la mayoría de conceptos, se hace “la selección de conceptos” que se estudiarán a detalle.

Sin embargo en la segunda fase, al analizar el proyecto como “caja negra” (figura [1.8]), la cual está descompuesta en subfunciones para crear una descripción más específica de lo que los elementos del SMAD/h podrían hacer, sin implicar un principio específico de trabajo tecnológico, me doy cuenta que el proyecto es muy amplio. Por lo tanto enfoco mi estudio y tiempo al sistema de medición (SM). El SM será la tecnología con que analice las deformaciones. En mi experiencia éste debe de ser punto de partida, ya que el éxito que requiero alcanzar depende en gran medida del análisis de las deformaciones sin tocar la lámina.

El objetivo de la tercera fase “diseño a nivel sistema”, comienza con una “prueba del concepto” por parte del cliente con la finalidad de verificar que sus necesidades estén cubiertas de manera teórica. Para verificar de manera práctica, se desarrolla la “arquitectura del prototipo”, que consiste en definir los elementos físicos de construcción del producto en términos de lo que hacen y cómo interactúan entre ellos. El siguiente paso es desarrollar un “prototipo piloto” que será sujeto a “experimentación y pruebas” para demostrar que el diseño es funcional y cumple con las especificaciones.

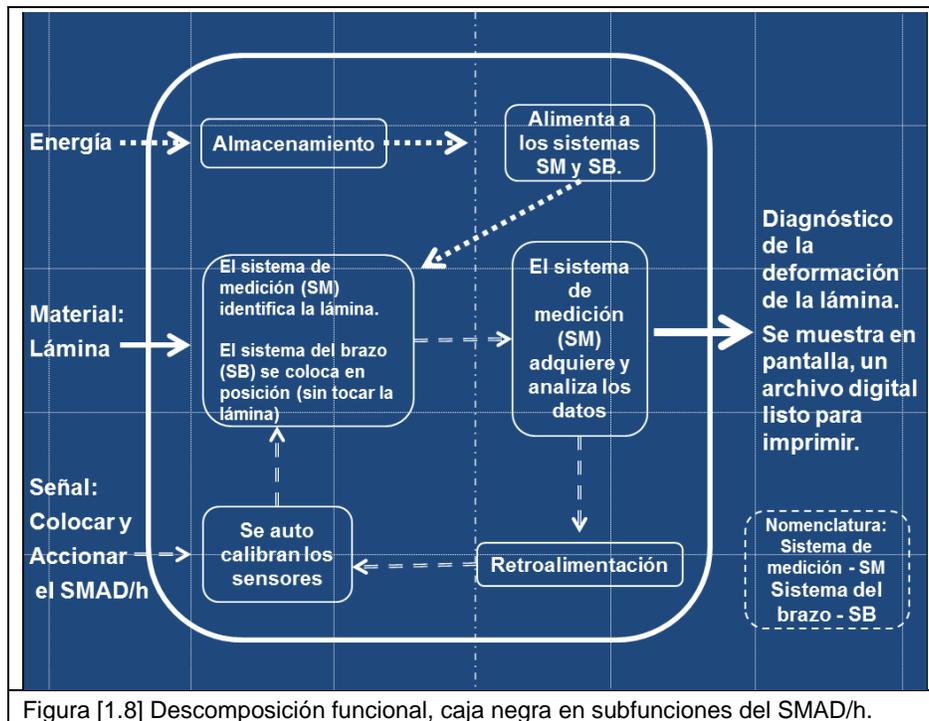


Figura [1.8] Descomposición funcional, caja negra en subfunciones del SMAD/h.

En el capítulo 4 se desarrolla el diseño a nivel sistema del concepto “sensor ultrasónico y PLC”, en el capítulo 5 se desarrolla el diseño a nivel sistema del concepto “interferometría con láser y visión por computadora”, en el capítulo 6 se desarrolla el diseño a nivel sistema del concepto “inspección con luz estructurada”, realizando para cada sistema la prueba del concepto, arquitectura del prototipo, prototipo piloto, experimentación y pruebas.

Una vez generado y seleccionado el concepto final, el objetivo de la cuarta fase “prueba de concepto” es refinar las especificaciones y realizar un prototipo final.

En el capítulo 7 se realiza la discusión sobre la propuesta del SM, con el fin de resumir el por qué se eligió el concepto, los alcances de los objetivos planteados y observaciones para realizar un prototipo final.

Por último, en el capítulo 8 se exponen las conclusiones y trabajo a futuro.

CAPÍTULO 2

PLANEACIÓN DEL PROYECTO

Un paso importante en el desarrollo del proyecto es entender las necesidades del cliente y comunicarlas de forma efectiva al desarrollador. El resultado de este paso es un conjunto de enunciados cuidadosamente contruidos de las necesidades del cliente, organizados en una lista jerárquica con valores de importancia.

Las necesidades del cliente son independientes a los productos que se desarrollan, por tal motivo, si el producto garantiza resolver las necesidades explícitas y ofrece beneficios que el cliente no haya percibido, llamadas necesidades ocultas [3], el producto será un éxito seguro. Para un proyecto nuevo, un indicador real de que las necesidades del cliente han sido identificadas correctamente es si a los clientes les gustan los primeros prototipos del equipo.

Un método para identificar las necesidades es desarrollar un medio de comunicación directo entre clientes y el desarrollador del producto con el fin de establecer un entendimiento común y así generar: la interpretación correcta de las necesidades del cliente, una lista jerárquica de las necesidades, la misión del proyecto, establecer especificaciones del producto, etc. Los métodos usuales para recopilar datos son: entrevistas, observar el producto en uso, encuestas escritas, entre otras.

Una vez establecidas las necesidades, se identifican las oportunidades de desarrollo del producto con el fin de generar la propuesta de valor; se realiza la estrategia competitiva, segmentación de mercados y plataformas de producto, con la finalidad de investigar productos existentes para desarrollar tecnología competitiva, tener claros los mercados y describir el producto; se asignan recursos de personal, dinero, instalaciones y equipo, así como suposiciones y restricciones para mantener el proyecto en un campo manejable; por último, todos los puntos anteriores finalizan con la declaración de la misión.

2.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DEL CLIENTE

A continuación se presenta un método de cuatro pasos [3] para identificar las necesidades del cliente:

Paso 1. Recopilar datos sin procesar de los clientes (enunciados del cliente)

El objetivo es obtener información proporcionada directamente por los clientes acerca de sus necesidades a satisfacer, en otras palabras, enfocarse en la tarea donde el producto se aplicará, que es diferente de convencer a los clientes de lo que necesitan. Para este punto se realizó una entrevista a un desarrollador de tecnología del CIA de la UNAM, que colabora con Ford y trabajó en el “banco de pruebas para validación de carrocerías”.

Enunciados del cliente	
Pregunta	Declaraciones del cliente
	Mido las deformaciones de la lámina del vehículo.
¿Para qué usa los sistemas de medición (SM)?	Me interesa conocer la deformación de la lámina que está cerca de las manijas, que es el lugar afectado al hacer uso de las puertas. Requiero saber cómo se comporta la lámina al abrir y cerrar la puerta.
Actualmente ¿Qué sistema de medición ocupa?	Uso galgas, pero tengo el inconveniente que están en contacto con la puerta.
	Es un banco de pruebas donde realizo las mediciones.
¿Cómo es tu ambiente de trabajo?	Son lugares con mucho ruido ambiente. Existen bancos de pruebas donde se pueden modificar las condiciones de temperatura y humedad, en rangos extremos.
¿Por qué usa ese tipo de sistema de medición?	Las galgas se han implementado porque su uso y servicio es fácil.
¿Qué mejoras haría al sistema de medición?	Haría la medición sin tocar la lámina del automóvil.

Paso 2. Interpretar los datos sin procesar

Las necesidades que se recolectaron, requieren ser transcritas de tal forma que el entendimiento entre el cliente y el desarrollador sea total, la interpretación escrita de los datos tiene las siguientes reglas para lograr la traducción deseada:

- Expresar la necesidad en términos de lo que el producto tiene que hacer, no en términos de cómo puede hacerlo.
- Expresar la necesidad tan específicamente como la información sin procesar.
- Usar enunciados positivos, no negativos, a menos que sea más fácil de entender en forma negativa.
- Expresar la necesidad como atributo del producto.
- Evitar las palabras debe y debería.

Interpretación de los enunciados del cliente

Pregunta	Declaración del cliente	Interpretación del cliente	Enunciado de necesidad
¿Para qué usa los SM?	Mido las deformaciones de la lámina del vehículo.	Requiere un sistema de medición para el análisis de la deformación de láminas de vehículos.	Uno de los usos del SMAD/h, es para láminas de vehículos.
	Me interesa conocer la deformación de la lámina que está cerca de las manijas, que es el lugar afectado al hacer uso de las puertas.	Medición de zonas cerca de las manijas donde la lámina es propensa a deformaciones por uso.	Uno de los usos del SMAD/h es en láminas, cerca de las manijas, propensas a deformaciones.
	Requiero saber cómo se comporta la lámina al abrir y cerrar la puerta.	Medición en tiempo real.	El SMAD/h mide la deformación en tiempo real.
Actualmente ¿Qué SM ocupa?	Uso galgas, pero tengo el inconveniente que están en contacto con la puerta.	Medición sin contacto.	El SMAD/h mide la deformación sin contacto.
¿Cómo es tu ambiente de trabajo?	Es un banco de pruebas donde realizo las mediciones.	El sistema se puede instalar al banco de pruebas.	El SMAD/h es compatible a diferentes bancos de pruebas de automóviles.
	Son lugares con mucho ruido ambiente.	La medición se puede ver afectada por señales externas.	Las mediciones del SMAD/h no se ven afectadas por

			interferencia y son de alta precisión.
	Existen bancos de pruebas donde se pueden modificar las condiciones de temperatura y humedad, en rangos extremos.	Parámetros externos tales como rangos de temperatura (-40 a 100°C) y humedad relativa (30 a 40%).	El SMAD/h soporta parámetros externos: temperatura entre -40°C a 100°C y de 30 a 40% de humedad relativa.
¿Por qué usa ese tipo de SM?	Las galgas se han implementado porque su uso y servicio es fácil.	Sistema robusto. Económicamente viable.	El uso y servicio de mantenimiento del SMAD/h es sencillo. El costo del SMAD/h es conveniente.
¿Qué mejoras haría al SM?	Haría la medición sin tocar la lámina del automóvil.	Medición sin contacto.	El SMAD/h mide la deformación sin contacto.

Paso 3. Organización jerárquica de las necesidades del cliente

Los enunciados del cliente se organizan en una lista jerárquica formada por necesidades primarias, secundarias y de ser necesario terciarias. Las necesidades primarias son las más generales, mientras que las secundarias y terciarias son necesidades cada vez más detalladas.

Jerarquía de necesidades		
Primarias	Secundarias	Terciarias
Desarrollo del sistema mecatrónico para el análisis de deformaciones / híbrido (SMAD/h).	El uso central del SMAD/h es en láminas propensas a deformaciones.	Uno de los usos del SMAD/h, es para láminas de vehículos.
El SMAD/h mide la deformación en tiempo real.	El tiempo de adquisición de datos es menor que el de los SCMAD en láminas rígidas.	
	El SMAD/h identifica y determina la deformación.	Las medidas obtenidas son de alta precisión.
Comunica al usuario las medidas obtenidas.		Minimiza riesgos de medición equivocada por fallas humanas.
El SMAD/h mide la deformación sin contacto.	El SMAD/h ocupa tecnología híbrida.	
El SMAD/h es compatible a diferentes bancos de pruebas de automóviles.		Podría ser un sistema portátil.
El SMAD/h soporta parámetros externos.	Temperatura.	Entre -40°C a 100°C
	Humedad relativa.	Entre 30 a 40%
	Mínima interferencia por ruido ambiente.	
Sistema robusto.	De uso fácil.	La calibración es fácil.
	El servicio de mantenimiento es sencillo.	
Económicamente viable.	El costo de mantenimiento es conveniente.	
	El costo de implementación es bajo.	

Paso 4. Reflexionar sobre los resultados

Los pasos anteriores tienen la finalidad de identificar las necesidades existentes, sin embargo este paso se realiza para garantizar que el desarrollador ha identificado todas las necesidades y hacer una realimentación con base en ellas.

- ¿He interactuado con todos los clientes del mercado objetivo?

Sí, he interactuado con desarrolladores de tecnología (tutores de tesis), que están en contacto con la empresa Ford Motor Company. Una vez que se tenga un prototipo que cumpla con los requerimientos del sistema se hará la propuesta al CIA-Ford.

- ¿Soy capaz de ver más allá de las necesidades relacionadas con los productos existentes para captar las necesidades ocultas del cliente objetivo?

Sí, cada vez que investigo sobre aparatos de medición a distancia recabo ideas que se pueden agregar al proyecto. Gracias a la realimentación de mi tutor, se agregaron varias funciones extra al SMAD/h.

- ¿Hay aspectos no definidos que exploraría en entrevistas de seguimiento?

Sí, en pasos posteriores requiero información de los resultados que entregan las galgas; también contestar las siguientes preguntas: ¿Qué tan eficaz es el uso de las galgas en las mediciones?, ¿Cuál es el costo de otros sistemas de medición electrónica que podrían implementarse?, etc.

- ¿Cómo podría mejorar el proceso en futuros trabajos?

En trabajos anteriores no había seguido un método de diseño estructurado, sin embargo en éste proceso de diseño al seguir este método, los objetivos del proyecto son claros y puedo ver los alcances y limitaciones. Para trabajos futuros requiero un equipo de trabajo para que haya más ideas de las que yo solo puedo desarrollar.

2.2 MISIÓN DEL PROYECTO

Para elaborar la misión del proyecto o actividad de planeación del producto se debe tener claro la oportunidad particular del mercado del producto, la meta del negocio, las restricciones, suposiciones clave y objetivos generales para el proyecto; sin embargo no se especifica de una forma precisa cómo es que se va a lograr.

Para desarrollar un plan de producto y enunciados de misión de proyecto, se hizo un proceso de cuatro pasos [3]:

Paso 1. Identificar oportunidades de desarrollo del producto

La identificación de oportunidades para desarrollar un producto está estrechamente relacionada con la actividad de identificar las necesidades del cliente.

Actualmente existen sistemas de medición electrónicos (ópticos, láser, escáner), los cuales no tocan el material, pero requieren de escalas colocadas en el plano estructural a medir.

La innovación será diseñar un SM que signifique una mejora incremental a los sistemas ya existentes en una nueva configuración o combinación, con el fin de acelerar el proceso de medición, lograr mayor precisión y que no exista ningún contacto con la lámina; su operación podrá ser bajo condiciones de temperatura y humedad relativa extremas, y mínima interferencia por ruido ambiente; todas ellas son características fundamentales para el objetivo total del proyecto.

Paso 2. Evaluar y seleccionar el proyecto más prometedor

Las perspectivas básicas que son útiles al evaluar y seleccionar nuevos productos son:

Estrategia competitiva

Liderazgo tecnológico. Destaca la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías. En esta parte del proyecto he investigado SCMAD en láminas rígidas de vehículos, de los cuales tomo ideas de las tecnologías que ocupan para realizar las mediciones, con el propósito de tener diferentes ideas de cómo se ha resuelto la necesidad de medir la estructura de vehículos (material rígido). La idea final del proyecto es integrar varias tecnologías de medición de los sistemas comerciales u algún principio tecnológico en cierta configuración que acelere el proceso de medición, lo haga más preciso, sin contacto con la superficie y se adapte a láminas no rígidas.

Concentrarse en el cliente. Las necesidades formales del cliente, que requieren mayor atención por parte del desarrollador son:

- Sistema de medición sin contacto y en tiempo real.
- Económicamente viable. Compatible a banco de pruebas.
- Sistema robusto. Uso y servicio sencillo. Mínima interferencia por ruido
- Condiciones ambientales extremas de temperatura y humedad.

Segmentación de mercados

Dividir un mercado en segmentos permite a una empresa considerar las acciones de la competencia, así como la fuerza de los productos existentes con respecto a cada grupo bien definido de clientes. El cliente principal del proyecto (mercado primario) es para el fabricante de vehículos Ford Motor Company, sin embargo puede ser utilizado por otros fabricantes como: Volkswagen, General Motor, Audi, etc. Otros grupos de clientes (mercados secundarios) que les podría interesar el proyecto son: peritos oficiales (nombrados por el juez o autoridad) y los peritos de parte (nombrados por particulares) [9], talleres mecánicos, centros de investigación de materiales; por otra parte, con profesionales de la construcción de estructuras como edificios para industrias, viviendas, obras públicas, etc.

En el caso de los fabricantes de vehículos y talleres mecánicos, el sistema que desarrollaré podría incorporarse a alguna estructura fija, lo que da apertura a que las dimensiones del sistema puedan variar. En el caso de los peritos, el sistema tendría que ser portátil. Los SM electrónicos actuales, son fijos y están colocados en los talleres de pruebas, lo que me da la posibilidad de abrir terreno en sistemas portátiles.

Plataformas de productos

La decisión clave en esta etapa es si el proyecto desarrollará un producto derivado de una plataforma existente o desarrollará una plataforma enteramente nueva. Las decisiones acerca de plataformas de productos están relacionadas en forma estrecha al trabajo de desarrollo tecnológico de la empresa y en decisiones sobre qué tecnologías emplear en nuevos productos. Éste proyecto comprenderá un gran esfuerzo en su desarrollo, ya que es una nueva plataforma de productos que crea una nueva familia de sistemas mecatrónicos para el análisis de la deformación en láminas no rígidas, utilizando tecnología híbrida. Como se ha mencionado, para el desarrollo tecnológico, se integrarán varias tecnologías en una nueva configuración con el fin de medir deformaciones en láminas sin contacto y en tiempo real.

Paso 3. Asignar recursos y plantear tiempos

Considerar la disponibilidad de recursos de desarrollo. Enfrentar la realidad de sólo contar con recursos limitados: horas–hombre; dinero, instalaciones y equipo para la construcción rápida de prototipos; talleres de pruebas; líneas de producción piloto; etc.

Hasta la “prueba del concepto”, que es la primera etapa del “diseño a nivel sistema”, el desarrollo solo está a mi cargo, lo que repercute en el recurso limitado del tiempo. En esta primera parte del diseño del proyecto mis tareas principales son: coleccionar información sobre las necesidades del cliente, reunir información de la tecnología existente, crear la misión del proyecto, originar ideas creativas para el desarrollo y selección de conceptos con la finalidad de elegir la mejor solución a las necesidades.

La segunda parte del diseño consiste en verificar que los modelos teóricos son fieles a los resultados de las mediciones de los prototipos de los sistemas de medición, además para demostrar que el diseño es funcional y cumple con las especificaciones dadas. De modo que agradezco el apoyo de los siguientes laboratorios y talleres de prueba dentro de la UNAM, donde desarrollaré pruebas en general:

- Centro de ciencias aplicadas y desarrollo tecnológico (CCADET), campus C.U.
- Centro de diseño mecánico e innovación tecnológica (CDMIT), campus C.U.

Paso 4. Declaración de la misión o reporte de diseño

Cada uno de los siguientes puntos descritos, son bases que sustentan el enunciado de la misión:

- Descripción del producto. Identifica la función básica del producto pero evita implicar un concepto específico. Es la visión del producto.
- Propuesta de valor. Muestra las razones por las que el cliente obtendría el producto.
- Objetivos de negocio. Objetivos que incluyen metas para tiempo, costo y calidad.
- Mercado primario. Identifica el mercado objetivo para el producto.
- Mercados secundarios. Otros posibles mercados para el producto.
- Suposiciones y restricciones. Ayudan a mantener un campo manejable al proyecto.
- Involucrados. Es una lista de los involucrados que son influenciados por el producto. La lista se inicia con el usuario final, además de los clientes dentro de la empresa.

Enunciado de la declaración de la misión

Declaración de la misión	Diseño de un sistema mecatrónico para el análisis de deformaciones en láminas no rígidas, utilizando tecnología híbrida (SMAD/h).
Descripción del producto	<p><i>Medición sin contacto.</i></p> <p><i>Medición en tiempo real.</i></p> <p>Uno de sus usos es para láminas de vehículos.</p> <p>Identifica y determina la deformación.</p> <p>Comunica al usuario las medidas obtenidas.</p>
Propuesta de valor	<p>El tiempo de adquisición de datos es menor que el de los SCMAD.</p> <p>Las medidas obtenidas son de alta precisión.</p> <p>Minimiza riesgos de medición equivocada por fallas humanas.</p> <p>No se requiere colocar escalas, guías, reglas, en la carrocería.</p> <p>Compatible con diferentes bancos de pruebas de automóviles.</p> <p>Soporta condiciones de temperatura entre -40°C y 100°C</p> <p>Soporta condiciones de humedad relativa entre 30 a 40%</p> <p>Mínima interferencia por ruido ambiente.</p> <p>Sistema robusto. Uso, calibración y mantenimiento sencillo.</p> <p>El costo de mantenimiento e implementación es conveniente.</p>
Objetivos de negocio	Ser líder en sistemas mecatrónicos para el análisis de deformaciones.
Mercado primario	Captar a los fabricantes de automóviles.
Mercado secundario	<p>Peritos oficiales o de parte.</p> <p>Talleres mecánicos.</p> <p>Centros de investigación de materiales</p> <p>Profesionales de la construcción de estructuras como edificios para industrias, viviendas, obras públicas, etc.</p>
Suposiciones y restricciones	<p>Plataforma de nuevo producto.</p> <p>Tecnología híbrida para el sistema de medición (SM).</p> <p>Procesamiento de información (identifica y determina la deformación).</p> <p>Tamaño del producto (sistema portátil).</p> <p>Manufactura (económicamente viable)</p> <p>Sistema robusto (calibración y mantenimiento sencillo; pocas piezas).</p> <p>Condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa).</p> <p>Mínima interferencia por ruido ambiente.</p> <p>Limitantes: capital humano y monetario; tiempo de experimentación y fabricación; tecnología para fabricar el producto</p>
Involucrados	<p>Compradores y usuarios.</p> <p>Operaciones de investigación, diseño, desarrollo tecnológico, manufactura, servicio.</p>

2.3 ESPECIFICACIONES OBJETIVO DEL PRODUCTO

Al identificar las necesidades del consumidor, solo se expusieron los enunciados de las necesidades del cliente, las cuales son frases que expresan en "lenguaje del cliente" sus problemas o puntos de interés, sin embargo dejan mucho margen para interpretación subjetiva y sirven de poco respecto a cómo diseñar y construir el producto.

En este capítulo se establecen un conjunto de especificaciones que describen, con detalles precisos y medibles, lo que el producto tiene que "hacer" para satisfacer las necesidades, sin embargo las especificaciones del producto no indican "cómo" o "con qué" se cumplirán las necesidades. Una especificación consiste en:

- Una métrica. Es una descripción precisa y medible de un proceso o pieza del producto.
- El valor de la métrica. Un número, rango o desigualdad, marcado con sus unidades.

En un proyecto de alta tecnología existen dos etapas en las cuales se establecen especificaciones:

- Especificaciones objetivo. Se establecen una vez que se identificaron las necesidades del cliente y tienen el objetivo de cubrir o rebasar todas las necesidades, por lo tanto estas especificaciones son "la meta ideal" o "aspiraciones preliminares del grupo". Sin embargo, al ser establecidas sin tomar en cuenta las restricciones tecnológicas para fabricar el producto y los costos de producción, éstas se deberán refinar.
- Especificaciones finales. Una vez seleccionado el concepto del producto, se establecen las especificaciones finales eligiendo cuidadosamente las características deseables del producto, al mismo tiempo que se evalúan las restricciones técnicas y los costos de producción.

A continuación se presenta el proceso de cuatro pasos [3] para establecer las especificaciones objetivo del proyecto.

Paso 1. Elaborar la lista de métricas

Ya que se requiere tener cuidado en la traducción de las necesidades, para la elaboración de la lista se ocuparon las siguientes reglas:

- Una necesidad podría ser cubierta usando varias métricas.
- Generalmente las métricas deben ser propiedades del producto que puedan ser evaluadas de manera fácil por el desarrollador.
- Cuando una necesidad no se puede traducir en una métrica cuantificable, ya que no es una propiedad técnica, por ejemplo belleza, orgullo, etc., se indica que la métrica es subjetiva ("Subj.") y el método por el cual será evaluado, por ejemplo: será evaluada por un panel de clientes. También existen valores de métricas donde se utilizan listas ("Lista.") o valores lógicos binarios ("Bin.") como son: sí/no, pasa/no pasa, etc.

A partir de la tabla de “interpretación de los enunciados del cliente” enumeré las necesidades, y de la tabla de “jerarquía de necesidades” obtuve el nivel de importancia (Imp.), con lo cual construí la siguiente tabla:

No.	De necesidad	Necesidad	Imp.
1	El SMAD/h	Es usado en láminas propensas a deformaciones.	1
2	El SMAD/h	Es usado en láminas de vehículos.	2
3	El SMAD/h	Mide en tiempo real.	1
4	El SMAD/h	Adquiere datos de mediciones en menos tiempo que los SCMAD existentes.	2
5	El SMAD/h	Identifica y determina la deformación.	2
6	El SMAD/h	Obtiene medidas de alta precisión.	2
7	El SMAD/h	Minimiza riesgos de medición equivocada por fallas humanas.	2
8	El SMAD/h	Comunica al usuario las medidas obtenidas.	1
9	El SMAD/h	Mide la deformación sin contacto.	1
10	El SMAD/h	No requiere colocar escalas, guías, reglas, en la carrocería.	2
11	El SMAD/h	No se ve influido por el color de la lámina.	2
12	El SMAD/h	Es compatible a diferentes bancos de pruebas de automóviles.	2
13	El SMAD/h	Es un equipo portátil.	4
14	El SMAD/h	Soporta parámetros externos de temperatura entre -40°C y 100°C.	1
15	El SMAD/h	Soporta parámetros externos de humedad relativa entre 30 a 40%.	1
16	El SMAD/h	Capta mínima interferencia por ruido ambiente.	1
17	El SMAD/h	Se usa fácilmente.	2
18	El SMAD/h	Se calibra de forma sencilla.	2
19	El SMAD/h	Permite un servicio de mantenimiento sencillo.	3
20	El SMAD/h	Su costo de mantenimiento es conveniente.	2
21	El SMAD/h	Su costo de implementación es bajo.	3

A continuación obtuve la siguiente tabla de métricas:

No. De métrica	No. De necesidad	Métrica	Unidades
1	1,2,17	Lista de campos de uso.	“Subj. Lista A”
2	3,4	Tiempo de mediciones.	s
3	1,3,4,5,6,9	Valor de las deformaciones normales.	m/m
4	1,3,4,5,6,9	Valor de las deformaciones cortantes.	Rad
5	1,3,4,5,6,9	Valor de los esfuerzos.	Pa
6	4,5,9,10,18	Distancia del sistema de medición a la lámina.	m
7	3,4,5	Tiempo de análisis de la lámina.	s
8	3,4,5	Tiempo de identificación de la deformación.	s
9	3,4,5	Tiempo de informar la deformación.	s
10	3,4,5,6,7,9,11,18	Error en la medición.	%
11	8,10,17,18,19	Comunicación con el usuario.	“Subj. Lista B”
12	12,17,19	Compatibilidad con banco de pruebas.	“Subj. Sí/No”
13	13,17,18, 19	Medidas del SMAD/h.	m
14	14	Temperatura.	°C
15	15	Humedad relativa.	%
16	16	Ruido ambiente.	dB
17	19,20	Material para mantenimiento.	“Subj Lista C”
18	12,13,18, 19,20	Lista de piezas componentes del SMAD/h.	“Subj. Lista D”
19	20	Costo de mantenimiento.	US\$
20	20,21	Costo unitario de manufactura.	US\$
21	21	Costo de adquisición unitaria.	US\$

Nomenclatura usada

Lista A.: Ver capítulo 2, Especificaciones objetivo del producto, Apendice SMAD/h, Lista A.

Lista B.: Ver capítulo 2, Especificaciones objetivo del producto, Apendice SMAD/h, Lista B.

Lista C.: Ver capítulo 2, Especificaciones objetivo del producto, Apendice SMAD/h, Lista C.

Lista D.: Ver capítulo 2, Especificaciones objetivo del producto, Apendice SMAD/h, Lista D.

Paso 2. Recabar información de la competencia

Una buena forma para determinar el éxito comercial, es comparar por medio de una tabla las métricas de los productos comerciales hechos por la competencia.

Métrica No.	Métrica	Unidades	Galgas de nivel	Global scan	Touch portable
1	Lista de campos de uso.	"Subj. Lista A"	Cap1 GN	Cap1 GS	Cap1 TP
2	Tiempo de mediciones.	s	M.H. N.I.	N.I.	N.I.
3	Valor de las deformaciones normales.	m/m	N.I.	N.I.	N.I.
4	Valor de las deformaciones cortantes.	Rad	N.I.	N.I.	N.I.
5	Valor de los esfuerzos.	Pa	N.I.	N.I.	N.I.
6	Distancia del sistema de medición (SM) a la lámina.	m	N.I.	0	0
7	Tiempo de análisis de la lámina.	s	M.H. N.I.	M.H. N.I.	M-H. N.I.
8	Tiempo de identificación de la deformación.	s	M.H.	N.I.	N.I.
9	Tiempo de informar la deformación.	s	M.H.	N.I.	N.I.
10	Error en la medición.	%	N.I.	N.I.	N.I.
11	Comunicación con el usuario.	"Subj. Lista B"	Cap1 GN	Cap1 GS	Cap1 TP
12	Compatibilidad con banco de pruebas.	"Subj. Sí/No"	No	No	No
13	Medidas del SMAD/h.	m	Cap1 GN	Cap1 GS	Cap1 TP
14	Temperatura.	°C	N.O.	N.O.	N.O.
15	Humedad relativa.	%	N.O.	N.O.	N.O.
16	Ruido ambiente.	dB	N.O.	N.O.	N.O.
17	Material para mantenimiento.	"Subj Lista C"	N.I.	N.I.	N.I.
18	Lista de piezas componentes del SMAD/h.	"Subj. Lista D"	Cap1 GN	Cap1 GS	Cap1 TP
19	Costo de mantenimiento.	US\$	N.I.	N.I.	N.I.
20	Costo unitario de manufactura.	US\$	N.I.	N.I.	N.I.
21	Costo de adquisición unitaria.	US\$	N.I.	N.I.	16,271.00

Nomenclatura usada

Cap1 GN.: Ver capítulo 1, Antecedentes, Galgas de nivel.

Cap1 GS.: Ver capítulo 1, Antecedentes, Global scan.

Cap1 TP.: Ver capítulo 1, Antecedentes, Touch portable.

N.O.: No se ocupa.

N.I.: No divulgan información.

M.H.: Medición humana realizada.

Paso 3. Establecer valores objetivo ideal y marginalmente aceptables

Ya que se tiene información de los productos de la competencia, el siguiente paso es asignar valor a cada métrica del SMAD/h. Las especificaciones son preliminares ya que se desea un producto competitivo y dado que aún se están resolviendo restricciones tecnológicas y de costos, muchos valores de cada métrica son inciertos.

- El valor ideal. Es el mejor resultado que se puede esperar.
- El valor marginalmente aceptable. Es el valor que apenas haría viable el producto [3].

No. De métrica	No. De necesidad	Métrica	Unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	1,2,17	Lista de campos de uso.	“Subj. Lista A”	Cap2 SMAD/h	
2	3,4	Tiempo de mediciones.	s	121e-3 a 250e-3	120e-3
3	1,3,4,5,6,9	Valor de las deformaciones normales.	%error	0.51 a 5	0.5
4	1,3,4,5,6,9	Valor de las deformaciones cortantes.	%error	0.51 a 5	0.5
5	1,3,4,5,6,9	Valor de los esfuerzos.	%error	0.51 a 5	0.5
6	4,5,9,10,18	Distancia del sistema de medición (SM) a la lámina.	m	0.31 a 0.5	0.3
7	3,4,5	Tiempo de análisis de la lámina.	s	41e-3 a 50e-3	40e-3
8	3,4,5	Tiempo de identificación de la deformación.	s	41e-3 a 50e-3	40e-3
9	3,4,5	Tiempo de informar la deformación.	s	41e-3 a 50e-3	40e-3
10	3,4,5,6,7,9,1 1,18	Error en la medición.	%error	2.51 a 6	2.5
11	8,10,17,18,1 9	Comunicación con el usuario.	“Subj. Lista B”	Cap2 SMAD/h	
12	12,17,19	Compatibilidad con banco de pruebas.	“Subj. Sí/No”	Cap2 SMAD/h	

13	13,17,18, 19	Medidas del SMAD/h.	m	Cap2 SMAD/h	
14	14	Temperatura.	°C	-10 a 60	-40 a 100
15	15	Humedad relativa.	%	20 a 35	30 a 40
16	16	Ruido ambiente.	dB	<60	20
17	19,20	Material para mantenimiento.	“Subj Lista C”	Cap2 SMAD/h	
18	12,13,18, 19,20	Lista de piezas componentes del SMAD/h.	“Subj. Lista D”	Cap2 SMAD/h	
19	20	Costo de mantenimiento.	US\$	+100	100
20	20,21	Costo unitario de manufactura.	US\$	Cap2 SMAD/h	
21	21	Costo de adquisición unitaria.	US\$	Cap2 SMAD/h	

Nomenclatura usada

Cap2. SMAD/h.: Ver capítulo 2, Especificaciones objetivo del producto, apendice SMAD/h.

Paso 4. Reflexionar sobre el proceso y los resultados

La elaboración de la tabla de métricas fue el paso donde uní el conocimiento de las necesidades del cliente con sus prioridades y aterricé esas ideas de forma precisa y medible. Sin embargo, al no tener en cuenta con que tecnología fabricaré el producto, solo se quedan a nivel de especificaciones objetivo.

Al recabar información de los SCMAD, me doy cuenta que los desarrolladores no divulgan ciertas especificaciones tecnológicas abiertamente. Sin embargo me abro a la posibilidad de que en el instructivo del aparato, que se incluye al hacer la compra del sistema, se encuentre la información.

Los tres pasos realizados anteriormente me han apoyado a definir las métricas y hacer algunas suposiciones sobre sus valores, de tal manera que se desarrolle tecnología que compita con los sistemas comerciales ya existentes, sin embargo solo me he dedicado a la teoría. Al analizar las especificaciones objetivo, me doy cuenta que las principales limitantes para el desarrollo del proyecto son:

- Tiempo de experimentación y fabricación.
- Tecnología para fabricar el producto.
- Capital humano y monetario.

Con los recursos que tengo y para hacer un avance en el proyecto, realizaré una descomposición funcional, en otras palabras dividiré el proyecto en partes de estudio. Cada pieza

del proyecto se diseñará de tal manera que, al final, todas las partes garanticen resolver las necesidades del usuario.

Apéndice SMAD/h

Lista A. Campos de uso.

- Fabricantes de vehículos.
- Peritos oficiales y de parte.
- Talleres mecánicos.
- Centros de investigación de materiales.
- Estructuras metálicas.

Lista B. Comunicación con el usuario.

- Monitor.
- Impresiones en papel.
- Archivos digitales.
- Luz con LED.
- Teclado.
- Panel táctil.

Lista C. Material para mantenimiento.

- Herramientas para mecánica.
- Herramientas para electrónica.
- Solventes de limpieza.
- Aceites lubricantes.

Lista D. Piezas componentes del SMAD/h.

- *Esta lista se anexará cuando el proyecto del SMAD/h esté completo en su totalidad.

Compatibilidad con banco de pruebas.

- *Este apartado se anexará cuando el proyecto del SMAD/h esté completo en su totalidad.

Medidas del SMAD/h.

- * Este apartado se anexará cuando el proyecto del SMAD/h esté completo en su totalidad.

Costos.

- * Este apartado se anexará cuando el proyecto del SMAD/h esté completo en su totalidad.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL CONCEPTO

Después de identificar el conjunto jerárquico de necesidades del cliente, hacer las suposiciones de la declaración de la misión y haber formulado las especificaciones objetivo del producto, las cuales describen con detalles precisos y medibles lo que el producto tiene que “hacer idealmente”, pero no indican cómo hacerlo; ahora se desarrollarán los “conceptos”.

Los conceptos son diferentes descripciones aproximadas de la tecnología, técnicas, principios de trabajo y forma del producto, cuyo objetivo es satisfacer las necesidades del cliente [3]. Para hacer un concepto, primero se tiene que tener un entendimiento total del proyecto para saber si se puede resolver como un todo o se requiere dividir en subproyectos, el siguiente paso es recabar información externa sobre sistemas existentes que podrían ser la posible solución al proyecto, después se recaba información interna de conocimientos o experiencias sobre sistemas que podrían generar soluciones y por último, se organizan y sintetizan las posibles soluciones con una herramienta llamada “árbol de clasificación de conceptos” para facilitar su comparación.

En el caso en que varias ramas puedan parecer satisfactorias, se puede hacer una división del trabajo y seguir independientemente cada una de ellas o se realiza la “selección de conceptos” cuyo objetivo es evaluar los diferentes conceptos a partir de una matriz de selección con el fin de obtener una tabla con un orden jerárquico de los conceptos a estudiar.

3.1 GENERACIÓN DE CONCEPTOS

En este apartado se desarrolla una serie de cinco pasos de un método [3] para la generación de conceptos.

Paso 1. Aclarar el problema

Este paso consiste en desarrollar un entendimiento general del proyecto (descripción en módulos [10]) y luego, si el problema de diseño lo amerita, descomponer o dividir el proyecto total en subproyectos o partes más sencillas (descomposición funcional). Al final la integración de los subproyectos garantiza la resolución de las necesidades del cliente (subproblemas críticos). De esta manera, los “conceptos” de solución se aplican a cada subproyecto.

Descripción en módulos

Para que el entendimiento del SMAD/h se haga más simple, se hace la división del sistema en módulos [10], los cuales desempeñan una función propia y se interrelacionan unos con otros.

Módulo de medio ambiente. Es el banco de pruebas donde se ocupará el SMAD/h. Los parámetros externos de temperatura y humedad, son agentes que podrían afectar las operaciones del SMAD/h.

Módulo de ensamble. Son los elementos mecánicos y estructurales del SMAD/h, por ejemplo: el sistema de medición (SM) será transportado por el sistema del brazo robótico (SB), cuyo movimiento será paralelo al desplazamiento de la puerta, como podemos observar en la figura [3.1]; en este módulo también se encuentra: la estación de trabajo; la computadora; etc.

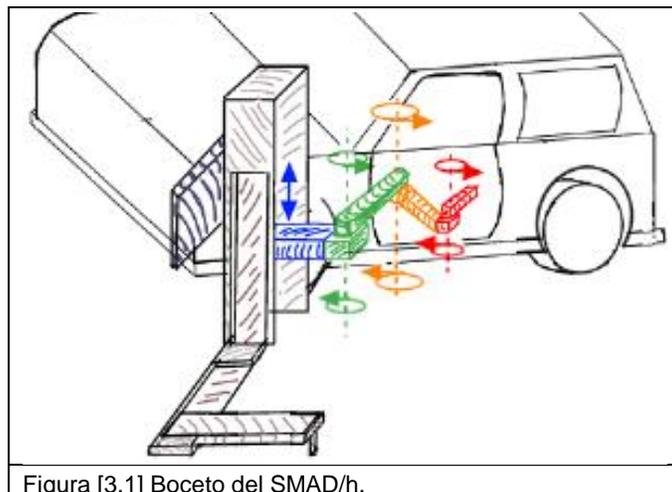


Figura [3.1] Boceto del SMAD/h.

Módulo de actuación. Son los diferentes elementos que el sistema necesita para cambiar sus condiciones, en este caso serían los motores del SB.

Módulo de medición mecánica. Este módulo se centra en la obtención de información proveniente de los elementos mecánicos acerca del comportamiento del sistema. En este caso sería la información de la posición del SB proporcionada por algún transductor (codificador rotatorio) colocado en los motores.

Módulo de interfaces. Tiene que ver con la transferencia de la información entre los niveles del sistema. Por ejemplo, en el SMAD/h tenemos la interfaz hombre-máquina por medio de la computadora.

Módulo de comunicación. El medio por el cual se realiza la transmisión de la información entre módulos dentro del sistema.

Módulo del procesador. Tiene que ver con el procesamiento de la información proveniente del módulo de medición mecánica y el módulo de interfaces. Este módulo determina la operación del módulo de actuación y proporciona información al módulo de interfaces.

Módulo de software. Este contiene las instrucciones de operación y algoritmos definidos para el sistema y control de las operaciones del módulo de procesamiento.

Descomposición funcional

El primer paso para descomponer el problema funcionalmente es representarlo como una caja negra, la cual muestra la función general del producto y como operan los flujos de material, energía y señales, como podemos observar en la figura [3.2].

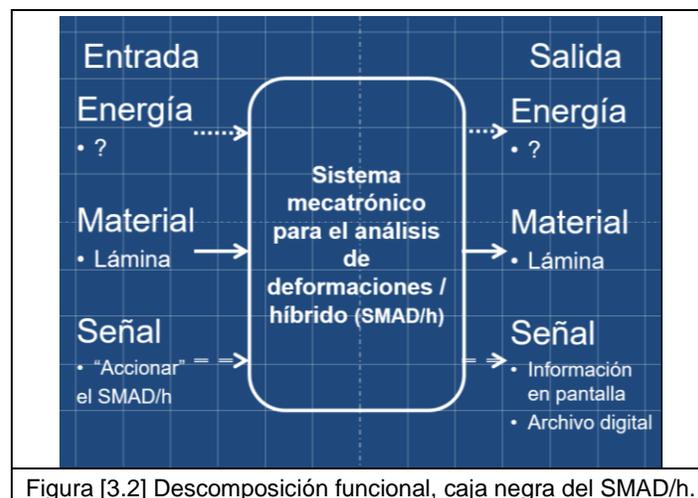


Figura [3.2] Descomposición funcional, caja negra del SMAD/h.

Respecto a “flujo de energía” entendemos que es su transferencia y conversión, el SMAD/h no realiza alguna transformación que sea de interés para el análisis de deformaciones. Por “flujo de material” decimos que es el movimiento de material dentro del sistema, a la entrada y salida del sistema tenemos la lámina deformada. Por “flujo de señal” tenemos los patrones de control y retroalimentación dentro del sistema, la “señal de entrada” será colocar y accionar el SMAD/h, la “señal de salida” será la información de la deformación en alguna pantalla y el archivo digital.

El siguiente paso de la descomposición es dividir la caja negra en subfunciones para crear una descripción más específica de lo que los elementos del producto podrían hacer, sin implicar un principio específico de trabajo tecnológico, como se muestra en la figura [3.3]

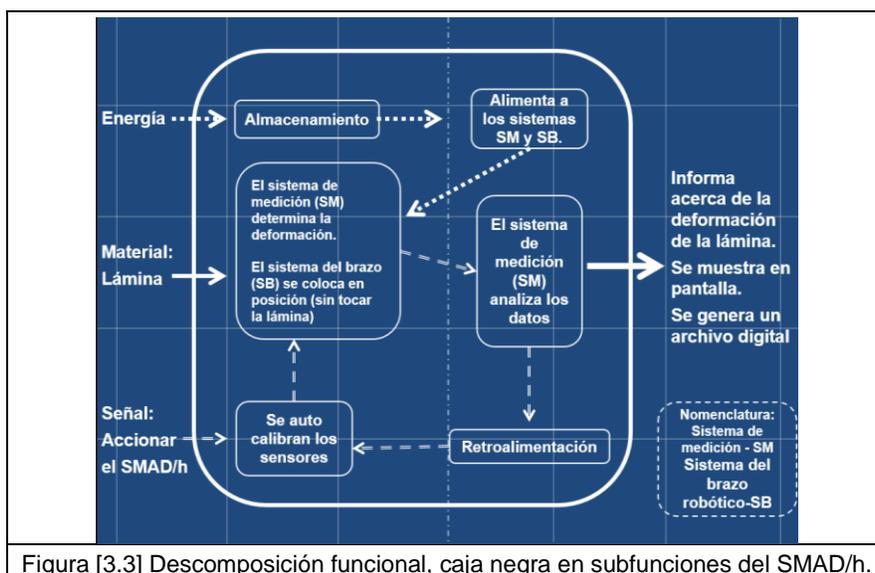


Figura [3.3] Descomposición funcional, caja negra en subfunciones del SMAD/h.

La “energía” la requiero almacenar en caso de que sea portátil el SMAD/h, y para la alimentación de los demás sistemas. El “material” que es la lámina deformada estará presente a la entrada y salida del sistema. Los demás sistemas identificarán y determinarán la deformación de la lámina. También se añade un bloque para la retroalimentación de los datos con el fin de autocalibrar los sensores. La “señal de entrada” será colocar y accionar el SMAD/h, “la señal de salida” será la información acerca de la deformación.

Enfocar el trabajo inicial en subproblemas críticos

El objetivo de la descomposición fue dividir el problema complejo en varios más sencillos, de tal modo que éstos se puedan solucionar en forma enfocada. Al analizar el proyecto por medio de “módulos” y por medio de la “caja negra”, me doy cuenta que el proyecto es muy amplio para ser desarrollado por una sola persona en poco tiempo. Por lo tanto enfocaré mi estudio y tiempo al sistema de medición (SM). En mi experiencia este debe ser punto de partida, ya que el éxito que quiero alcanzar depende en gran medida del análisis de las deformaciones sin tocar la lámina. Creo

que la solución a este subproyecto va a generar una solución novedosa a los sistemas de medición existentes y va a arrojar un diseño superior al SMAD/h.

El sistema de brazo robótico (SB) lo dejaré como otra fase de estudio, ya que si consigo analizar la deformación, la información recibida podría ser usada como realimentación al módulo de medición mecánica para mandar señales al módulo de actuación y así automatizar el producto.

Paso 2. Buscar externamente

Este paso está destinado a encontrar posibles soluciones a los subproyectos identificados en el paso anterior. Las soluciones pueden ser: existentes, desarrollos novedosos o combinar una solución nueva con una existente para dar un diseño superior.

La principal información externa que he captado para la solución al sistema de medición, es de los tres sistemas comerciales de medición para el análisis de deformaciones en láminas rígidas de vehículos, que están descritos en el "capítulo 1, antecedentes". Enseguida haré un breve resumen de los tres SCMAD enfocado en su SM. Después haré un breve resumen de otras tecnologías y principios de trabajo que investigué.

Galgas de nivel

Después de colocar las varillas con sus reglas. La altura de cada varilla es definida por el manual del fabricante. Entonces, el oficial se coloca delante del vehículo para observar cada una de las reglas, estableciendo el diagnóstico de la deformación: las miras o agujas centrales deben estar alineadas y las reglas deben estar situadas en el mismo plano de referencia [4].

Global Scan (escáner)

Este sistema [6] le permite ver gráficamente cada vehículo por la comparación de la medición de corriente con las especificaciones exactas del vehículo y más puntos de medición en tiempo real, proporcionando actualizaciones continuas a lo largo de la reparación. Es compacto y fácil de maniobrar, para ser colocado debajo del vehículo, lo que permite el sistema para determinar y mostrar inmediatamente los valores de video en las tres dimensiones de cada punto detectado.

Los 45 objetivos intercambiables llamados genéricamente "detectores", que se diferencian sólo por la longitud del tallo, permiten la reflexión de los rayos emitidos desde el escáner y su identificación con el mismo. Todos están numerados del N°1 al N°45 para mayor comodidad del operador.

Touch portable (brazo medidor y punteros)

El brazo medidor dispone de cinco sensores de ángulos para detectar la posición exacta del brazo transmitiéndola por cable al ordenador. Posee cinco articulaciones con las que consigue alcanzar cualquier punto de medición de la carrocería. Dispone de tres punteros de diferente longitud que se pueden insertar en 3 posiciones diferentes. El ordenador realiza los cálculos oportunos para presentar en pantalla las desviaciones de la carrocería, comparándola con las dimensiones del mismo modelo de su base de datos [7].

Termografía

“Dentro de la Semana de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima, Javier González, investigador de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, ofreció la conferencia “Aplicaciones de la termografía infrarroja en la medicina”, donde aseguró que esta técnica resulta más efectiva y barata que otras técnicas para saber la profundidad de quemaduras de niños y para la detección de cáncer de mama, por encima de la mamografía y el ultrasonido... Afirmó que otra característica de la termografía es que permite la medición no invasiva, es decir que no requiere de tocar a la persona para determinar el estado de su salud y que no es necesario tocarla para hacer alguna medición... Para describir las herramientas producto de su trabajo científico, González indicó que los diagnósticos se realizan por medio de una cámara termográfica que es portátil,...” [15].

Telemetro láser

El aparato de medición ha sido proyectado para medir distancias, longitudes, alturas, separaciones, inclinaciones y para calcular superficies y volúmenes. El aparato de medición es adecuado para medir tanto en interiores como en exteriores [16].

Técnicas ópticas de inspección visual

Los sistemas automatizados de inspección visual son producto de la necesidad de determinar si una pieza se desvía de un conjunto de especificaciones o valor de ciertas características. Por otra parte, estos sistemas tienen la ventaja de inspeccionar un lote completo de piezas con gran precisión en las mediciones realizadas [14].

Luz estructurada. Un sistema de iluminación proyecta un patrón de luz, como puntos, líneas, rejillas o franjas, sobre el objeto de estudio. Las deformaciones del patrón reflejado dan información sobre la forma de la superficie. Existe un sistema cuyo esquema de inspección está basado en la comparación del modelo CAD de diseño con las imágenes adquiridas de las piezas reales [14].

Paso 3. Buscar internamente

La búsqueda interna es el proceso de usar las experiencias, conocimiento e información personal y del equipo, para luego adaptarlo de forma creativa y generar conceptos de solución.

Sensor ultrasónico

En la clase de Automatización avanzada, en el laboratorio de PLC, hice una práctica con un sensor ultrasónico de salida analógica, que conectado a un PLC Allen Bradley previamente programado, detectaba y determinaba la distancia de un objeto, con una tolerancia máxima de error de 5[mm].

Interferometría con láser

En la clase de láseres y optoelectrónica, en el laboratorio de pulsos cortos, hice una práctica con un interferómetro tipo Michelson, el cual utiliza franjas de interferencia para medir de manera precisa pequeñas deformaciones en una superficie a través de la interferencia generada por los haces de luz.

Aparato de ultrasonido de uso médico

Consta de un generador que produce una corriente de alta frecuencia y de un transductor que convierte la energía eléctrica en mecánica. El transductor será el que entrará en contacto con el paciente [17].

Visión por computadora

En la clase de diseño mecatrónico, hice una práctica con una cámara web y un software llamado reactIVision, el cual reconoce patrones en tiempo real.

Paso 4. Explorar sistemáticamente

El objetivo de este paso es organizar y sintetizar todas las posibles soluciones al subproyecto. Una herramienta útil es el “árbol de clasificación de conceptos”, el cual ayuda a dividir las posibles soluciones en categorías independientes y facilita su comparación. De esta forma se tiene un panorama más claro de las soluciones competentes, eliminando las que no lo son.

En el caso en que varias ramas puedan parecer satisfactorias, se puede hacer una división del trabajo y seguir independientemente cada una de ellas. Es importante reflexionar si el trabajo aplicado a cada rama se ha asignado de manera apropiada y es correcto seguir enfocándose en ella.

En el primer árbol de clasificación figura [3.4], separé los conceptos en dos grandes ramas, la primera son los sistemas que requieren de contacto para medir, la segunda son los sistemas que

no requieren contacto para medir, las sub-ramas son los conceptos y las últimas ramas son las tecnologías o técnicas existentes.

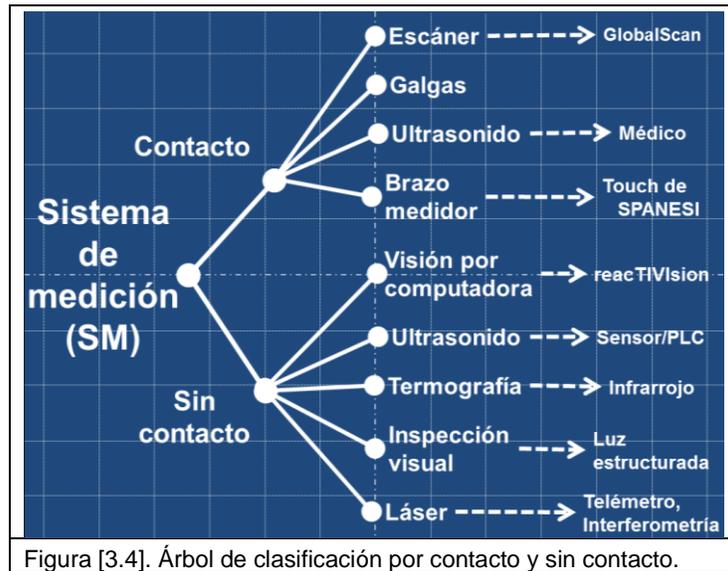


Figura [3.4]. Árbol de clasificación por contacto y sin contacto.

En el segundo árbol de clasificación figura [3.5], separo los conceptos de acuerdo a las tecnologías que tengo disponibles para estudiar y las que no tengo disponibles. Esto es importante ya que ubico las limitantes del proyecto en este momento.

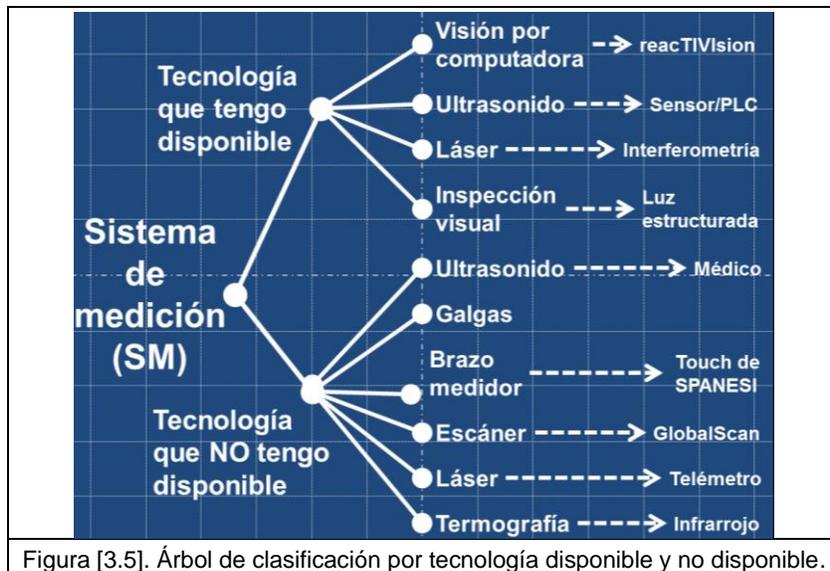


Figura [3.5]. Árbol de clasificación por tecnología disponible y no disponible.

Paso 5. Reflexionar sobre el proceso y las soluciones

Al desarrollar el proyecto en módulos, obtuve un entendimiento integral acerca de las operaciones que debe realizar el SMAD/h y como los módulos están interrelacionados para el correcto funcionamiento del SMAD/h. Además localicé algunas partes que no tenía contempladas.

Con el objetivo de saber si el SMAD/h amerita ser descompuesto en varios subproyectos, realicé la descomposición funcional. Como caja negra el SMAD/h solo opera sobre flujo de señales. La “señal de entrada” será accionar el SMAD/h y la “señal de salida” será la información de la deformación. Sin embargo al dividir la caja negra en subfunciones y estar consciente de los alcances que escribí para los módulos, me doy cuenta que requiero varios sistemas para lograr que funcione adecuadamente el SMAD/h. De esta manera tengo claro que requiero enfocarme al SM que será el aparato que analice las deformaciones sin tocar la lámina.

La búsqueda externa la realicé enfocándome en los SM que ya existen comercialmente, y encontré que los fabricantes no explican con claridad cómo es que su producto funciona; además hice la búsqueda de aparatos o técnicas con las cuales se hacen mediciones a distancia. Por otra parte, en la búsqueda interna indiqué ciertas tecnologías con las que he trabajado en diferentes laboratorios.

Al organizar y sintetizar toda la información recopilada en los árboles de clasificación, y sin poner foco a la limitación tecnológica con la que cuento en este momento del proyecto, obtuve como resultado cinco propuestas para el concepto de sistema de medición:

- Ultrasonido: Sensor ultrasónico y PLC.
- Medición con dos sensores: Láser.
- Termografía: Infrarrojo.
- Interferometría y visión por computadora.
- Inspección con luz estructurada.

Estas cinco soluciones las elegí debido a que la tecnología cumple con el requerimiento de hacer mediciones sin tocar la lámina o colocar algún aditamento en la lámina, el procesamiento de las señales podría ser tan rápido que se diría que se realiza en tiempo real, y conozco los laboratorios donde están los aparatos para hacer experimentos, excepto para la termografía.

Al reflexionar si he explorado todas las posibles soluciones, mi respuesta es no. Creo que existen muchas más formas de resolver el problema (encontré aproximadamente otros treinta sistemas en [14], que al añadir una tecnología extra mejoran incrementalmente los productos existentes), sin embargo las respuestas que planteo son las que llamaron mi atención para ser estudiadas y me parecieron pertinentes para resolver las necesidades del cliente.

3.2 SELECCIÓN DE CONCEPTOS

En el caso en que varias ramas puedan parecer satisfactorias, se puede hacer una división del trabajo y seguir independientemente cada una de ellas. Debido a que soy el único desarrollador, opté por hacer la “selección de conceptos”, que es el proceso para elegir el mejor concepto o concepto dominante para su posterior investigación o desarrollo. Los diferentes conceptos son evaluados al comparar sus puntos fuertes y débiles, con respecto a las necesidades del cliente y otros criterios. La metodología o técnicas de decisión van desde métodos intuitivos hasta métodos estructurados, por ejemplo:

Intuición: Se elige el concepto que se percibe como mejor.

Decisión externa: El comprador, cliente o alguna otra entidad externa al equipo elige.

Campeón del producto: Un miembro del equipo de desarrollo escoge.

A favor y en contra: El equipo hace una lista de los puntos fuertes y débiles de cada concepto y hace la selección con base en la opinión del equipo.

Matrices de decisión: El equipo califica cada concepto contra criterios de selección especificados de antemano.

Prototipo y prueba: El equipo construye y prueba prototipos de cada concepto y selecciona con base en los datos de las pruebas.

A continuación se desarrolla un proceso de seis pasos [3] que se apoya en una matriz de decisiones para filtrar, ordenar y seleccionar los mejores conceptos. Elegí esta metodología, ya que es una evaluación rápida, destinada a producir alternativas viables en orden jerárquico.

Paso 1. Elaborar la matriz de selección

Las entradas de la matriz son conceptos y criterios. Los primeros deben presentarse al mismo nivel de detalle, descripción física y representación gráfica, para su comparación. Un bosquejo sencillo de cada concepto facilita la comunicación de las características clave del concepto. Los criterios se seleccionan con base en las necesidades del cliente.

Concepto 1. Sensor ultrasónico y PLC. Medición con dos sensores

Con ayuda de dos sensores ultrasónicos conectados a un PLC, mido la deformación de la lámina, como se muestra en la figura [3.6]

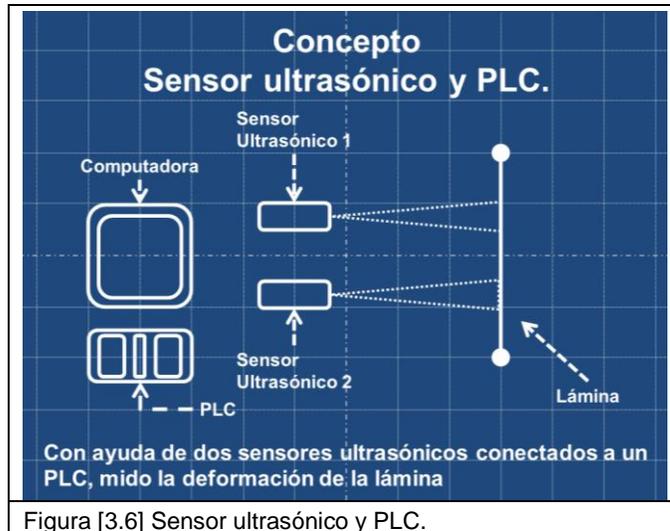


Figura [3.6] Sensor ultrasónico y PLC.

Concepto 2. Láser. Medición con dos sensores

Con ayuda de dos láseres conectados a una computadora por medio de cierta interfaz, mido la deformación de la lámina, como se muestra en la figura [3.7]

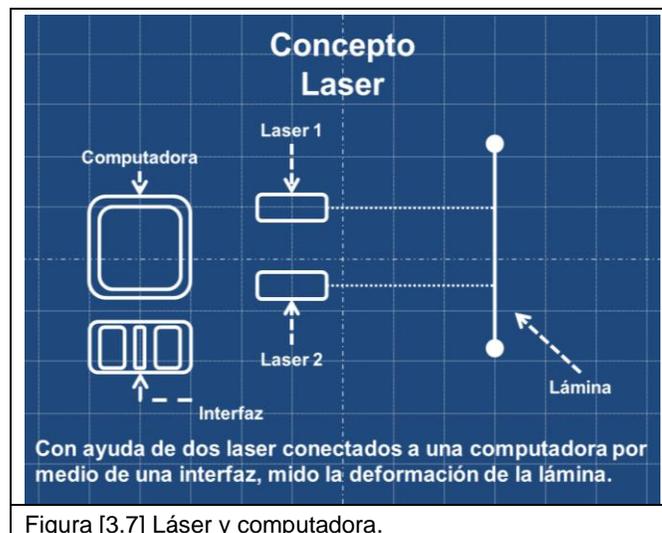


Figura [3.7] Láser y computadora.

Concepto de referencia. Medición con dos sensores

Tengo dos sensores cuales quiera separados a una distancia conocida “ d_1 ”. Cada sensor va a calcular la distancia comprendida entre el mismo y la lámina. Para el sensor 1 tengo la distancia “ l_1 ” y para el sensor 2 tengo la distancia “ l_2 ”. La longitud de la lámina “ L ” entre los puntos de coordenadas “ (l_2, d_1) ” y “ $(l_1, 0)$ ”, como podemos ver en la figura [3.8], es:

$$L = \sqrt{(l_2 - l_1)^2 + (d_1)^2}$$

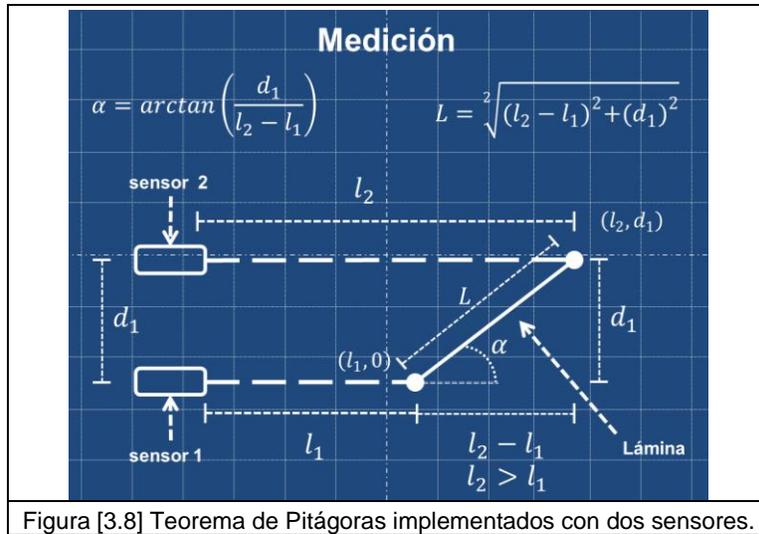


Figura [3.8] Teorema de Pitágoras implementados con dos sensores.

También podemos obtener el ángulo de inclinación “ α ” por trigonometría. Sabemos que la tangente es la razón entre el cateto opuesto, que en nuestro caso es la distancia entre los sensores “ d_1 ”, sobre el cateto adyacente, que es la diferencia de las distancias “ l_2 ” y “ l_1 ”. Por lo tanto, el ángulo “ α ” será igual a:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d_1}{l_2 - l_1}\right)$$

Concepto 3. Infrarrojo.

Con ayuda del infrarrojo conectado a una computadora por medio de una interfaz, mido la deformación de la lámina, como se puede ver en la figura [3.9].

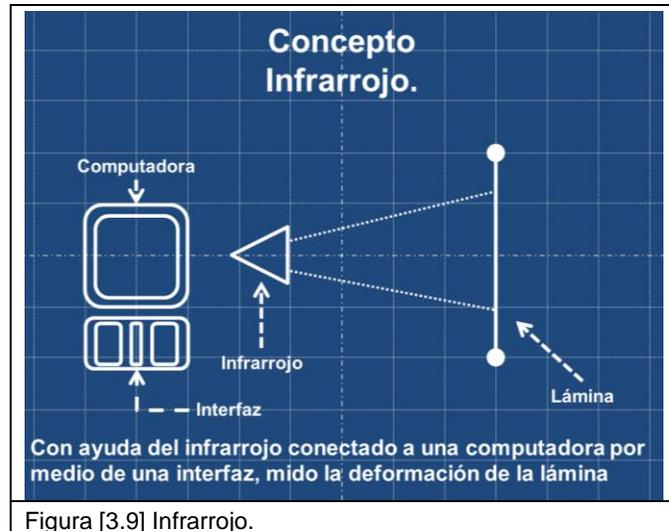


Figura [3.9] Infrarrojo.

Concepto 4. Interferometría con láser y visión por computadora.

Con ayuda de un interferómetro, una cámara y un software, mido la deformación de la lámina, como observamos en la figura [3.10]

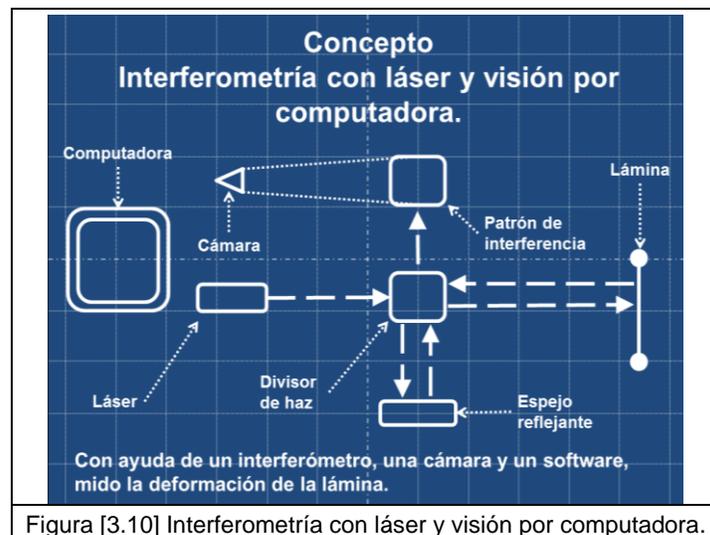


Figura [3.10] Interferometría con láser y visión por computadora.

Concepto 5. Inspección con luz estructurada.

Con ayuda de un cabezal que genere un patrón de puntos de luz para un láser de baja potencia, una cámara y un software, mido la deformación de la lámina, como se observa en la figura [3.11]

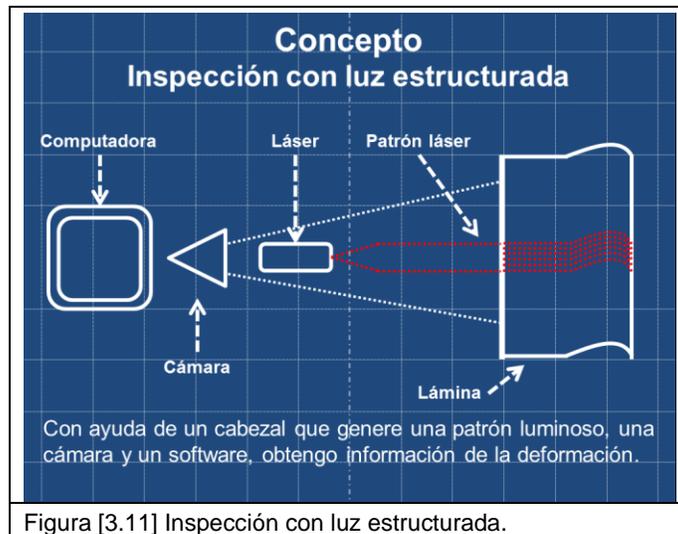


Figura [3.11] Inspección con luz estructurada.

Paso 2. Evaluar los conceptos

El siguiente paso es evaluar entre los diferentes conceptos, con la ayuda de la matriz de selección de conceptos, cual es el mejor para ser implementado como SM. El código [3] que uso es el siguiente: (+) "mejor que", (0) "igual a", (-) "peor que".

Criterios de selección	Matriz de selección de conceptos				
	Conceptos				
	Sensor ultrasónico y PLC	Láser	Infrarrojo	Interferometría	Luz estructurada
Facilidad de implementación	+	+	-	0	0
Facilidad de adquisición	0	-	-	0	0
Facilidad de uso	+	+	-	+	0
Facilidad de lectura de datos	+	0	0	+	+
Facilidad de programación	+	-	-	+	+

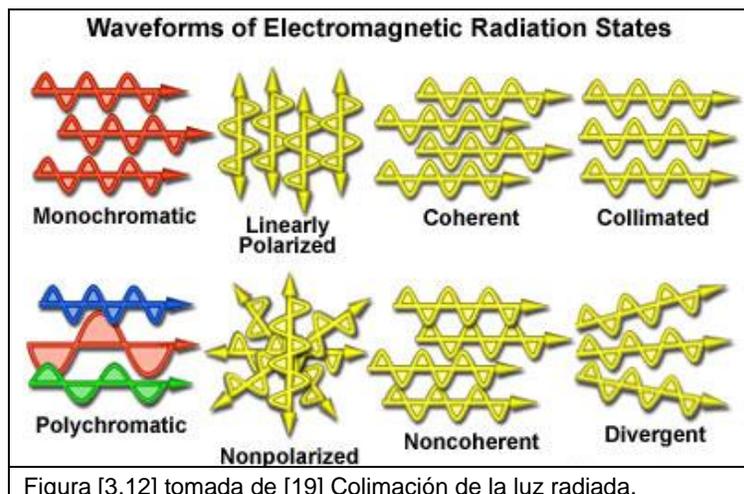
Paso 3. Ordenar los conceptos

Criterios de selección	Conceptos				
	Sensor ultrasónico y PLC	Láser	Infrarrojo	Interferometría	Luz estructurada
Suma +	4	2	0	3	2
Suma 0	1	1	1	2	3
Suma -	0	2	4	0	0
Evaluación neta	4	0	-4	3	2
Lugar	1	4	5	2	3
¿Continuar?	Sí	No	No	Sí	Sí

Paso 4. Combinar y mejorar los conceptos

Después de haber evaluado y ordenado los conceptos, teóricamente el “*sensor ultrasónico y PLC*” es superior a los demás, debido a su facilidad de implementación, uso, programación y puedo realizar un prototipo rápido gracias al apoyo del laboratorio de PLC que se encuentra en el CDMIT.

Sin embargo, teniendo en cuenta que el concepto de referencia es “medición con dos sensores”, una propuesta superior sería combinar el “sensor ultrasónico y PLC” con “Láser”, ya que teóricamente sé que a diferencia del ultrasonido, los láseres tienen la propiedad de que todos sus átomos radian en fase entre sí, lo que produce una fuerte colimación de la luz radiada, en otras palabras los rayos viajan paralelos entre sí formando un pequeño ángulo entre ellos a varios metros, como podemos observar en la figura [3.12]. De tal manera que el teorema de Pitágoras implementado con el concepto llamado “dos sensores láser y PLC” sería muy apegada a la teoría. Al final no agrego este nuevo concepto ya que no dispongo del equipo láser.



Paso 5. Seleccionar uno o más conceptos

La elección del “sensor ultrasónico y PLC”, “interferometría con láser y visión por computadora” e “inspección con luz estructurada” es debido a las siguientes razones:

El primer concepto que elegí para experimentar es “sensor ultrasónico y PLC”, ya que cumple con la mayoría de los criterios de selección. El punto donde tiene (0) “igual a” es:

- Facilidad de adquisición, debido a que los componentes se encuentran en el laboratorio de PLC del CDMIT, y conseguirlos para experimentar sería con autorización previa de los profesores encargados.

El segundo concepto que elegí para experimentar es la “Interferometría con láser y visión por computadora”. Aunque cumple con la mayoría de los criterios de selección, los puntos donde tiene (0) “igual a” son:

- Facilidad de adquisición, debido a que los componentes se encuentran en el laboratorio de pulsos cortos del CCADET, y conseguirlos para experimentar sería con autorización previa de los profesores encargados.
- Facilidad de implementación, aunque se integra de pocos componentes, según mi experiencia su calibración no es simple.

El tercer concepto que elegí para experimentar es “inspección con luz estructurada”. Aunque solo tiene dos criterios de selección, los puntos donde tiene “igual a” (cero) son:

- Facilidad de adquisición, debido a que los componentes para realizar un prototipo rápido los puedo implementar con aparatos de uso común como son: cámara de celular de 5 megapíxeles, puntero láser. El objeto que requiero comprar sería un cabezal multipuntos para que láser genere algún patrón.
- Facilidad de implementación, se requieren pocos componentes sin embargo se debe tener cuidado al usar el láser.
- Facilidad de uso, requiero adquirir experiencia en la técnica de “luz estructurada” y reforzar mi conocimiento en “procesamiento digital de imágenes”.

Paso 6. Reflexionar sobre el proceso y los resultados

La metodología de “selección de conceptos” la ocupé debido a que cuento con cinco propuestas para hacer el SM y todas cumplen con el requerimiento principal que es medir la lámina sin contacto. Sin embargo, al ser la única persona que trabaja en este estudio requería un proceso para descartar algunos conceptos de forma rápida (sin hacer prototipos y pruebas), que me apoyara a tomar la decisión sobre los conceptos viables y ordenarlos jerárquicamente.

Hacer el prototipo con base al “sensor ultrasónico y PLC”, me parece una propuesta adecuada, ya que estoy familiarizado en programación de PLC debido a la clase que tomé en los laboratorios del CDMIT, sin embargo la experiencia teórica y práctica que tengo con sensores ultrasónicos es poca. Sé que la implementación de los sensores al PLC es relativamente fácil, sin embargo requiere de cierta caracterización para tener márgenes de error mínimos.

Por otra parte, experimentar con “interferometría con láser y visión por computadora” me llevaría por un campo de estudio del cuál requiero más experiencia para lograr resultados excelentes. Mi acercamiento teórico y práctico en interferometría ha sido por prácticas que realicé en el laboratorio de pulsos cortos del CCADET. Según mi experiencia esta es una técnica excelente para conocer cómo es la superficie de un objeto reflectante, sin embargo su calibración no es trivial.

Por último, la “inspección con luz estructurada” implica desarrollar nuevos conocimientos y reforzar algunos otros. Mi experiencia teórica y práctica en “inspección visual” ha sido en la materia de “procesamiento digital de señales”, por otra parte en la técnica de “luz estructurada” solo poseo conocimiento teórico. Poseo la mayoría de los materiales para hacer un prototipo rápido y la programación la realizaría en Wolfram Mathematica, ya que tengo experiencia en la paquetería.

En conclusión, *realizaré el diseño a nivel sistema de estos tres conceptos* con la finalidad de analizar sus ventajas y desventajas, y así obtener la mejor propuesta para el sistema de medición del SMAD.

CAPÍTULO 4

DISEÑO A NIVEL SISTEMA. SENSOR ULTRASÓNICO Y PLC

Este capítulo tiene el propósito de experimentar de manera práctica el concepto “sensor ultrasónico y PLC”, y los objetivos son los siguientes:

- Aprender de manera teórica y práctica sobre el concepto estudiado.
- Al tener un entendimiento teórico, poder comunicar lo aprendido.
- Integrar la tecnología necesaria para experimentar.
- Alcanzar las metas que requiere el cliente, en caso contrario reportar las razones.

El primer paso del estudio teórico es “la prueba del concepto” y sirve para verificar que el concepto que se estudia cubre las expectativas del cliente, en el caso de no ser así, se refina el concepto o se estudia otro. De tal forma que primero se aterriza el concepto según mis puntos fuertes y mis limitantes, se definen ciertas preguntas que una población de expertos me respondió según un formato de consulta que elegí para lograr comunicar de forma asertiva el concepto. Las respuestas de la población se agrupan para hacer la interpretación de los resultados y así obtener la reflexión de los resultados y el proceso.

El siguiente paso lo llamo “arquitectura preliminar del prototipo”, debido a que se trabaja con los elementos físicos que verificarán la propuesta teórica del concepto, teniendo en cuenta que la arquitectura del producto continúa evolucionando en subsiguientes actividades a nivel sistema y diseño de detalle. Así crearé un esquema del producto para mostrar las operaciones funcionales de lo que hará el SM, sin involucrar la tecnología que lo hará; después haré la reducción a componentes para identificar que elemento físico específico realizará cada una de las funciones. Una vez identificados los elementos físicos se creará una disposición geométrica aproximada con la finalidad de estar claro con el funcionamiento de las partes del SM, las medidas de sus componentes y los equipos adicionales que se requieren para que funcione correctamente, como son: las fuentes de

voltaje externas, lenguaje de programación, etc. Por último identificaré las interacciones fundamentales e incidentales con el objetivo de tener claras las limitaciones tecnológicas y los posibles problemas por la implementación física de las tecnologías.

El siguiente paso es la “planeación del prototipo” y sus objetivos principales son: tener claro el propósito del experimento y las principales cuestiones que resolverá el prototipo; declarar el nivel de aproximación al que se encuentra el prototipo según su dimensión; proponer el plan experimental con la finalidad de poder reproducir los resultados con los pasos explicados; por último formular un calendario o tiempo de desarrollo del experimento.

Hasta este momento, todos los pasos anteriores corresponden al estudio del prototipo en la dimensión analítico – enfocado [3], ya que solo se obtienen conclusiones de pruebas conceptuales y se han hecho suposiciones de los posibles resultados prácticos, basados en las especificaciones de los fabricantes y conocimiento previo de las tecnologías.

La siguiente fase es “experimentación y pruebas”, que corresponde al estudio del prototipo en la dimensión físico – enfocado [3], ya que se probará la base matemática del concepto y los propósitos antes descritos con componentes físicos. En este apartado se describen las distancias entre los sensores, la configuración del PLC y el código del software.

Por último se muestran los resultados del estudio del concepto, donde se dan respuestas a las ideas propuestas en la “planeación del prototipo”, se informa de las medidas esperadas, las obtenidas y su porcentaje de error, y la conclusión de implementar el SM con el concepto estudiado en este capítulo.

4.1 PRUEBA DEL CONCEPTO

El objetivo de la prueba del concepto, es verificar si las necesidades del cliente, teóricamente han quedado satisfechas de manera adecuada. Para ello, la prueba evalúa la respuesta del cliente al concepto del producto, basada directamente de los datos reunidos de ellos o de una población que su opinión sea clave. Por otra parte, la prueba reúne información con la finalidad de refinar el concepto del producto, ya que estas pruebas son hechas durante la fase de desarrollo.

A continuación se presenta un proceso de siete pasos [3] para probar conceptos.

Paso 1. Definir el propósito de la prueba de concepto

El propósito de la prueba es saber si el cliente está interesado en el concepto “sensor ultrasónico y PLC” como sistema de medición, de tal manera que las preguntas principales que requieren respuesta son:

- ¿Este concepto cubre tus necesidades de medición?
- ¿Tendrías alguna propuesta que podría mejorar el concepto?
- ¿Adquirirías un producto basado en este concepto?
- ¿Debo continuar el desarrollo de este concepto?

Y teniendo en cuenta que mis antecedentes son:

- Estoy familiarizado en programación de PLC.
- La experiencia teórica y práctica que tengo con sensores ultrasónicos es poca.
- Sé que la implementación de los sensores al PLC es relativamente fácil.
- Los componentes se encuentran en el laboratorio de PLC del CDMIT, y conseguirlos para experimentar sería con autorización previa de los profesores encargados.

Paso 2. Seleccionar una población

La población de expertos se basa en desarrolladores de tecnología del CIA, ingenieros electrónicos, ingenieros mecánicos, ingenieros mecatrónicos y arquitectos.

Paso 3. Seleccionar un formato de consulta

El formato de la consulta es “interacción personal” con la población antes mencionada en la UNAM, campus C.U. También me apoyo en el uso de un bosquejo del principio de operación figura [4.1] y una secuencia de imágenes de cómo se efectuaría la medición, figura [4.2].

También podemos obtener el ángulo de inclinación “ α ” por trigonometría. Sabemos que la tangente es la razón entre el cateto opuesto, que en nuestro caso es la distancia entre los sensores “ d_1 ”, sobre el cateto adyacente, que es la diferencia de las distancias “ l_2 ” y “ l_1 ”. Por lo tanto, el ángulo “ α ” será igual a:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d_1}{l_2 - l_1}\right)$$

Paso 5. Agrupar la respuesta de la población

Los ingenieros me dan su visto bueno para hacer un prototipo del concepto, sin embargo me preguntan si existe un sensor láser que pudiera suplantar al sensor ultrasónico, en caso de que existiera, esa sería su propuesta para mejorar el concepto.

Los desarrolladores de tecnología del CIA confían en que es un buen prototipo pero requieren saber si la teoría se apega a la práctica, debido a que la onda del sonido diverge. Si funciona correctamente lo adquirirían.

A los arquitectos les parece interesante el concepto y que ellos lo adquirirían si tuviera la opción de medir otros materiales y no solo lámina.

Paso 6. Interpretar los resultados

El concepto de sensor ultrasónico y PLC para medir la longitud de arco en un plano es una buena idea como prototipo de experimentación, ya que teóricamente cubre las necesidades de medición.

Cuando elabore el prototipo y haga pruebas podré responder las siguientes preguntas:

- ¿Puedo obtener la longitud de arco en un plano usando tecnología ultrasónica?
- ¿Los elementos físicos son los correctos para lograr los alcances del concepto?
- ¿Cómo es el comportamiento de dos sensores ultrasónicos trabajando a la vez?
- ¿La naturaleza de los materiales afecta la medición con la tecnología ultrasónica?
- ¿La divergencia de la onda acústica afecta las mediciones?

Paso 7. Reflexionar sobre el proceso y los resultados

Al definir el propósito de la prueba obtuve las principales preguntas que requerían respuesta con la finalidad de saber si se debía continuar con el desarrollo de este concepto. Elegir la interacción personal para comunicar el concepto fue una gran decisión, ya que en cada breve exposición obtenía nuevas ideas para mejorar la explicación de forma más sintetizada y clara; por otra parte la retroalimentación por parte de la población de encuesta era de inmediato.

Esta consulta refuerza en mí la inquietud de trabajar con tecnología láser, sin embargo debido a la dificultad de adquisición de sensores láser e interfaz con PLC, la interferometría será una siguiente versión de prototipo en caso de que los sensores ultrasónicos y PLC no cumplan con las necesidades del cliente.

4.2 ARQUITECTURA PRELIMINAR DEL PROTOTIPO

Un producto puede considerarse en términos funcionales y físicos.

Los elementos funcionales son las operaciones individuales que contribuyen al rendimiento general del producto. En el caso del SMAD/h tenemos los siguientes elementos funcionales: “medición de distancia a la lámina”, “comunicación entre sensores y computadora”, “análisis de datos”, “alimentación de energía”, “interfaz con el usuario”, entre otros.

Los elementos físicos de un producto son las partes, componentes y subconjuntos que realizan las funciones del producto. Algunos elementos físicos se definen a medida que avanza el desarrollo, otros son especificados por el concepto del producto y otros se definen durante la fase de diseño de detalles. Para el sistema de medición SM, se especificó como elementos físicos el uso de sensores ultrasónicos y PLC.

Cuando se tiene un conjunto de elementos físicos que ponen en práctica las funciones del producto, se le llama “trozo” [3]. Así bien, la arquitectura de un proyecto es la asignación de los elementos funcionales a trozos físicos del producto y sus interfaces con el resto del dispositivo, en otras palabras, la arquitectura es definir los elementos físicos de construcción del producto en términos de lo que hacen y cómo interactúan entre ellos.

El siguiente método es una serie de cuatro pasos [3], cuya finalidad es tomar decisiones preliminares de la arquitectura, por ejemplo, una disposición geométrica aproximada, descripciones de los trozos principales y documentación de las interacciones clave entre los trozos. Se sabe que conforme se desarrolla el sistema y el diseño de detalle, la arquitectura seguirá evolucionando.

Paso 1. Crear un esquema del producto

La siguiente lista son los elementos funcionales o las operaciones individuales que hará el SM, y se representan en el esquema (figura [4.3]):

- Análisis de datos.
- Interfaz usuario con PC.
- Interfaz usuario con PLC.
- Conexión con PLC.
- Comunicación con sensores.
- Conexión con sensores.
- Comunicación con PC.
- Conexión con PC.
- Medición distancia l_1 .
- Medición distancia l_2 .
- Suministro de energía al sistema (CA y CD).

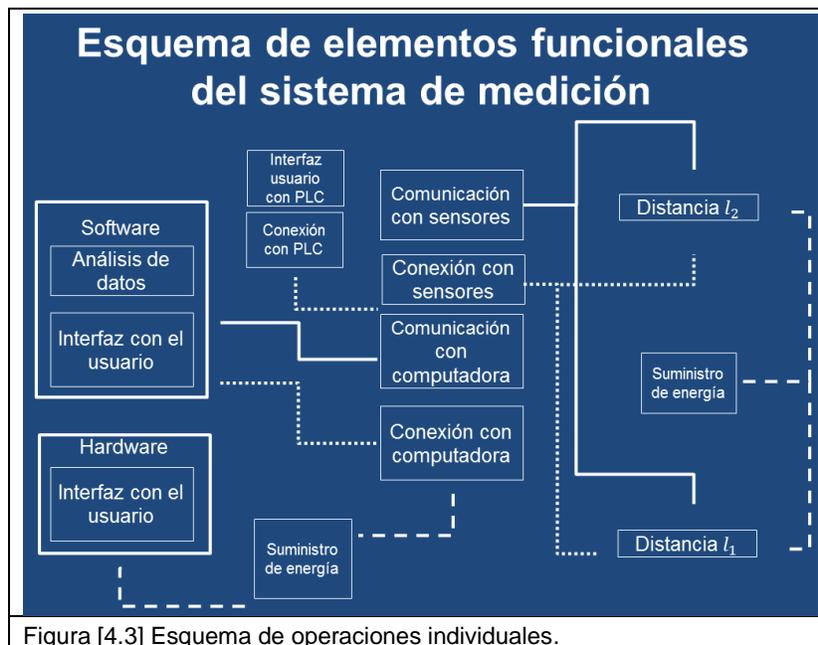


Figura [4.3] Esquema de operaciones individuales.

Paso 2. Agrupar los elementos del esquema

Ya que se tiene claro cuáles serán las funciones que hará el SM, ahora se requiere de las tecnologías específicas o elementos físicos que realizarán cada una de las funciones. Este paso también es llamado “reducción a componentes”. La siguiente lista explica la reducción a componentes de cada una de las operaciones individuales del SM, y se representan en el siguiente esquema (figura [4.4]):

- El análisis de datos se implementará con una PC.
- La interfaz usuario con PC será con ayuda del software y algún hardware como un monitor.
- La interfaz usuario con PLC será con un botón.
- La comunicación y conexión entre los sensores y la PC es por medio de PLC
- Cada sensor ultrasónico obtiene la medida de la distancia l_1 y l_2 respectivamente.
- El suministro de energía a la PC, el PLC, botón, sensores, y sus respectivas conexiones para datos, se realizará por medio de cables.
- La fuente de energía a los sensores se realizará por medio de una fuente de CD variable y simétrica, y para la PC y PLC con una fuente CA.

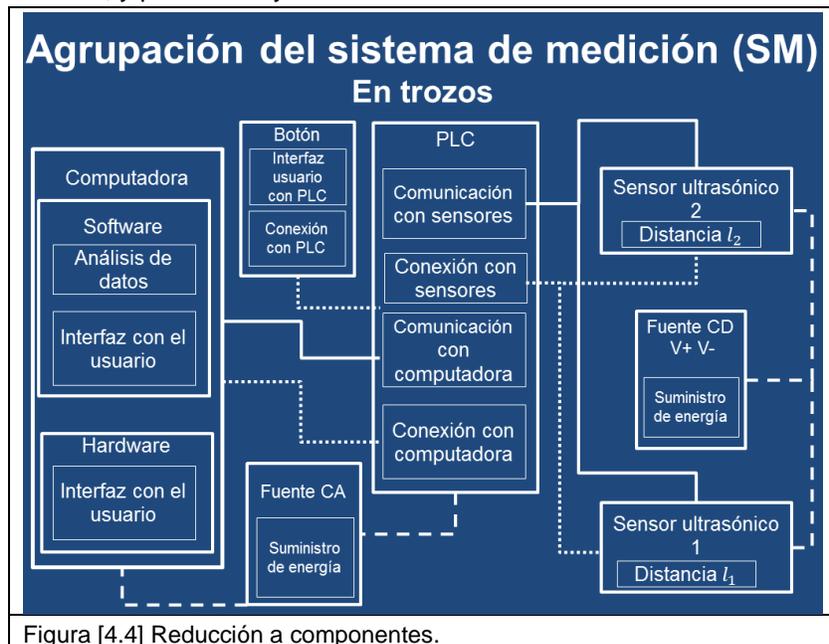


Figura [4.4] Reducción a componentes.

Paso 3. Crear una disposición geométrica aproximada

Al ser un prototipo que probará la base matemática del concepto, no me ocuparé del diseño industrial (ergonomía, estética, etc.) o del diseño para manufactura (material, costos de componentes, etc.), de tal modo que las disposiciones geométricas serán las medidas obtenidas de las hojas de especificaciones de los componentes.

873C ultrasonic proximity sensor

En la figura [4.5] observamos la relación entre la tensión de entrada con la distancia a la que el sensor podrá medir el objetivo. De tal forma que se requiere una fuente de voltaje variable a corriente directa en un rango de 0[V] a 10[V]. Podemos ver que la distancia mínima entre el sensor y un objeto es de 300[mm], usando una fuente de voltaje de corriente directa a 1 [V].

En la figura [4.6] se muestran la disposición física de los componentes y dimensiones del sensor ultrasónico.

En la figura [4.7] tenemos los dos sensores ultrasónicos 873C que se ocuparán para el experimento.

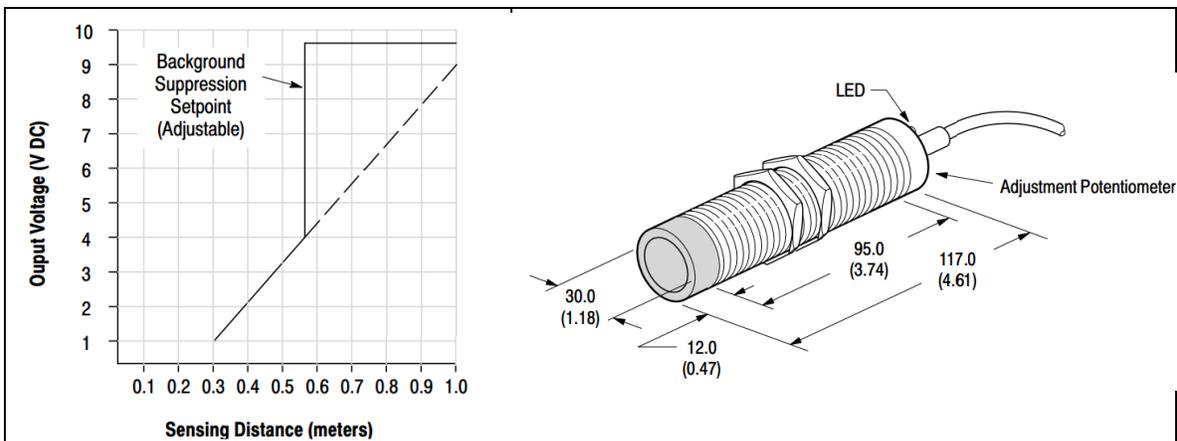


Figura [4.5] tomada de [21] Voltaje de salida analógico vs distancia del objetivo.

Figura [4.6] tomada de [21] Dimensiones – mm (inches).



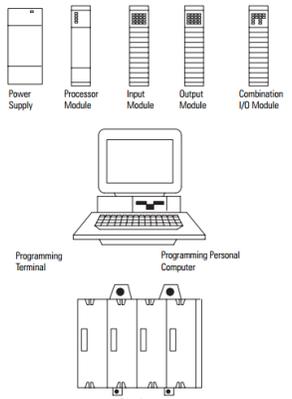
Figura [4.7] Sensores ultrasónicos de proximidad 873C.

Controlador lógico programable SLC 500 de Allen Bradley y Rockwell Automation

En la figura [4.8] observamos los componentes modulares de hardware.

En la figura [4.9] tenemos las especificaciones de los controladores del SLC 500.

En la figura [4.10] tenemos el PLC SLC 500 que se ocupará para el experimento. La programación la realizaré en “RSLogix 500”.



Especificaciones de los controladores SLC 500

Especificaciones	SLC 5/01	SLC 5/02	SLC 5/03	SLC 5/04	SLC 5/05
Número de catálogo 1747-	L511 L514 L524	L531 L532 L541 L542 L543	L551 L552 L553		
Tamaño de memoria (palabras)	1 K 4 K 4 K	8 K 16 K 16 K 32 K 64 K	16 K 32 K 64 K		
Corriente de backplane (mA) a 5 V	350 mA	500 mA	1000 mA		
Corriente de backplane (mA) a 24 V	105 mA		175 mA	0 mA	0 mA
E/S digitales, máx.	7880	8192			
Chasis/Paradas locales máx.	3/30				
Comunicaciones incorporadas	DH-485 Esclavo	DH-485	DH-485 y RS-232	DH+ y RS-232	Ethernet y RS-232
Opción de módulo de memoria			EEPROM		Flash EEPROM
Programación	RSLogix 500				
Instrucciones de programación	52	71	107		
Tiempo de escán típico*	8 ms/K	4.8 ms/K	1 ms/K	0.9 ms/K	
Tiempo de retención del escán del programa Después de corte de alimentación eléctrica	20 ms...3 s (depende de la carga de la fuente de alimentación eléctrica)				
Ejecución de bit (BIC)	4 µs	2.4 µs	0.44 µs	0.37 µs	
Precisión de reloj/calendario	N/A				

*Los tiempos de escán son típicos para un programa de lógica de escáner de 1 K que consiste en la lógica de escáner simple y los servicios de comunicación. Los tiempos de escán reales dependen del tamaño del programa, de las instrucciones usadas y del protocolo de comunicación.

Figura [4.8] tomada de [22] Modular hardware components.

Figura [4.9] tomada de [22] Especificaciones del SLC500.



Figura [4.10] Equipo SLC 500 del laboratorio de PLC del CDMIT.

Paso 4. Identificar las interacciones fundamentales e incidentales

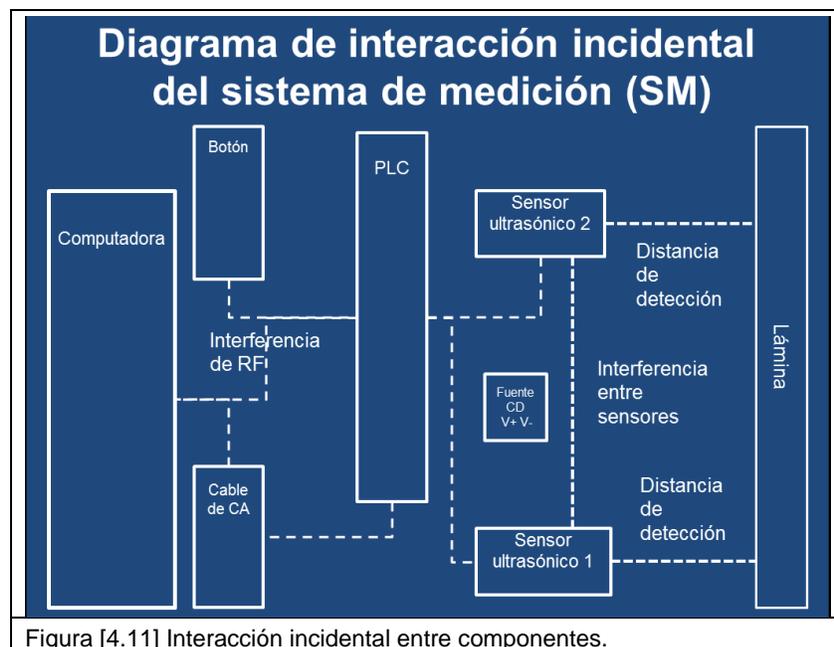
Existen dos categorías de interacciones entre trozos. La primera categoría son las interacciones fundamentales y son aquellas que están planeadas y que conectan los trozos unos con otros. La segunda categoría son las interacciones incidentales y se deben a la implementación física de los elementos funcionales, por ejemplo: vibración, distorsión térmica, interferencia.

La siguiente lista explica las interacciones fundamentales del SM implementado con el concepto estudiado:

- Longitud de los cables, donde podemos tener pérdidas de tensiones o algún falso contacto entre los trozos.
- La calibración de la fuente de CD que alimentará los sensores ultrasónicos, que a su vez repercutiría en la distancia máxima a la que se pueden medir los objetivos.

La siguiente lista explica las interacciones incidentales, y se representan en el esquema (figura [4.11]):

- La interferencia que pueda producir los sensores sobre los trozos.
- La interferencia que pueda producir un sensor sobre otro sensor.
- Calibrar la distancia de detección de cada sensor a la lámina.
- La naturaleza de la lámina.



4.3 PLANEACIÓN DEL PROTOTIPO

Para el desarrollador, un prototipo es una aproximación al producto en una o más dimensiones de interés [3], donde las “dimensiones” corresponden a: prototipos de conceptos, prototipos de diseño y prototipos de software. Los prototipos se pueden clasificar de acuerdo con el grado al que son físicos, oposición al analítico, y al grado en el que es integral, en oposición al enfocado.

Los prototipos físicos son objetos tangibles, construidos en un artefacto para pruebas y experimentación. Son usados para detectar fenómenos no anticipados. Los prototipos analíticos representan el producto en una forma no tangible, generalmente modelos matemáticos o bocetos de conceptos, siendo estos últimos más flexibles que los físicos.

Un prototipo integral es el que se proporciona a los clientes para identificar cualquier falla restante de diseño, antes de entrar a producción. Éstos son mejores para integración y alcance de metas. Los prototipos enfocados solo implementan una o unas pocas de las características totales del producto, generalmente se ocupan para visualizar la forma de un producto (cómo se ve) o para probar un fundamento (cómo funciona).

La siguiente tabla resume un método de cuatro pasos [3] para planear un prototipo durante el proyecto de desarrollo.

Prototipo piloto para el SM con el concepto: sensor ultrasónico y PLC	
	Probar que la base matemática “longitud de arco en un plano”, se puede implementar físicamente con dos sensores ultrasónicos 873C.
	Comprobar que los sensores ultrasónicos 873C son los trozos que cumplen los requerimientos del cliente para su SM deseado.
Paso 1.	Conocer cómo se comportan los dos sensores ultrasónicos 873C al utilizarse al mismo tiempo.
Propósito	Saber si la naturaleza del material afecta la medición.
	Saber si la divergencia de la onda acústica afecta las mediciones
Paso 2.	El prototipo se encuentra en la dimensión físico – enfocado, ya que solo probaré el fundamento matemático, sin ocuparme en el diseño industrial (ergonomía, estética, etc.) o del diseño para manufactura (material, costos de componentes, etc.).
Nivel de aproximación	
	Colocar dos sensores ultrasónicos 873C separados una distancia conocida. Cuando apriete un botón, cada sensor va a calcular la distancia comprendida entre el mismo y el objeto.
Paso 3.	Mediante un software especializado calcularé la longitud del objeto usando las medidas anteriores, basado en el teorema de Pitágoras.
Plan experimental	Las mediciones se repetirán 3 veces, para simular que los sensores se mueven, con la finalidad de sumar las longitudes obtenidas.
	Por último el software borra la memoria.
Paso 4.	El experimento se realizará en una sesión.
Calendario	

4.4 EXPERIMENTACIÓN

Esta sesión de experimentación, que se desarrolla en el laboratorio de PLC del CDMIT, se basa en calcular la longitud entre dos puntos en un plano usando dos sensores ultrasónicos 873C, separados a una distancia conocida " $d_1 = 160[mm]$ ", como se muestra en la figura [4.12].

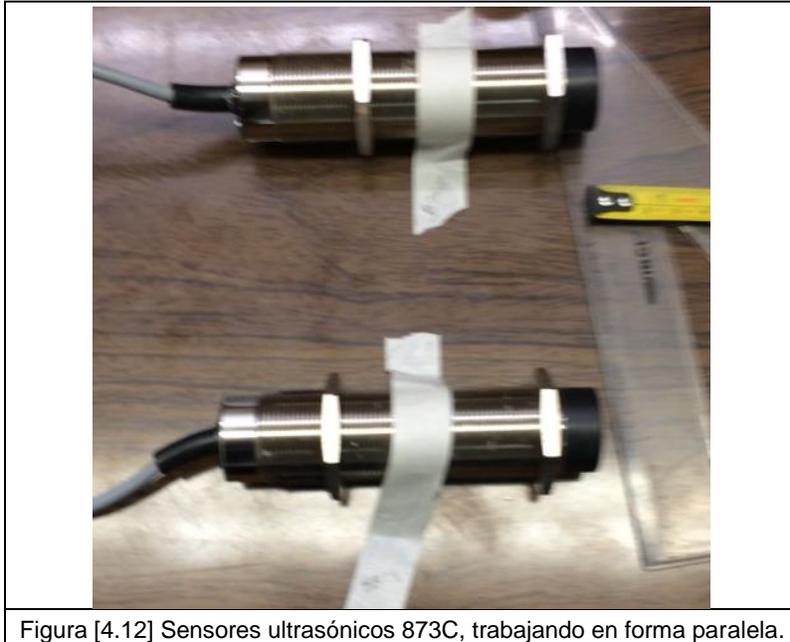
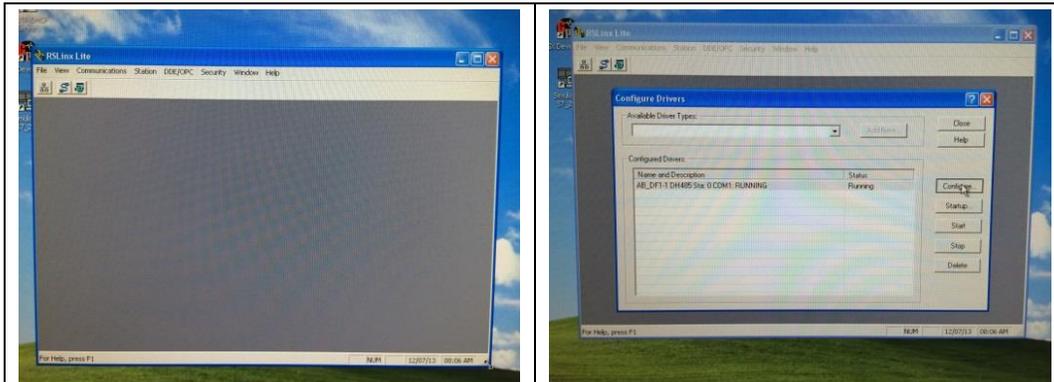


Figura [4.12] Sensores ultrasónicos 873C, trabajando en forma paralela.

Cuando apriete un botón, cada sensor va a calcular la distancia comprendida entre él mismo y la lámina. Para el sensor ultrasónico 1 tengo la distancia " l_1 " y para el sensor ultrasónico 2 tengo la distancia " l_2 ". La longitud de la lámina " L " entre los puntos de coordenadas " (l_2, d_1) " y " $(l_1, 0)$ " es:

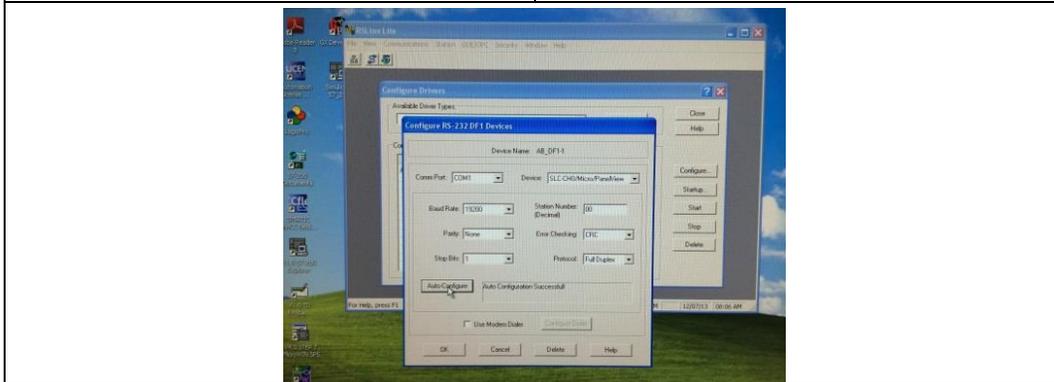
$$L = \sqrt{(l_2 - l_1)^2 + (d_1)^2}$$

La configuración del PLC SLC 500 con la PC se realizó en “RSLinx Lite” y consiste en detectar los controladores como se observa en las siguientes imágenes.



Paso 1

Paso 2



Paso 3

En “RSLogix 500” (figura [4.13]) realicé el software que muestro en las siguientes imágenes, para calcular la longitud entre dos puntos de la lámina, usando las medidas obtenidas por los sensores ultrasónicos 873C.

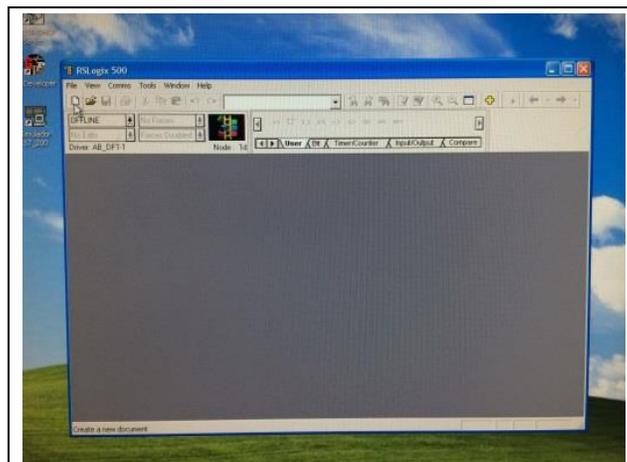
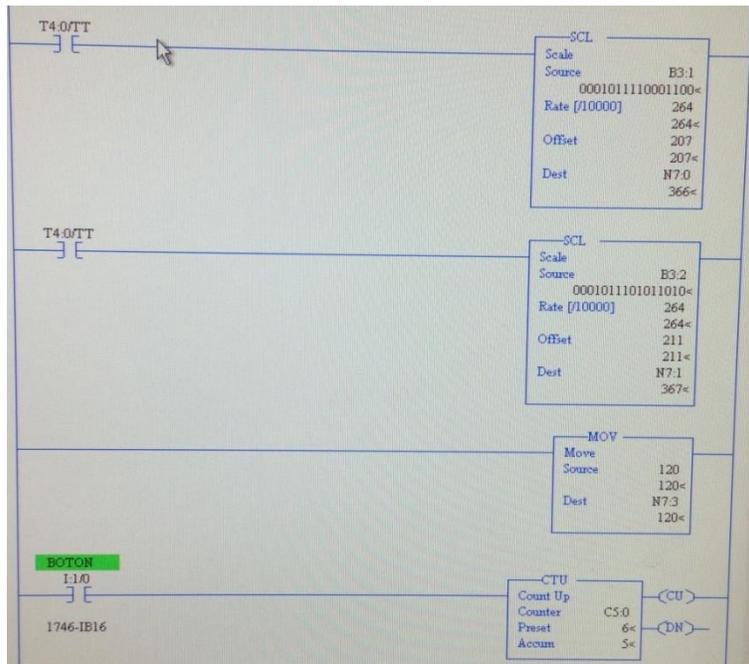
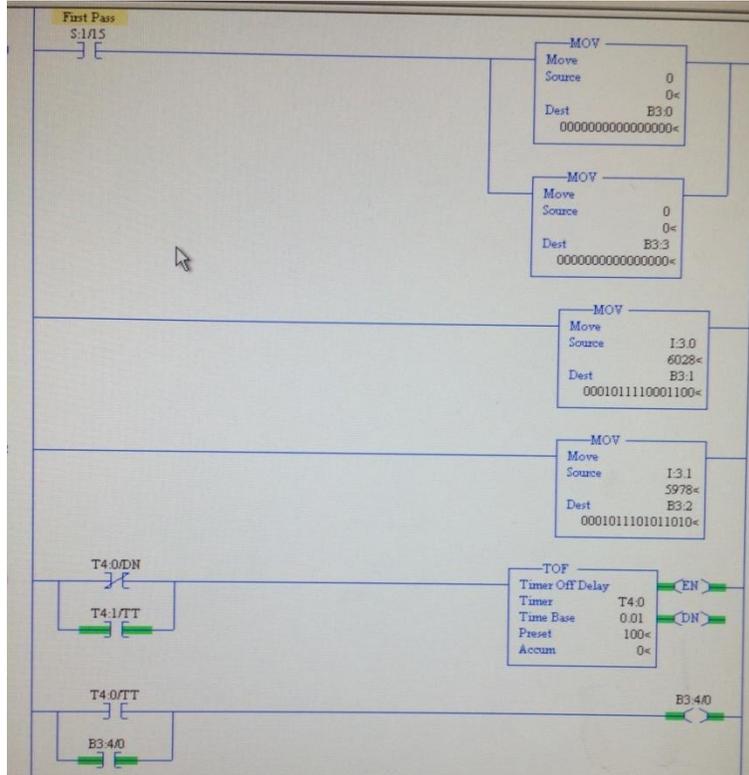
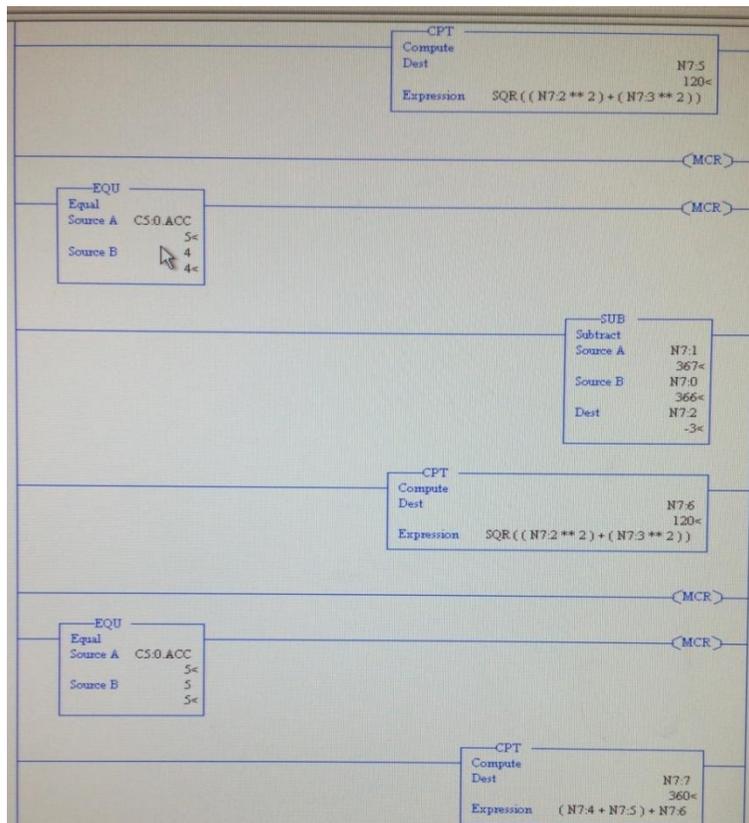
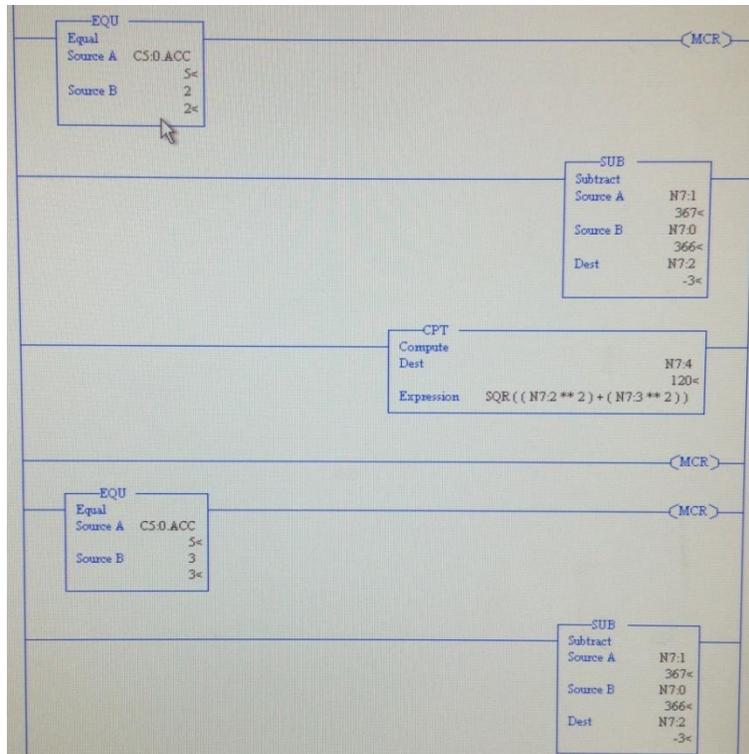
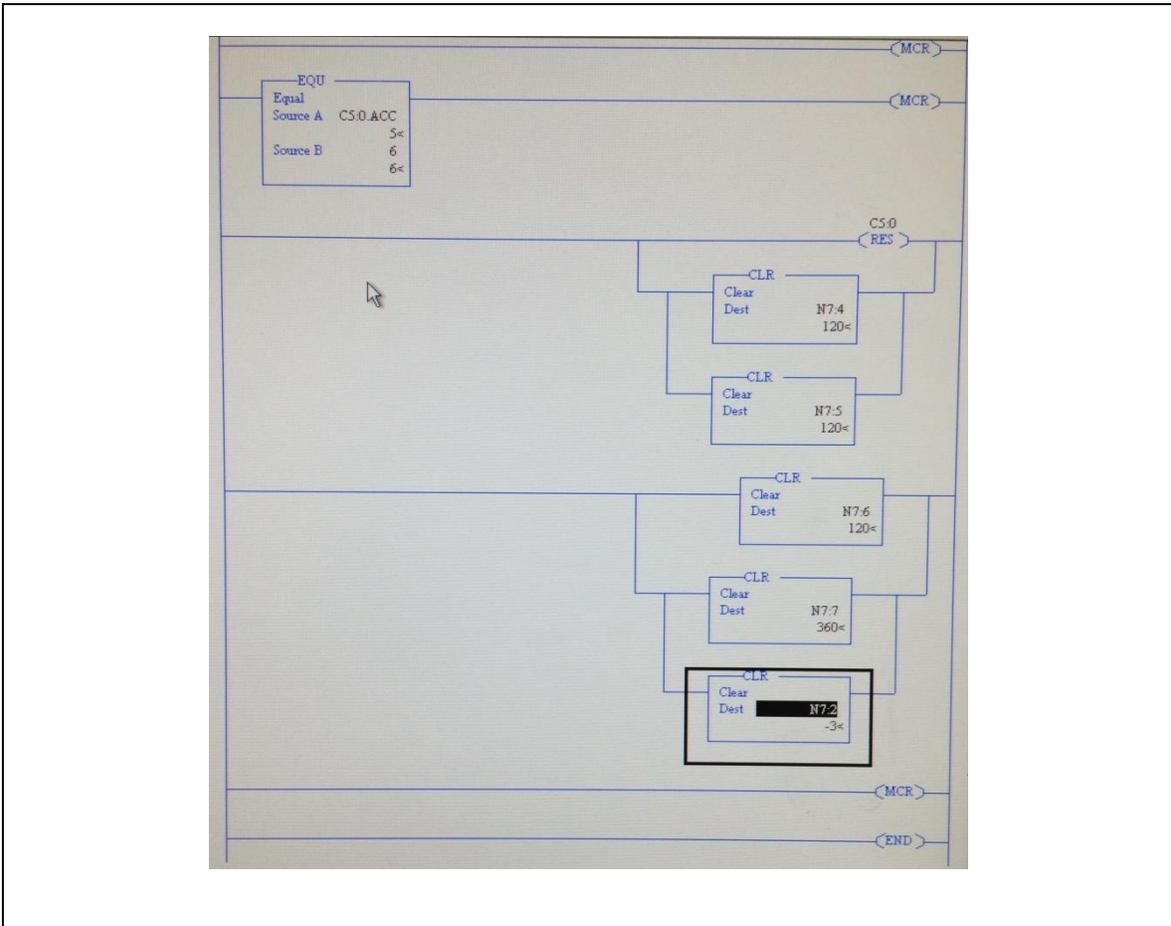


Figura [4.13] RSLogix 500

Programa para implementar la base matemática “longitud de arco en un plano” (teorema de Pitágoras) usando dos sensores ultrasónicos 873C.





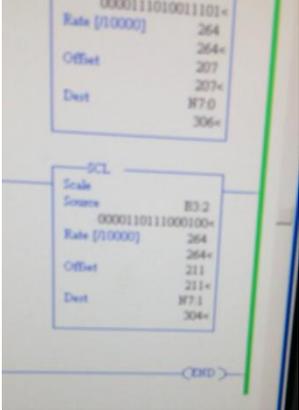
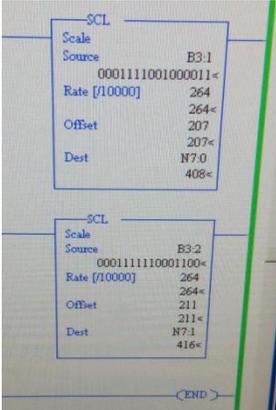
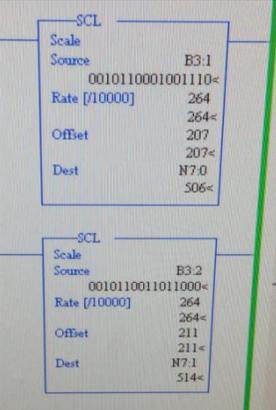


4.5 RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación son las respuestas a las ideas plasmadas en la tabla “Prototipo piloto para el SM con el concepto: sensor ultrasónico y PLC” del punto “4.3 Planeación del prototipo”.

1. Probar que la base matemática “longitud de arco en un plano”, se puede implementar físicamente con dos sensores ultrasónicos 873C.

Las mediciones que se realizaron usando los sensores ultrasónicos 873C, separados a una distancia conocida “ $d_1 = 160[mm]$ ”, son las siguientes (figura [4.14]):

		<p>%Error</p> $\frac{306 - 300}{300} \times 100 = 2\%$ $\frac{304 - 300}{300} \times 100 = 1.333\%$
<p>Medición de 300[mm] aproximadamente.</p>	<p>Los sensores obtienen 306[mm] y 304 [mm]</p>	<p>%Error</p> $\frac{408 - 401}{401} \times 100 = 1.746\%$ $\frac{416 - 401}{401} \times 100 = 3.741\%$
		<p>%Error</p> $\frac{506 - 510}{510} \times 100 = 0.784\%$ $\frac{514 - 510}{510} \times 100 = 0.784\%$
		<p>%Error</p> $\frac{506 - 510}{510} \times 100 = 0.784\%$ $\frac{514 - 510}{510} \times 100 = 0.784\%$
<p>Mientras que al inclinar el plano el ángulo máximo obtenido fue de 11.5[°].</p>		
<p>Figura [4.14] Mediciones con los sensores ultrasónicos 873C.</p>		

Con estas mediciones y viendo que el error más grande es de 3.741% se puede concluir que los resultados de las mediciones de distancias son bastantes precisas usando los sensores ultrasónicos 873C al mismo tiempo y de forma paralela a una distancia entre ellos de 160[mm]. Así se comprueba que las “propuestas de valor” como son: medición sin contacto; medidas obtenidas

de alta precisión (el valor marginal del porcentaje de error de medición va del 2.51% al 6%); minimizar riesgos de medición equivocada por fallas humanas; no ocupar escalas, guías, reglas en la carrocería; mínima interferencia por ruido ambiente; sistema robusto; se cumplen utilizando los sensores ultrasónicos 873C.

Es posible calcular la distancia entre dos puntos de una lámina con los sensores 873C, sin embargo no es posible realizar el cálculo de la longitud de arco en un plano con el concepto “sensor ultrasónico y PLC” y los sensores ultrasónicos 873C, ya que al acortar entre ellos la distancia d_1 en una cantidad menor a 150[mm] se presenta interferencia entre sus señales captadas. De tal manera que la resolución o la menor diferencia que puede percibirse de forma significativa [23] sería de 150[mm]. Así que las respuestas a las ideas del punto “4.3 Planeación del prototipo”:

2. Comprobar que los sensores ultrasónicos 873C son los trozos que cumplen los requerimientos del cliente para su SM deseado.
3. Conocer cómo se comportan los dos sensores ultrasónicos 873C al utilizarse a la vez.
4. Saber si la divergencia de la onda acústica afecta las mediciones.

Son las siguientes:

Los sensores ultrasónicos 873C no son los trozos que cumplen con los requerimientos del cliente, ya que la resolución que ellos buscan es del orden de milímetros (alta precisión) y los sensores entregan resolución en el orden de décímetros.

Los sensores 873C pueden utilizarse a la vez de forma paralela siempre y cuando la distancia d_1 sea mayor a 150[mm] ya que, debido a la divergencia de la onda acústica, se presenta interferencia si la distancia d_1 es menor a la mencionada.

Por último, la respuesta a la idea:

5. Saber si la naturaleza del material afecta la medición.

Es la siguiente:

Se puede observar en la figura [4.14] que la lámina que medí estaba cubierta de tela, además hice mediciones con láminas de acero, papel, madera y otros objetos opacos, resultando que la naturaleza del material no afecta las mediciones.

En conclusión, el sistema de medición no puede ser implementado con el concepto “sensor ultrasónico y PLC”, debido a todos los puntos antes mencionados y haciendo especial énfasis en que la resolución que obtengo no es óptima para medir deformaciones del orden de milímetros.

El siguiente concepto que estudiaré será “interferometría con láser y visión por computadora”.

CAPÍTULO 5

DISEÑO A NIVEL SISTEMA. INTERFEROMETRÍA CON LÁSER Y VISIÓN POR COMPUTADORA

Este capítulo tiene el propósito de experimentar de manera práctica el concepto “interferometría con láser y visión por computadora”, y los objetivos son los siguientes:

- Aprender de manera teórica y práctica sobre el concepto estudiado.
- Al tener un entendimiento teórico, poder comunicar lo aprendido.
- Integrar la tecnología necesaria para experimentar.
- Alcanzar las metas que requiere el cliente, en caso contrario reportar las razones.

Al igual que en el capítulo anterior, utilizaré la metodología: “prueba del concepto”, “arquitectura preliminar del prototipo”, “planeación del prototipo”, “experimentación y pruebas” y por último se muestran los “resultados” del estudio del concepto y la conclusión de implementar el SM con el concepto estudiado en este capítulo.

5.1 PRUEBA DEL CONCEPTO

Al igual que en el capítulo anterior, a continuación se presentará un proceso de siete pasos [3] para verificar si las necesidades del cliente, teóricamente han quedado satisfechas de manera adecuada.

Paso 1. Definir el propósito de la prueba de concepto

El propósito de la prueba es saber si el cliente está interesado en el concepto de “interferometría con láser y visión por computadora” como sistema de medición, de tal manera que las preguntas principales que requieren respuesta son:

- ¿Este concepto cubre tus necesidades de medición?
- ¿Tendrías alguna propuesta que podría mejorar el concepto?
- ¿Adquirirías un producto basado en este concepto?
- ¿Debo continuar el desarrollo de este concepto?

Y teniendo en cuenta que mis antecedentes son:

- La técnica de interferometría es un campo de estudio del cuál requiero más experiencia.
- La experiencia teórica y práctica que tengo con interferómetros es poca.
- Sé que la técnica es excelente para conocer superficies.
- Aunque los interferómetros se integran de pocos componentes, su calibración no es simple.
- Los componentes se encuentran en el laboratorio de pulsos cortos del CCADET, y conseguirlos para experimentar sería con autorización previa de los profesores encargados.

Paso 2. Seleccionar una población

La población de expertos se basa en desarrolladores de tecnología del CIA, ingenieros electrónicos, ingenieros mecánicos, ingenieros mecatrónicos, físicos.

Paso 3. Seleccionar un formato de consulta

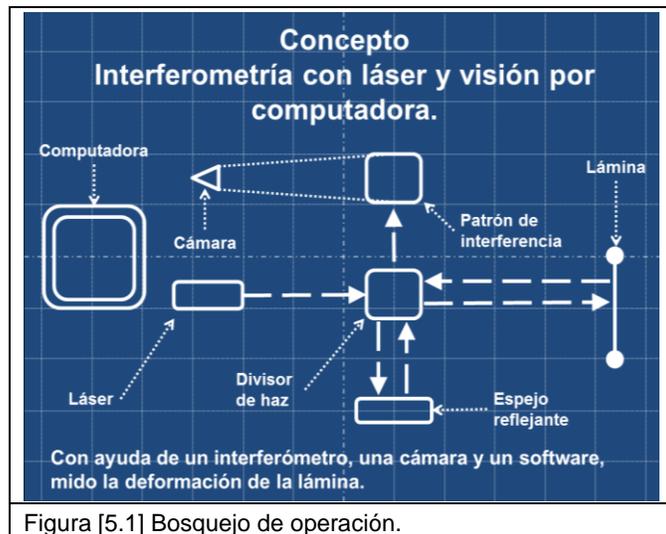
El formato de la consulta es “interacción personal” con la población antes mencionada en la UNAM, campus C.U. También me apoyo en el uso de un bosquejo del principio de operación figura [5.1] y una secuencia de imágenes donde explico el funcionamiento del software, figura [5.2].

Paso 4. Comunicar el concepto

El objetivo principal del proyecto es medir sin contacto, la deformación de una lámina. El concepto se basa en utilizar un interferómetro (un arreglo de espejos y un divisor de haz, que generan un patrón de interferencia), una cámara y un software para medir la deformación de la lámina, como se muestra en la figura [5.1].

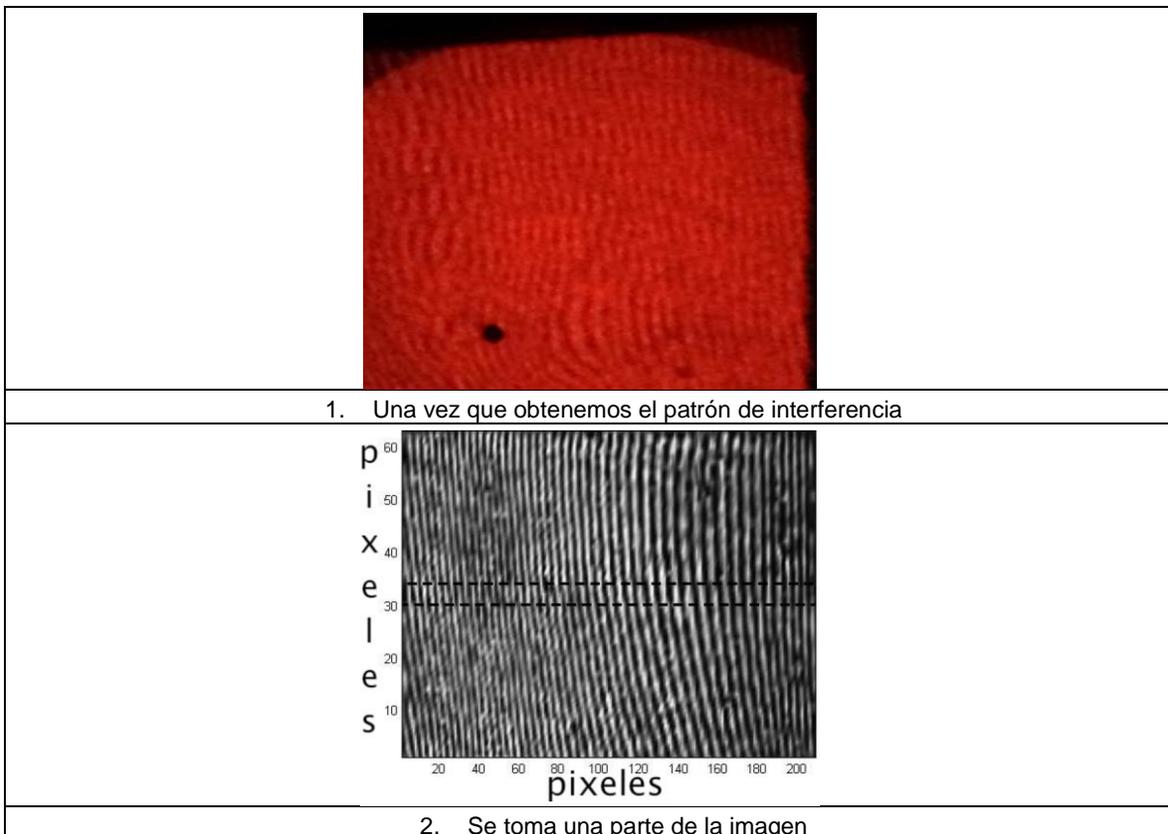
La interferometría es una técnica donde, a partir de patrones de interferencia debidos a las diferencias de fase que se tienen en caminos ópticos de diferentes haces de luz, se reconstruye la superficie del objeto [14].

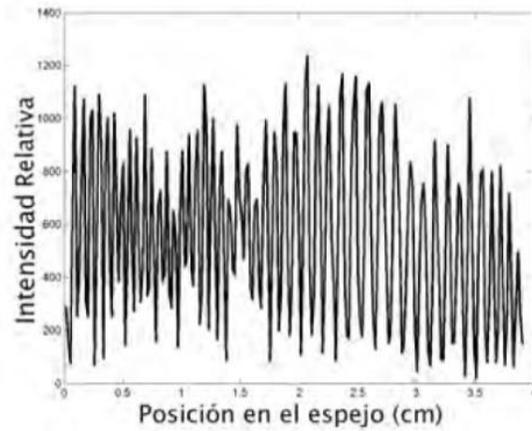
La interferencia es la combinación por superposición de dos o más ondas que se encuentran en un punto en el espacio.



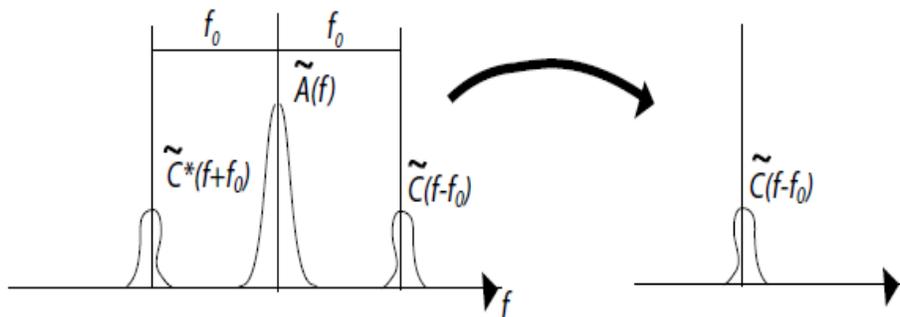
El bosquejo de operación muestra un interferómetro tipo Michelson, cuya configuración consiste en una fuente láser que emite una onda, que es dividida en dos por el divisor de haz. Un segmento llega a un espejo plano de referencia, el otro va hacia la superficie estudiada. Los rayos regresan y forman un patrón de interferencia que al operarlo matemáticamente con un software especializado, se obtiene la forma de la superficie estudiada en el orden de micrómetros.

La figura [5.2] muestra la secuencia matemática que hace el software:

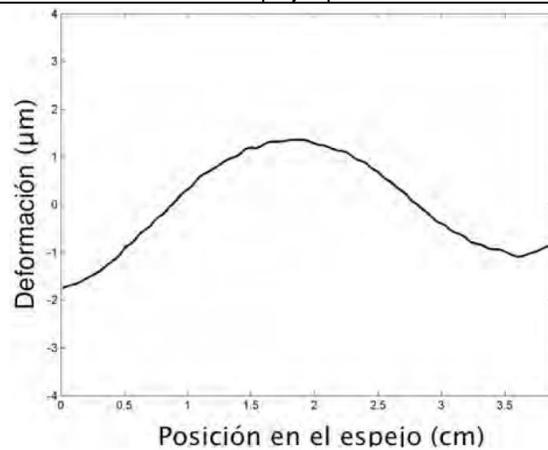




3. La imagen se integra para obtener una función intensidad vs posición del espejo



4. Se aplica la transformada de Fourier, se filtra la señal y se toma alguno de los espectros de la frecuencia portadora.
5. Se obtiene la transformada inversa de Fourier de la señal filtrada, dando como resultado el ángulo de la función compleja que da el cambio de fase.



6. El cambio de fase multiplicado por $\frac{2\pi}{\lambda}$ es la deformación del espejo.

Figura [5.2] Secuencia del software. Imágenes 2, 3, 4, 5, 6, tomadas de [25].

Paso 5. Agrupar la respuesta de la población

Los ingenieros y físicos me dan su visto bueno para hacer un prototipo y haga los experimentos necesarios para conocer las posibles interacciones incidentales, ya que teóricamente es una excelente solución.

Los desarrolladores de tecnología del CIA confían en que es un buen prototipo y les parece excelente que el orden de las medidas obtenidas esté en micrómetros.

Paso 6. Interpretar los resultados

El concepto de interferometría con láser y visión por computadora para conocer la forma de la superficie bajo estudio es una excelente propuesta, ya que teóricamente cubre las necesidades de medición.

Cuando elabore el prototipo y haga pruebas podré responder las siguientes preguntas:

- ¿Los elementos físicos son los correctos para lograr los alcances del concepto?
- ¿El interferómetro tipo Michelson es el adecuado para el SM?
- ¿La naturaleza de los materiales afecta la medición?
- ¿Cuáles son las interacciones incidentales que no estoy planteando?

Paso 7. Reflexionar sobre el proceso y los resultados

Al definir el propósito de la prueba obtuve las principales preguntas que requerían respuesta con la finalidad de saber si se debía continuar con el desarrollo de este concepto. Al igual que en el capítulo anterior, cada que comunicaba el concepto de forma oral, mejoraba la explicación y recibía la retroalimentación de inmediato.

La consulta despierta en mí la inquietud acerca de las interacciones incidentales que pueda tener al momento de experimentar. La interferometría es una excelente solución de la problemática ya que no requiere contacto para medir, y las medidas que se obtendrán teóricamente están en el orden de micrómetros, sin embargo, en caso de que el interferómetro de Michelson no cumpla con las necesidades del cliente, la siguiente versión del prototipo será inspección con luz estructurada.

5.2 ARQUITECTURA PRELIMINAR DEL PROTOTIPO

El siguiente método es una serie de cuatro pasos [3], cuya finalidad es tomar decisiones preliminares de la arquitectura, por ejemplo, una disposición geométrica aproximada, descripciones de los trozos principales y documentación de las interacciones clave entre los trozos. Se sabe que conforme se desarrolla el sistema y el diseño de detalle, la arquitectura seguirá evolucionando.

Paso 1. Crear un esquema del producto

La siguiente lista son los elementos funcionales o las operaciones individuales que hará el SM, y se representan en el esquema (figura [5.3]):

- Análisis de datos.
- Interfaz usuario con láser.
- Interfaz usuario con PC.
- Interfaz usuario con cámara.
- Fuente de haz de luz.
- División del haz de luz.
- Referencia para la interferencia.
- Proyección del patrón.
- Adquisición del patrón de interferencia.
- Conexiones para suministro de energía y datos.
- Suministro de energía al sistema (CA y CD).

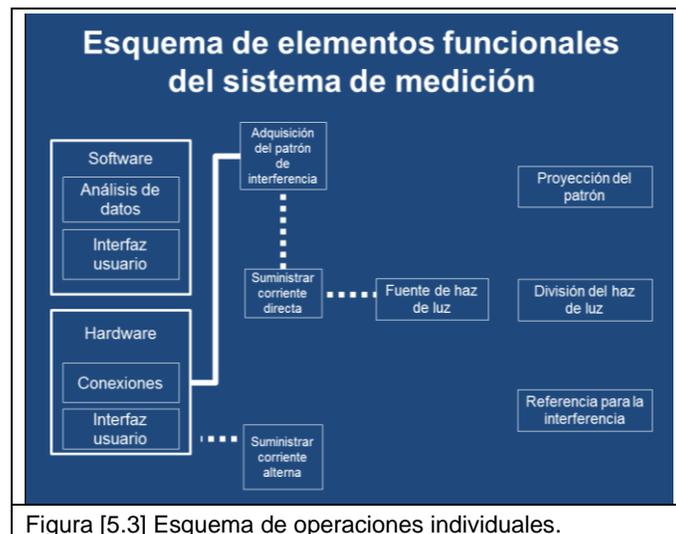
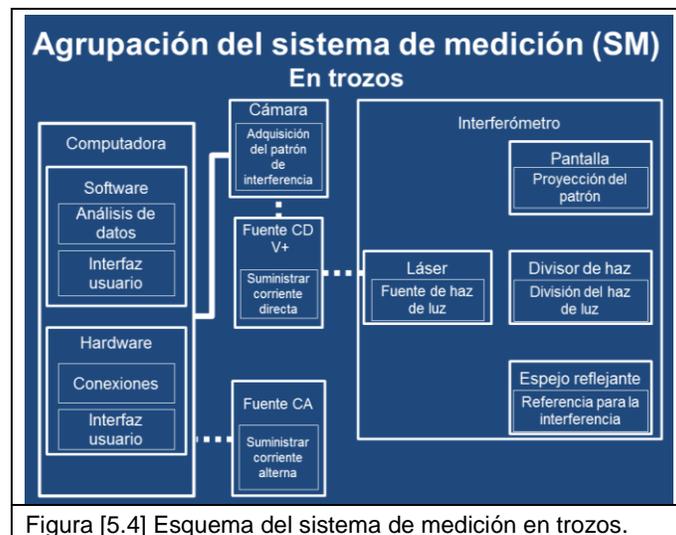


Figura [5.3] Esquema de operaciones individuales.

Paso 2. Agrupar los elementos del esquema

La siguiente lista explica la reducción a componentes de cada una de las operaciones individuales del SM, y se presentan en el siguiente esquema (figura [5.4]):

- La fuente de haz de luz se implementará con un láser helio-neón y será operada por el usuario con su switch on/off.
- La división del haz de luz se hará con un espejo divisor de haz 50 – 50.
- La referencia para la interferencia se efectuará con un espejo plano.
- La proyección del patrón de interferencia se realizará en un plano opaco.
- La adquisición del patrón se implementará con una cámara iSight y será operada por el usuario.
- El análisis de datos se implementará con una PC.
- La interfaz usuario con la PC será algún hardware como un monitor y un software especializado.
- El suministro de energía a la PC, láser y cámara, y sus respectivas conexiones para datos, se realizará por medio de cables.
- El suministro de energía al láser y cámara se realizará por medio de una fuente de CD, y para la PC con una fuente CA.

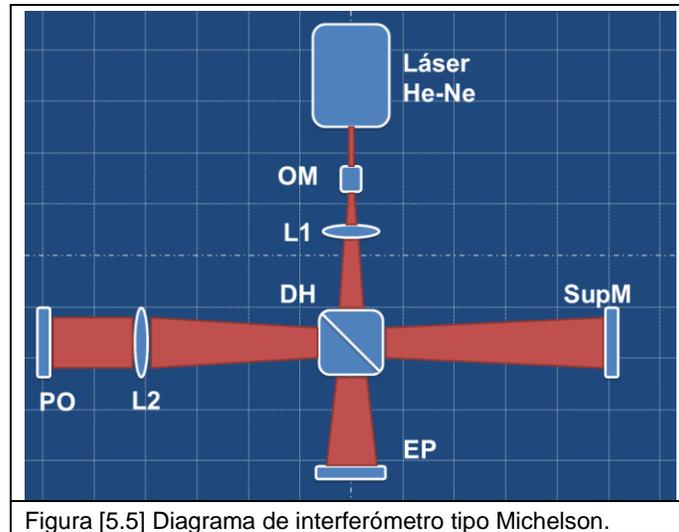


Paso 3. Crear una disposición geométrica aproximada

Al ser un prototipo que probará que el interferómetro tipo Michelson es adecuado para implementar el sistema de medición, no me ocuparé del diseño industrial (ergonomía, estética, etc.) o del diseño para manufactura (material, costos de componentes, etc.), de tal modo que las disposiciones geométricas del experimento serán montadas con base en [25], sin embargo se tienen ciertas diferencias en cuanto a los materiales empleados.

Interferómetro tipo Michelson

Como se puede ver en la figura [5.5], se ocupará un láser He-Ne de $632[nm]$, un objetivo de microscopio “OM” $20X$ con una abertura numérica de 0.4 con la finalidad de limpiar el haz, y una lente “L1” con una distancia focal y diámetro para ampliar el haz. Pasa por un divisor de haz “DH” 50 – 50 para longitud de onda $\lambda = 632[nm]$ que separa el haz en dos. Un rayo llega al espejo plano de referencia “EP” y el otro rayo a la superficie a medir “SupM”. Los rayos que regresan de los dos espejos, pasan por una lente “L2” que los colima y forman un patrón de interferencia sobre un plano opaco “PO”.



Cámara

La adquisición del patrón de interferencia se realizará con una cámara iSight de 8 megapíxeles con píxeles $1.5 [\mu]$ y una apertura $f/2.2$. Posee cubierta de cristal de zafiro para el lente, autoenfoco y control de exposición [26].

Paso 4. Identificar las interacciones fundamentales e incidentales

La siguiente lista explica las interacciones fundamentales del SM implementado con el concepto estudiado:

- Longitud de los cables, donde podemos tener pérdidas de tensiones o algún falso contacto entre los trozos.
- La calibración de la fuente de CD que alimentará el láser, que puede repercutir en que la iluminación del haz no sea homogénea.

La siguiente lista explica las interacciones incidentales:

- El polvo o suciedad en el ambiente, podría ensuciar los espejos, la cámara, la pantalla y con ello alterar las medidas reales.
- La vibración de la mesa de medición donde está el interferómetro.
- La naturaleza de la lámina.

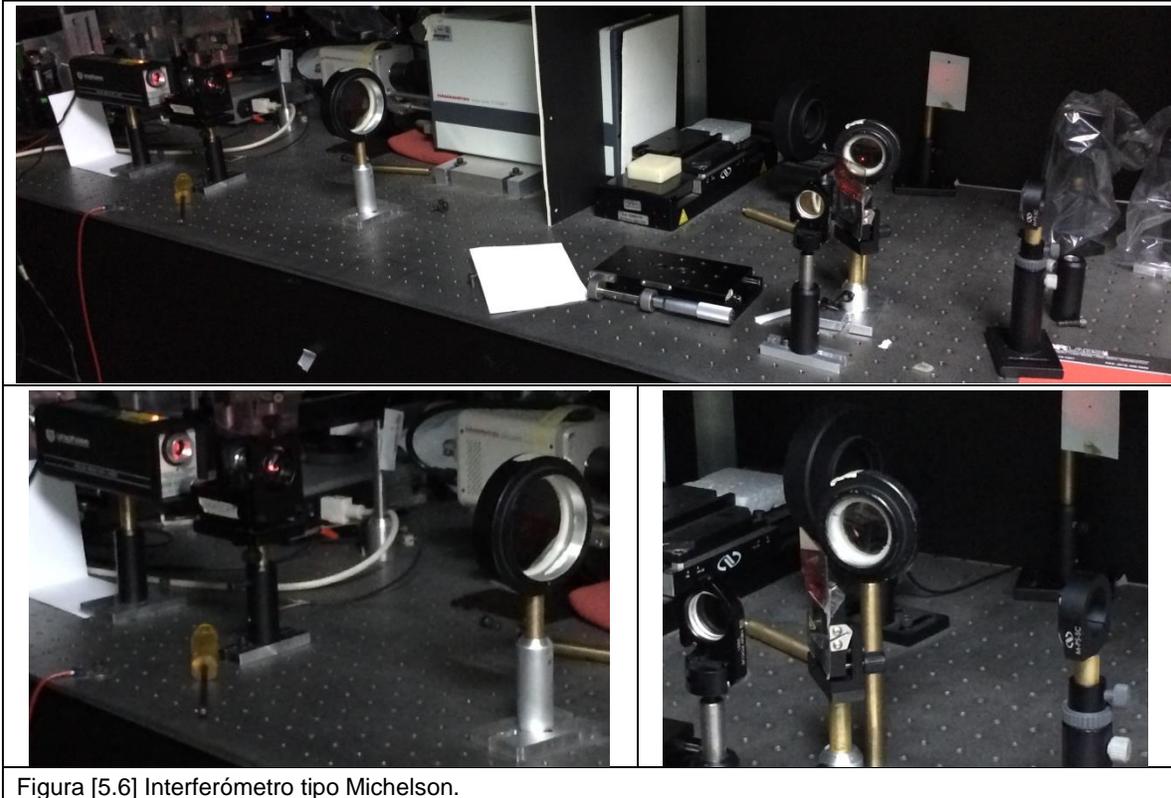
5.3 PLANEACIÓN DEL PROTOTIPO

La siguiente tabla resume un método de cuatro pasos [3] para planear un prototipo durante el proyecto de desarrollo.

Prototipo piloto para el SM con el concepto: interferometría con láser y visión por computadora.	
Paso 1. Propósito	Probar que el interferómetro tipo Michelson es el adecuado para implementar el SM.
	Comprobar que el interferómetro es el trozo que cumple con los requerimientos del cliente para su SM deseado.
	Saber si las interacciones incidentales planteadas no serán de gran repercusión para implementar el SM.
	Saber si existen otras interacciones incidentales que puedan afectar el funcionamiento del SM deseado.
	Saber si la naturaleza del material afecta la medición.
Paso 2. Nivel de aproximación	El prototipo se encuentra en la dimensión físico – enfocado, ya que solo probaré el fundamento teórico, sin ocuparme en el diseño industrial (ergonomía, estética, etc.) o del diseño para manufactura (material, costos de componentes, etc.).
Paso 3. Plan experimental	Se implementará el arreglo tipo Michelson para realizar mediciones y obtener las respuestas a las ideas planteadas en el “paso 1, propósito”.
	Con el interferómetro se medirán diferentes materiales.
	Se programará un software para el análisis del patrón de interferencia con el fin de obtener la forma de la superficie estudiada.
Paso 4. Calendario	El experimento se realizará en tres sesiones:
	En la primera sesión se implementará y calibrará el interferómetro tipo Michelson debido a su complejidad. La superficie a medir será un espejo plano.
	En la segunda sesión se medirán diferentes materiales.
	En la tercera sesión se analizarán los patrones de interferencia de las diferentes superficies estudiadas.

5.4 EXPERIMENTACIÓN

La primera y segunda sesión del experimento, que se realiza en el laboratorio de pulsos cortos del CCADET, se monta el interferómetro tipo Michelson, como se muestra en la figura [5.6], basado en la disposición geométrica del interferómetro, figura [5.5].



5.5 RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación son las respuestas a las ideas plasmadas en la tabla “Prototipo piloto para el SM con el concepto: interferometría con láser y visión por computadora” del punto “5.3 Planeación del prototipo”.

En la primera sesión se probó el concepto usando como superficie a medir “SupM” un espejo plano, con un tratamiento (plateado) de plata vaporizada para obtener un factor de reflexión [27] entre 90 – 95 %, con el cual obtuve el patrón de interferencia mostrado en la figura [5.7].

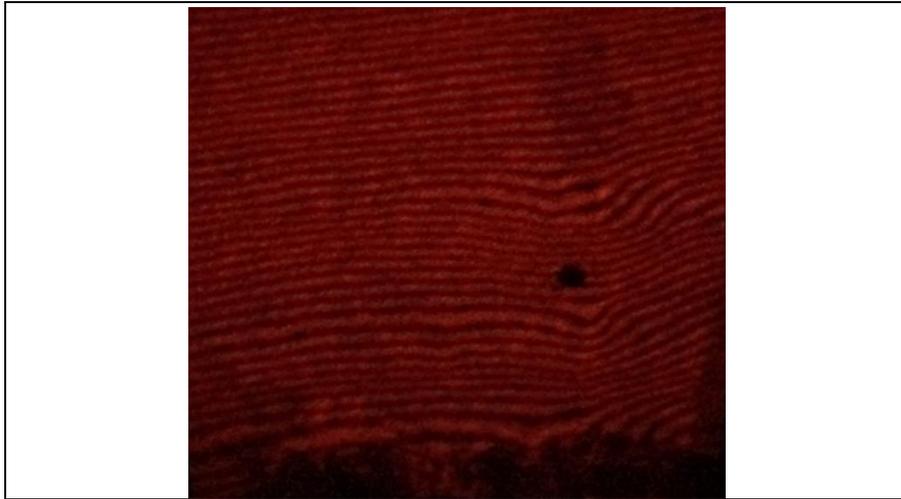


Figura [5.7] Patrón de interferencia de espejo plano, plateado con plata vaporizada

En la segunda sesión se probó el concepto usando diferentes materiales como superficie a medir "SupM", obteniendo los patrones de interferencia mostrados en la figura [5.8]:

Material, plateado, factor de reflexión	Patrón de interferencia
Espejo plano Plata vaporizada 90-95%	
Espejo plano Espejo 80-90%	

<p>Superficie de CD. Aluminio especular (superficie pulida) 75-85%</p>	
<p>Metal plano, navaja. Pintura de aluminio (superficie difusa) 60-70%</p>	
<p>Figura [5.8] Patrón de interferencia de diferentes materiales.</p>	

De tal manera que las respuestas a las ideas del punto “5.3 Planeación del prototipo”:

1. Probar que el interferómetro tipo Michelson es el adecuado para implementar el SM.
2. Comprobar que el interferómetro es el trozo que cumple con los requerimientos del cliente para su SM deseado.

Son las siguientes:

El interferómetro tipo Michelson no es el trozo adecuado para implementar el SM que los clientes requieren. La base de la afirmación anterior es expuesta al contestar las siguientes ideas:

3. Saber si las interacciones incidentales planteadas no serán de gran repercusión para implementar el SM.
4. Saber si existen otras interacciones incidentales que puedan afectar el funcionamiento del SM deseado.

Las interacciones incidentales que se presentan en el entorno: polvo en el ambiente, vibración por tocar la mesa de trabajo; sumadas a otras como son: hablar, aplaudir, la temperatura y humedad; generan en el patrón de interferencia alteraciones. Una forma de controlar algunas de

estas alteraciones es usando extractores de aire. Al preguntar a los profesores encargados del laboratorio sobre el porqué del extractor de aire, me han dicho que:

- El polvo del ambiente puede ensuciar los espejos, la cámara, el plano opaco y así afectar las mediciones; con el extractor se controla el polvo.
- Si la temperatura del ambiente varía bruscamente o en rangos extremos, los espejos pueden deformarse hasta quebrarse; el extractor mantiene regulada la temperatura y se reduce la humedad del ambiente.

Sin embargo las vibraciones que se presentan en los espejos al tocar la mesa, hablar o aplaudir no se podrían descartar en un laboratorio con ruido ambiente. Por lo tanto, las “propuestas de valor” como son: minimiza riesgos de medición equivocada por fallas humanas, soporta condiciones de temperatura y humedad relativa; mínima interferencia por ruido ambiente, sistema robusto; no se cumplen con esta tecnología.

5. Saber si la naturaleza del material afecta la medición.

La técnica es excelente para caracterizar superficies, sin embargo estas superficies requieren ser altamente reflectantes. Como se muestra en la figura [5.8] “patrón de interferencia de diferentes materiales” y usando la configuración del interferómetro descrita en figura [5.5] “diagrama de interferómetro tipo Michelson”, el patrón de interferencia se forma en superficies con un factor de reflexión mayor a 85% como son: espejos (80 – 90%), espejos planos con tratamiento de aluminio vaporizado (85 – 92%), plata vaporizada (90 – 95%) y prismas o reflectores totales (100%).

En el caso de superficies con un factor de reflexión menor a 85% como son: aluminio especular o superficies pulidas (75 – 85%), metales con pintura de aluminio (60 – 70%), no se forma el patrón de interferencia. Una manera de obtener el patrón de interferencia para caracterizar la forma de la lámina de una puerta de automóvil, sería revestir la lámina con aluminio vaporizado o plata vaporizada, lo cual tendría un costo extra y se requeriría de tiempo extra para realizar el plateado. Por lo tanto, las “propuestas de valor” como: tiempo de adquisición de datos menor que el de los SCMAD; no se requiere colocar escalas, guías, reglas, en la carrocería; costo de implementación conveniente; no se cumplirían.

En conclusión, el sistema de medición no puede ser implementado con el concepto “interferometría con láser y visión por computadora”, debido a todos los puntos antes mencionados y haciendo especial énfasis en que se requiere hacer el platinado a las láminas de los automóviles y en que las vibraciones del ambiente de trabajo generan en el patrón de interferencia alteraciones. Debido a ello se optó por no seguir con los experimentos de la tercera sesión.

El siguiente concepto que estudiaré será “inspección con luz estructurada”.

CAPÍTULO 6

DISEÑO A NIVEL SISTEMA. INSPECCIÓN CON LUZ ESTRUCTURADA

Este capítulo tiene el propósito de experimentar de manera práctica el concepto “inspección con luz estructurada”, y los objetivos son los siguientes:

- Aprender de manera teórica y práctica sobre el concepto estudiado.
- Al tener un entendimiento teórico, poder comunicar lo aprendido.
- Integrar la tecnología necesaria para experimentar.
- Alcanzar las metas que requiere el cliente, en caso contrario reportar las razones.

Al igual que en los capítulos anteriores, utilizaré la metodología: “prueba del concepto”, “arquitectura preliminar del prototipo”, “planeación del prototipo”, “experimentación y pruebas” y por último se muestran los resultados del estudio del concepto y la conclusión de implementar el SM con el concepto estudiado en este capítulo.

6.1 PRUEBA DEL CONCEPTO

A continuación se presenta un proceso de siete pasos [3] para verificar si las necesidades del cliente teóricamente han quedado satisfechas.

Paso 1. Definir el propósito de la prueba de concepto

El propósito de la prueba es saber si el cliente está interesado en el concepto de “inspección con luz estructurada” como sistema de medición, de tal manera que las preguntas principales que requieren respuesta son:

- ¿Este concepto cubre tus necesidades de medición?
- ¿Tendrías alguna propuesta que podría mejorar el concepto?
- ¿Adquirirías un producto basado en este concepto?
- ¿Debo continuar el desarrollo de este concepto?

Y teniendo en cuenta que mis antecedentes son:

- La técnica de luz estructurada es un campo de estudio del cuál requiero experiencia.
- La experiencia práctica que tengo con la luz estructurada es nula.
- En la materia de procesamiento digital de señales he trabajado en inspección visual.
- Podría aplicar la teoría de luz estructurada combinada con inspección visual.
- Poseo la mayoría de los materiales para hacer un prototipo rápido y la programación la realizaría en Wolfram Mathematica.

Paso 2. Seleccionar una población

La población de expertos se basa en desarrolladores de tecnología del CIA, ingenieros electrónicos, ingenieros mecánicos, ingenieros mecatrónicos y físicos.

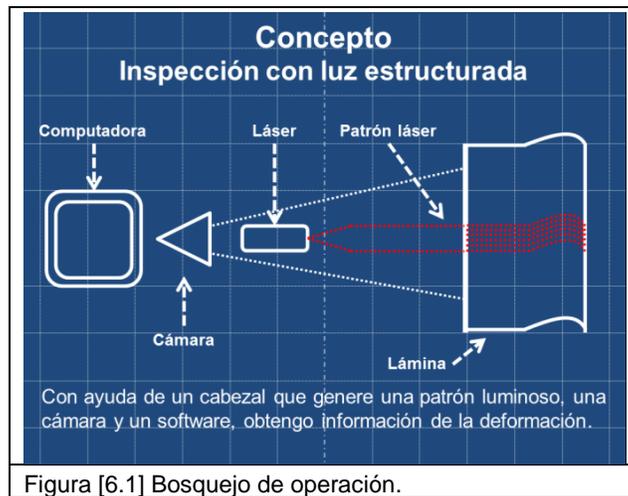
Paso 3. Seleccionar un formato de consulta

El formato de la consulta es “interacción personal” con la población antes mencionada en la UNAM, campus C.U. También me apoyo en el uso de un bosquejo del principio de operación figura [6.1] y el ejemplo mostrado en las figuras [6.2] – [6.3] y una secuencia de imágenes donde explico el funcionamiento del software, figura [6.4].

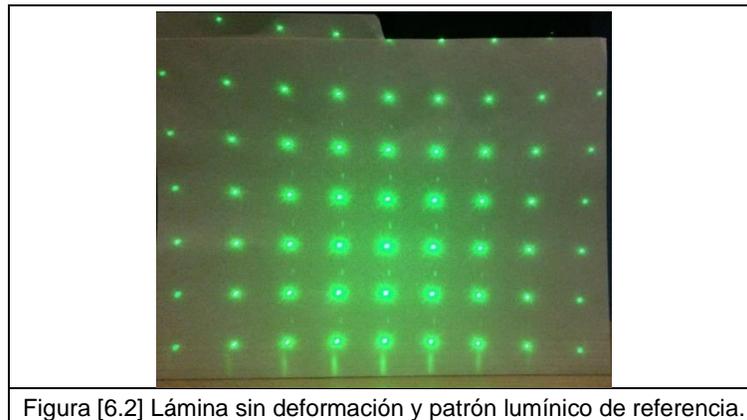
Paso 4. Comunicar el concepto

El objetivo principal del proyecto es medir sin contacto, la deformación de una lámina. El concepto se basa en proyectar un patrón de puntos o líneas de luz sobre la superficie a medir [14], si se presenta alguna alteración en el patrón luminoso reflejado se puede afirmar que existe una deformación en la superficie, y al analizar el patrón deformado se podría adquirir información, como se muestra en la figura [6.1].

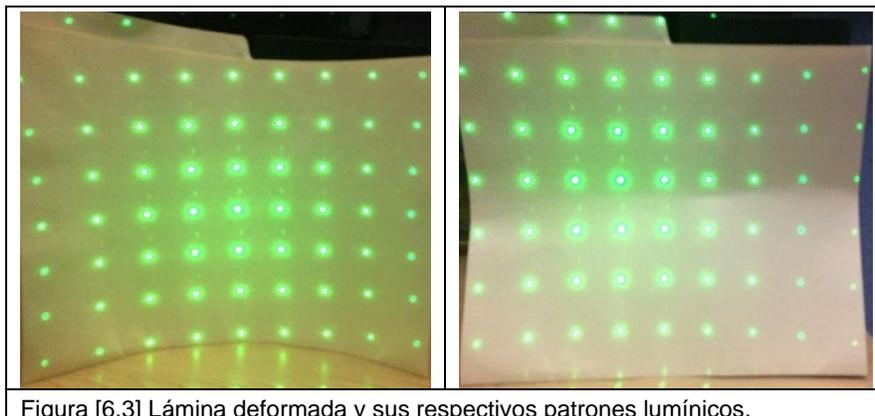
El bosquejo del principio de operación nos muestra que con ayuda de un cabezal para láser que genera un patrón de luz, una cámara y cierto software, puedo obtener información de la lámina, comparando dos imágenes adquiridas por la cámara tras cierta fracción de tiempo y observando la deformación del patrón lumínico.



Por ejemplo, dada la superficie mostrada en la figura [6.2] y aplicándole un patrón de puntos de luz, definimos la referencia lumínica.



Si a la superficie se le aplica una deformación, observaremos que los puntos se deforman o cambian de posición. En la figura [6.3] vemos del lado izquierdo la lámina con una deformación cóncava respecto a su eje vertical y a la derecha vemos la lámina con una deformación cóncava respecto a su eje horizontal.



De tal manera que si comparamos el patrón de referencia con los otros dos patrones, podríamos adquirir información en el orden de milímetros.

La técnica que usaré e implementaré con el software Wolfram Mathematica será inspección visual, y el proceso de esta técnica es: dadas dos imágenes y comparándolas pixel por pixel, nos da una tercera imagen que muestra a color las diferencias y en negro lo que queda igual, la figura [6.4] muestra el proceso:

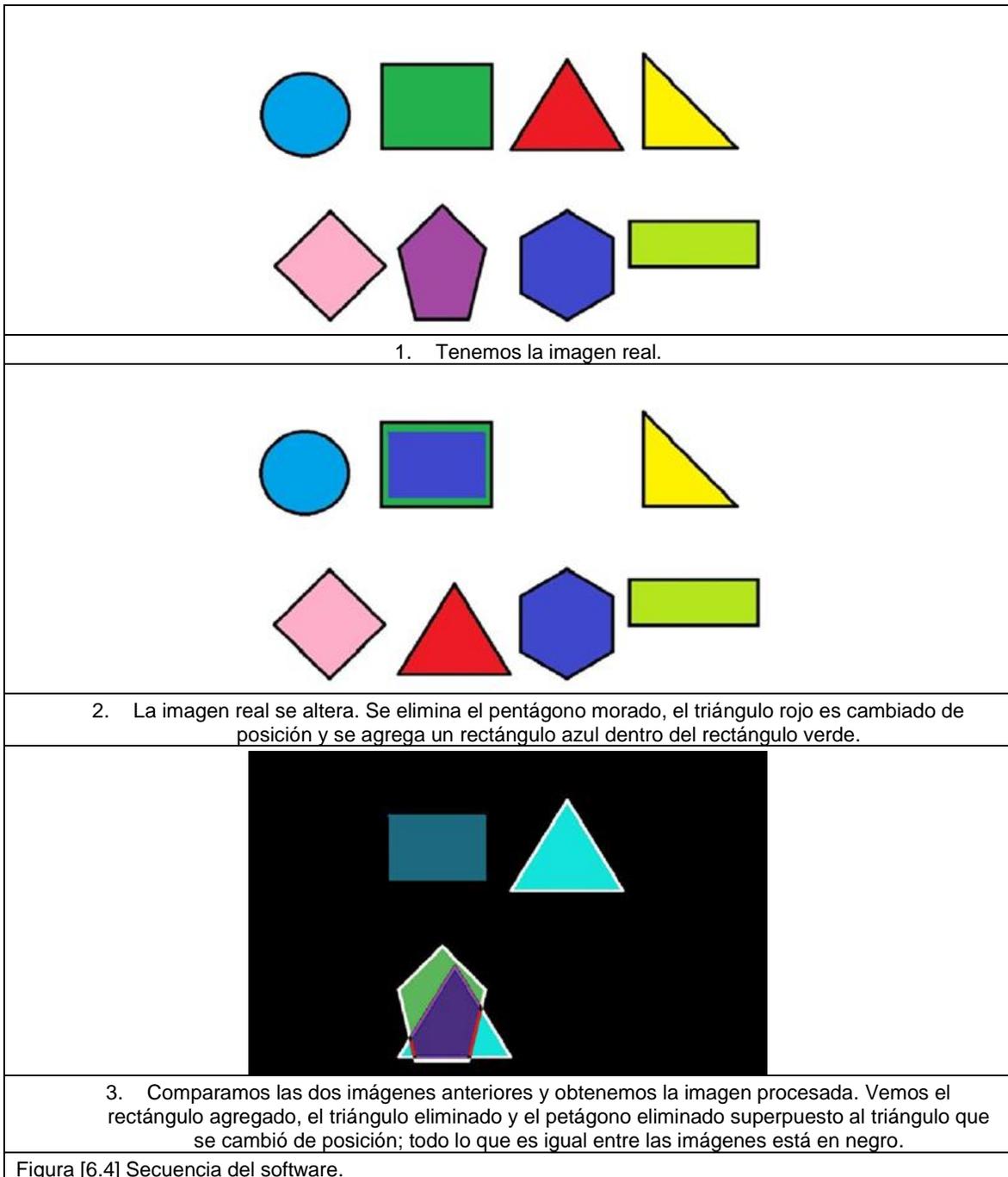


Figura [6.4] Secuencia del software.

Paso 5. Agrupar la respuesta de la población

Los ingenieros y físicos me dan su visto bueno para hacer un prototipo y haga los experimentos necesarios para conocer las posibles interacciones incidentales, ya que teóricamente es una buena solución.

Los desarrolladores de tecnología del CIA confían en que es un buen prototipo pero me hacen hincapié en mejorar la resolución de milímetros a micrómetros como en el caso del interferómetro.

Paso 6. Interpretar los resultados

El concepto de inspección con luz estructurada para conocer la deformación de la superficie bajo estudio es una propuesta que teóricamente resuelve las necesidades de medición.

Cuando elabore el prototipo y haga pruebas podré responder las siguientes preguntas:

- ¿Los elementos físicos son los correctos para lograr los alcances del concepto?
- ¿La naturaleza de los materiales afecta la medición?
- ¿Cuáles son las interacciones incidentales y fundamentales que no estoy planteando?
- ¿Podría mejorar la resolución de las mediciones?

Paso 7. Reflexionar sobre el proceso y los resultados

Al definir el propósito de la prueba obtuve las principales preguntas que requerían respuesta con la finalidad de saber si se debía continuar con el desarrollo de este concepto. Al igual que en el capítulo anterior, cada que comunicaba el concepto de forma oral, mejoraba la explicación y recibía la retroalimentación de inmediato.

La consulta despierta en mí la inquietud acerca de refinar el concepto estudiado con la finalidad de obtener mejor resolución en las mediciones. Mejorar el concepto me llevará a investigar más acerca de luz estructurada e inspección visual. Sin embargo realizar el prototipo preliminar me dirá si el concepto es adecuado para alcanzar las necesidades del cliente.

6.2 ARQUITECTURA PRELIMINAR DEL PROTOTIPO

El siguiente método es una serie de cuatro pasos [3], cuya finalidad es tomar decisiones preliminares de la arquitectura, por ejemplo, una disposición geométrica aproximada, descripciones de los trozos principales y documentación de las interacciones clave entre los trozos. Se sabe que conforme se desarrolla el sistema y el diseño de detalle, la arquitectura seguirá evolucionando.

Paso 1. Crear un esquema del producto

La siguiente lista son los elementos funcionales o las operaciones individuales que hará el SM, y se representan en el esquema (figura [6.5]):

- Análisis de datos.
- Interfaz usuario con PC.
- Interfaz usuario con láser.
- Interfaz usuario con cámara.
- Fuente de haz de luz.
- Generador de patrón lumínico.
- Adquisición del patrón lumínico.
- Conexiones para suministro de energía y datos.
- Suministro de energía al sistema (CA y CD).

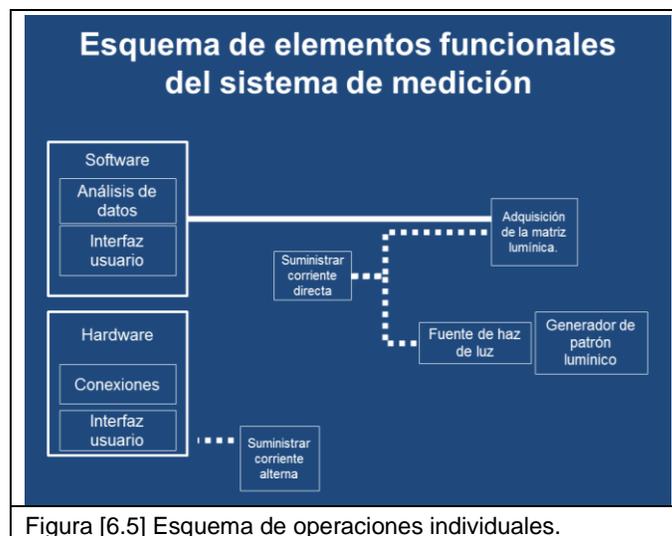
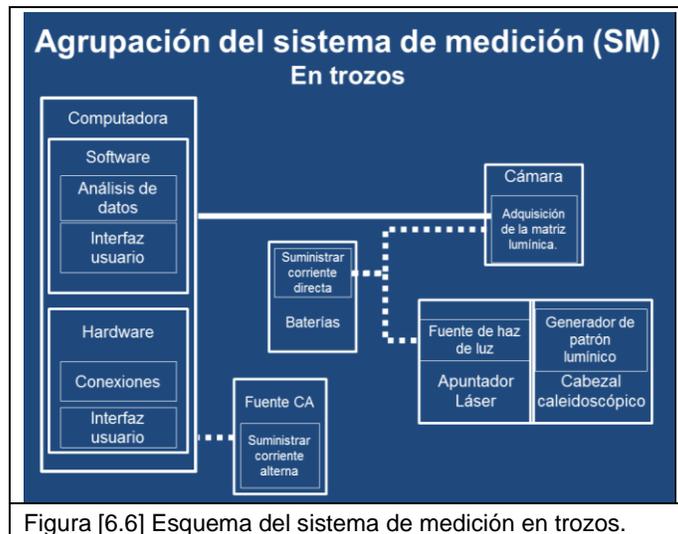


Figura [6.5] Esquema de operaciones individuales.

Paso 2. Agrupar los elementos del esquema

La siguiente lista explica la reducción a componentes de cada una de las operaciones individuales del SM, y se presentan en el siguiente esquema (figura [6.6]):

- La fuente de haz de luz se implementará con un apuntador láser y será operada por el usuario con su switch on/off.
- El generador del patrón lumínico será un cabezal caleidoscópico multipuntos.
- La adquisición del patrón lumínico se implementará con una cámara iSight y será operada por el usuario.
- El análisis de datos se implementará con una PC.
- La interfaz usuario con la PC será algún hardware como un monitor y un software especializado.
- El suministro de energía a la PC, láser y cámara, y sus respectivas conexiones para datos, se realizará por medio de cables.
- El suministro de energía al láser y cámara se realizará con la batería interna de cada aparato, y para la PC con una fuente CA.



Paso 3. Crear una disposición geométrica aproximada

Al ser un prototipo que probará que el concepto de “inspección con luz estructurada” es adecuado para implementar el sistema de medición, no me ocuparé del diseño industrial (ergonomía, estética, etc.) o del diseño para manufactura (material, costos de componentes, etc.), de tal modo que las disposiciones geométricas serán las medidas obtenidas de las especificaciones de los componentes.

Láser y cabezal

En la figura [6.7] observamos el puntero láser, con una longitud de onda de $532[nm] \pm 10$ resultando de color verde, una potencia de salida máxima $< 10[mW]$, con un alcance $< 15 [millas]$, onda continua, tensión de entrada $3[V]$, temperatura de operación $10 \sim 30[^\circ C]$, temperatura de almacenamiento $-10 \sim 50[^\circ C]$, [31].



Figura [6.7] tomada de [31] Puntero láser y cabezal.

Cámara

La adquisición del patrón de interferencia se realizará con una cámara iSight de 8 megapíxeles con píxeles $1.5 [\mu]$ y una apertura $f/2.2$. Posee cubierta de cristal de zafiro para el lente, autoenfoco y control de exposición [26].

Paso 4. Identificar las interacciones fundamentales e incidentales

La siguiente lista explica las interacciones fundamentales del SM implementado con el concepto estudiado:

- Longitud de los cables, donde podemos tener algún falso contacto entre los trozos.
- La carga de la batería que alimentará el láser, puede repercutir en que la iluminación del haz no sea homogénea.
- La posición del cabezal caleidoscópico.
- El grosor del haz.
- La distancia entre el láser y la lámina.
- La resolución de la cámara iSight

La siguiente lista explica las interacciones incidentales:

- El polvo o suciedad en el ambiente podría ensuciar la cámara y con ello alterar las medidas reales.
- La vibración de la mesa de medición donde está el láser.
- La naturaleza de la lámina.

6.3 PLANEACIÓN DEL PROTOTIPO

La siguiente tabla resume un método de cuatro pasos [3] para planear un prototipo durante el proyecto de desarrollo.

Prototipo piloto para el SM con el concepto: inspección con luz estructurada.	
Paso 1.	Probar que el prototipo rápido es adecuado para implementar el SM y cumple con los requerimientos del cliente.
Propósito	Saber si las interacciones fundamentales planteadas no serán de gran repercusión para implementar el SM.
	Saber si las interacciones incidentales podrían afectar de sobremanera el funcionamiento del SM deseado.
	Saber si la naturaleza del material afecta la medición.
Paso 2. Nivel de aproximación	El prototipo se encuentra en la dimensión físico – enfocado, ya que solo probaré el fundamento teórico, sin ocuparme en el diseño industrial (ergonomía, estética, etc.) o del diseño para manufactura (material, costos de componentes, etc.).
	Se implementará el prototipo rápido con un patrón de líneas de luz verticales.
Paso 3. Plan experimental	La lámina se deformará de forma cóncava y convexa respecto a su eje vertical y su eje horizontal. Mediante un software especializado podré adquirir información de la lámina.
	Se realizará el paso anterior con el patrón de líneas de luz horizontales.
Paso 4. Calendario	El experimento se realizará en una sesión.

6.4 EXPERIMENTACIÓN

En esta sesión de experimentación, que se desarrolla de forma casera, se monta el puntero láser en una base improvisada de dos sargentos [28], y por seguridad de operación, recordando que la visión directa del haz puede ser peligrosa para los ojos, se hace una cabina de polipropileno negro opaco ya que es un material opaco con un factor de reflexión por debajo del 3%, como se muestra en la figura [6.8]



Figura [6.8] Cabina negra de seguridad y base con dos sargentos.

La lámina a medir es del mismo material (polipropileno negro opaco), el cual es lo suficientemente flexible para ser deformado.

En “Wolfram Mathematica 10 student edition” [29,30] (figura [6.9]) realicé el software que muestro en las siguientes imágenes, para obtener información de la lámina usando el patrón de luz láser.

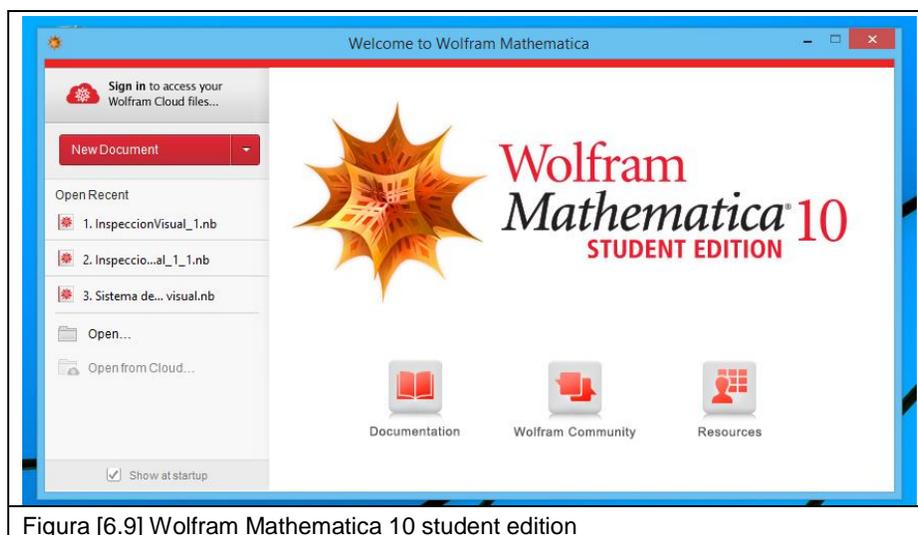


Figura [6.9] Wolfram Mathematica 10 student edition

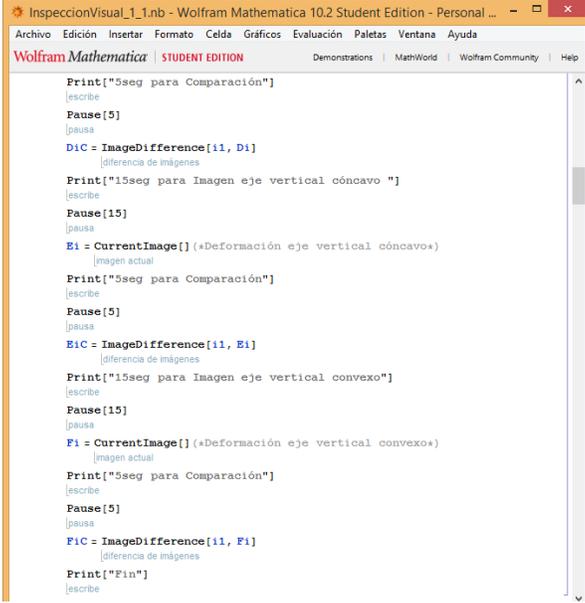
Programa para implementar el prototipo rápido del concepto: inspección con luz estructurada.

```
InspeccionVisual_1.nb - Wolfram Mathematica 10.2 Student Edition - Personal ...
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
Wolfram Mathematica STUDENT EDITION Demonstrations MathWorld Wolfram Community Help

(*Sistema de inspección Visual*)
(*Adquirir imágenes con cámara*)
(*i1=CurrentImage[]
  Pause[10]:
i2=CurrentImage[]*)
(*Adquirir imágenes guardadas en la compu
  i1=Import["i1.jpg"];
  i2=Import["i2.jpg"];
ImageDifference[i1,i2]*)
(*Inspección: i1->imagen patron, i2-> imagen con distorsión,
  i1C -> imagen comparada*)
Print["5seg para imagen patrón"]
[escribe
  Pause[5]
  [pausa
  i1 = CurrentImage[] (*lámina no deformada, láser vertical*)
  [imagen actual
  Print["5seg para Imagen sin deformación"]
  [escribe
  Pause[5]
  [pausa
  Ai = CurrentImage[] (*Sin deformación 5seg después*)
  [imagen actual
  Print["5seg para Comparación"]
  [escribe
  Pause[5]
  [pausa
  AiC = ImageDifference[i1, Ai] (*Comparación*)
  [diferencia de imágenes
  Print["15seg para Imagen sin deformación "]
  [escribe
```

```
InspeccionVisual_1.nb - Wolfram Mathematica 10.2 Student Edition - Personal ...
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
Wolfram Mathematica STUDENT EDITION Demonstrations MathWorld Wolfram Community Help

Pause[15]
[pausa
  Bi = CurrentImage[] (*Sin deformación 15seg después*)
  [imagen actual
  Print["5seg para Comparación"]
  [escribe
  Pause[5]
  [pausa
  BiC = ImageDifference[i1, Bi]
  [diferencia de imágenes
  Print["15seg para Imagen eje horizontal cóncavo "]
  [escribe
  Pause[15]
  [pausa
  Ci = CurrentImage[] (*Deformación eje horizontal cóncavo*)
  [imagen actual
  Print["5seg para Comparación"]
  [escribe
  Pause[5]
  [pausa
  CiC = ImageDifference[i1, Ci]
  [diferencia de imágenes
  Print["15seg para Imagen eje horizontal convexo "]
  [escribe
  Pause[15]
  [pausa
  Di = CurrentImage[] (*Deformación eje horizontal convexo*)
  [imagen actual
  Print["5seg para Comparación"]
  [escribe
  Pause[5]
  [pausa
```



```
InspeccionVisual_1_1.nb - Wolfram Mathematica 10.2 Student Edition - Personal ...
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda
Wolfram Mathematica | STUDENT EDITION | Demonstrations | MathWorld | Wolfram Community | Help

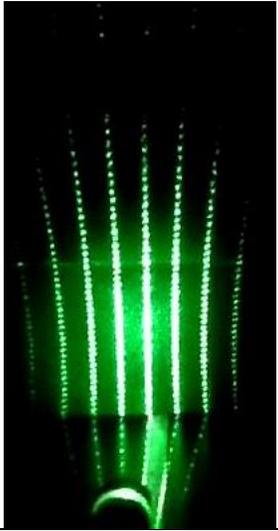
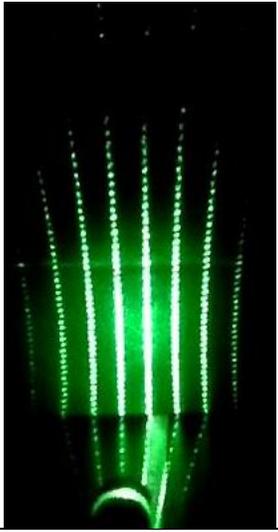
Print["5seg para Comparación"]
[escribe]
Pause[5]
[pausa]
D1C = ImageDifference[11, D1]
[diferencia de imágenes]
Print["15seg para Imagen eje vertical cóncavo "]
[escribe]
Pause[15]
[pausa]
E1 = CurrentImage[] (*Deformación eje vertical cóncavo*)
[imagen actual]
Print["5seg para Comparación"]
[escribe]
Pause[5]
[pausa]
E1C = ImageDifference[11, E1]
[diferencia de imágenes]
Print["15seg para Imagen eje vertical convexo"]
[escribe]
Pause[15]
[pausa]
F1 = CurrentImage[] (*Deformación eje vertical convexo*)
[imagen actual]
Print["5seg para Comparación"]
[escribe]
Pause[5]
[pausa]
F1C = ImageDifference[11, F1]
[diferencia de imágenes]
Print["Fin"]
[escribe]
```

6.5 RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación son las respuestas a las ideas plasmadas en la tabla “Prototipo piloto para el SM con el concepto: inspección con luz estructurada” del punto “6.3 Planeación del prototipo”.

1. Probar que el prototipo rápido es adecuado para implementar el SM y cumple con los requerimientos del cliente.

La técnica de luz estructurada con el patrón de líneas de luz verticales se ha combinado con inspección visual implementada con el software de Wolfram Mathematica, dando como resultado las siguientes imágenes:

		
<p>A) Lámina sin deformación, láser vertical</p>	<p>A) Sin deformación 5 seg después</p>	<p>A) Comparación</p>
		
<p>B) Lámina sin deformación, láser vertical</p>	<p>B) Sin deformación 15seg después</p>	<p>B) Comparación</p>

Como se puede ver en la secuencia de imágenes “A)” y “B)”, al comparar la imagen patrón, donde se tiene la lámina sin deformación, con la imagen de la lámina sin deformación tras 5 [s] y 15[s], notamos la presencia de puntos tenues de color verde, blanco y fucsia, que forman el perímetro de las líneas anchas del patrón de luz y en la parte baja de las imágenes unos pocos puntos tenues que forman el contorno del cabezal caleidoscópico, como podemos ver en la figura [6.10].

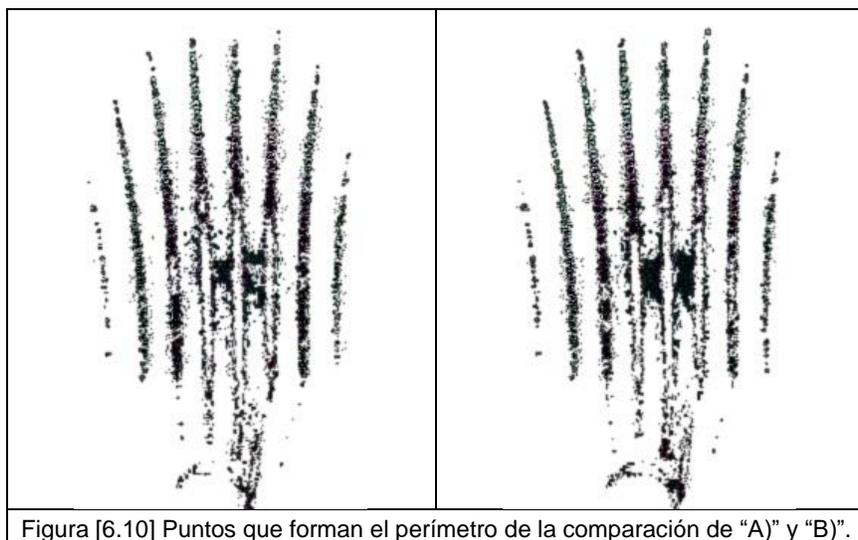
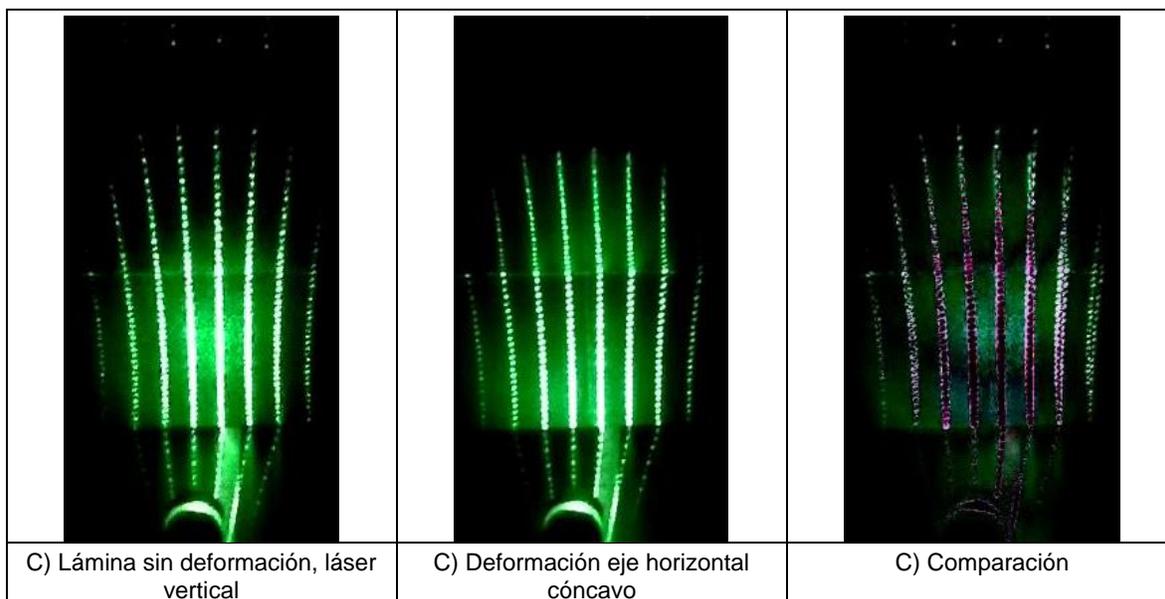
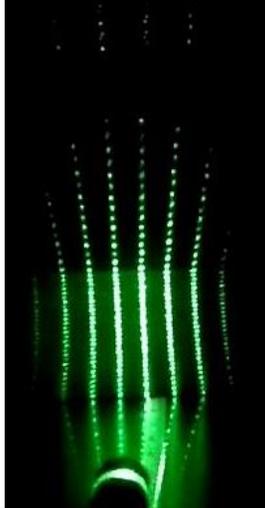
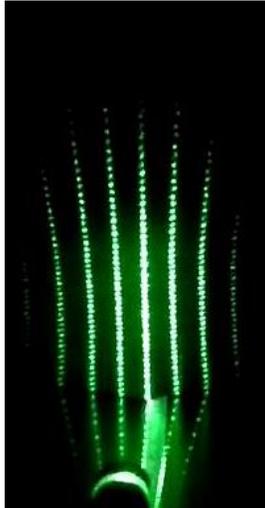


Figura [6.10] Puntos que forman el perímetro de la comparación de "A" y "B".

Estos puntos se deben a que la iluminación del haz no es homogénea. Una forma, a probar, para mejorar la iluminación sería cambiar la fuente de tensión de baterías a una fuente de CD regulada o cambiar el puntero láser por un láser de calidad profesional, el inconveniente de esta última propuesta es fabricar el cabezal caleidoscópico.

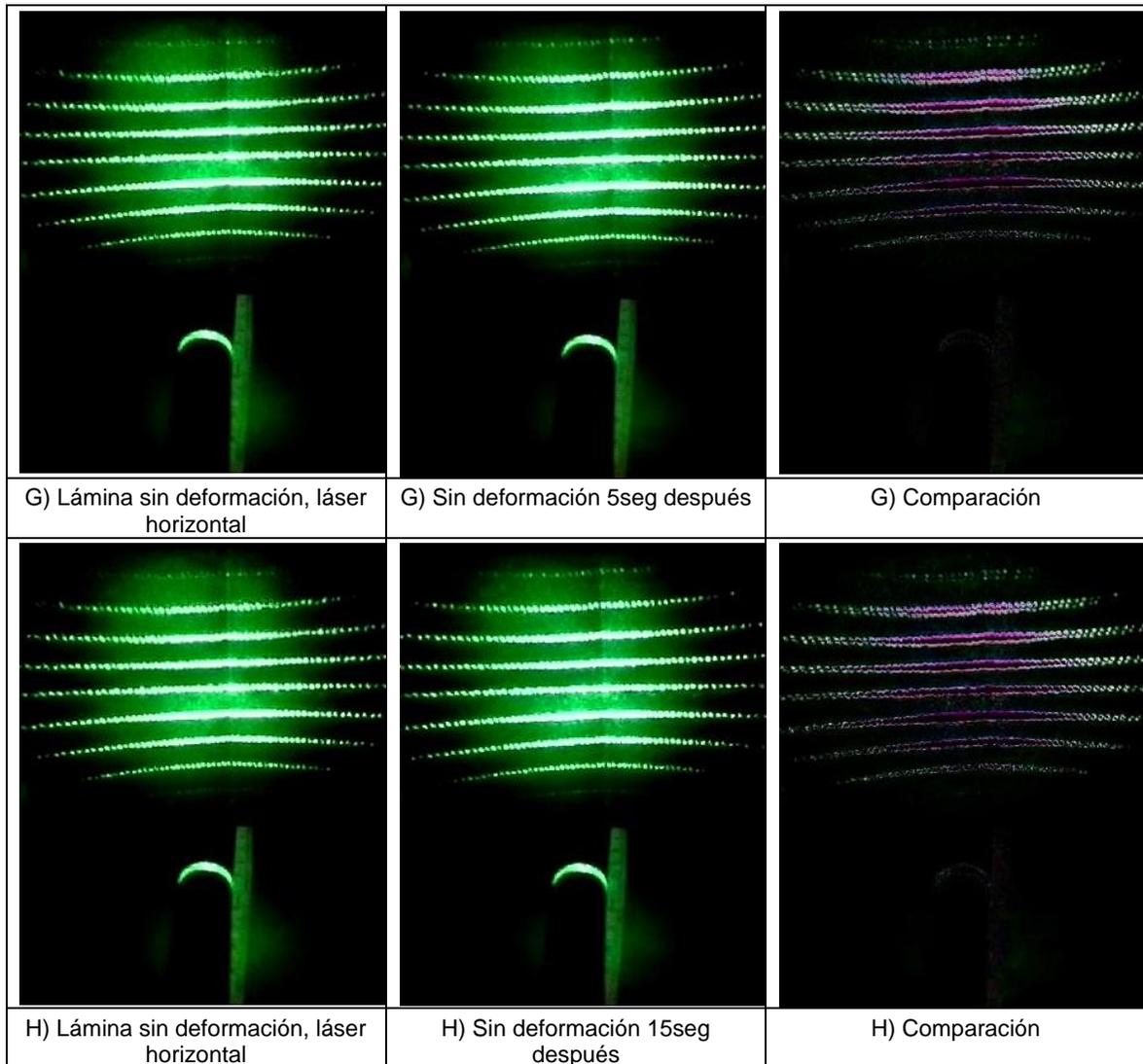


		
<p>D) Lámina sin deformación, láser vertical</p>	<p>D) Deformación eje horizontal convexo</p>	<p>D) Comparación</p>
		
<p>E) Lámina sin deformación, láser vertical</p>	<p>E) Deformación eje vertical cóncavo</p>	<p>E) Comparación</p>
		
<p>F) Lámina sin deformación, láser vertical</p>	<p>F) Deformación eje vertical convexo</p>	<p>F) Comparación</p>

Como observamos en las secuencias de las imágenes “C)”, “D)”, “E)” y “F)”, en la imagen de cada comparación notamos la presencia intensa de puntos morados, fucsia, blancos, verdes y zonas completamente coloreadas en verde y en la parte baja de las imágenes unos pocos puntos tenues que forman el contorno del cabezal caleidoscópico como en las imágenes “A)” y “B)”. Todas las coloraciones anteriores nos quieren decir que existe deformación en la lámina, sin embargo en este punto del experimento, no dicen cómo es la deformación o cuál es su magnitud, no obstante ese tema se abordaría con un estudio especializado en procesamiento digital de imágenes, que relacione la coloración de la imagen con la magnitud de la deformación de la lámina.

Lo que sí se sabe es que la presencia del blanco y el verde en la imagen comparada es que existe una diferencia notoria o del orden de centímetros. En el caso del blanco, cuando se tiene un cambio fino o aproximadamente del orden de milímetros, éste pasa a color fucsia; cuando se presenta un cambio aún más fino el fucsia pasa a morado; por último, con un cambio más fino el morado pasa a negro. En el caso del color verde, cuando existe un cambio aproximadamente del orden de milímetros, éste color pasa a azul oscuro; con un cambio más fino el azul oscuro pasa a negro.

Las imágenes adquiridas por el prototipo rápido, con el patrón de líneas de luz horizontales son las siguientes:



Como se puede ver en la secuencia de imágenes “G)” y “H)”, al comparar la imagen patrón, donde se tiene la lámina sin deformación, con la imagen de la lámina sin deformación tras 5 [s] y 15[s], observamos la presencia intensa de puntos de color verde, blanco, fucsia y morado, que forman el perímetro de las líneas anchas del patrón de luz y en la parte baja de las imágenes unos pocos puntos tenues que forman el contorno del cabezal caleidoscópico como podemos ver en la figura [6.11].

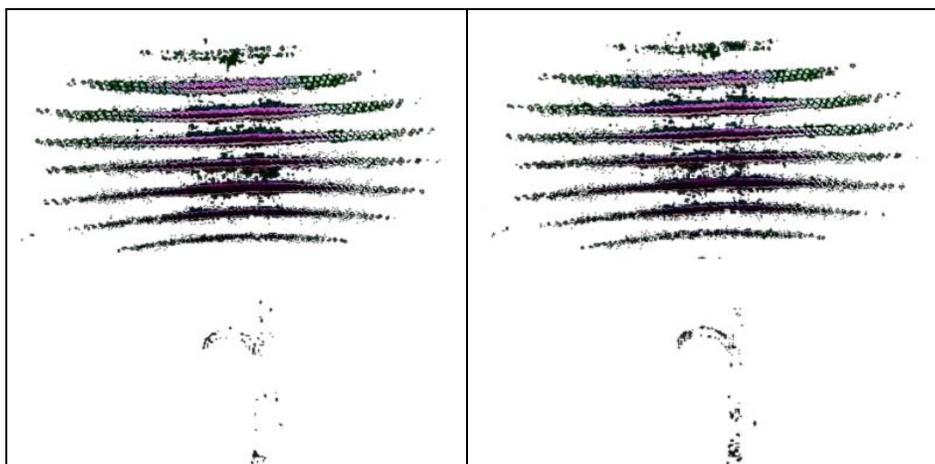
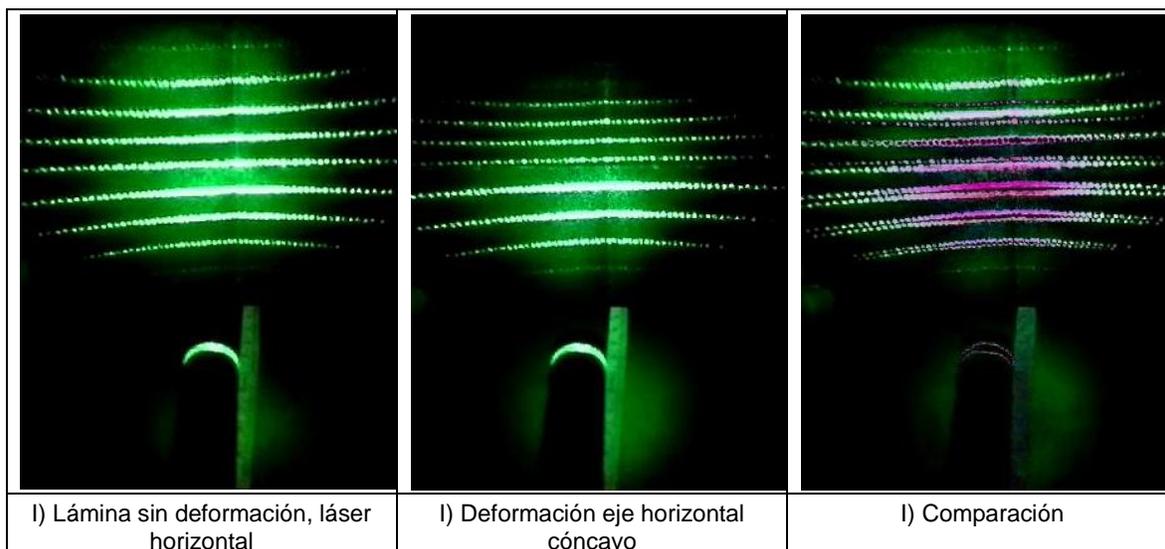
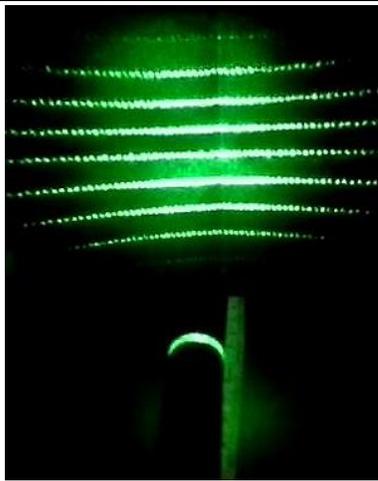
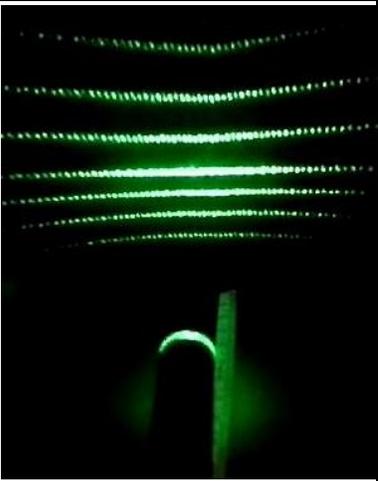
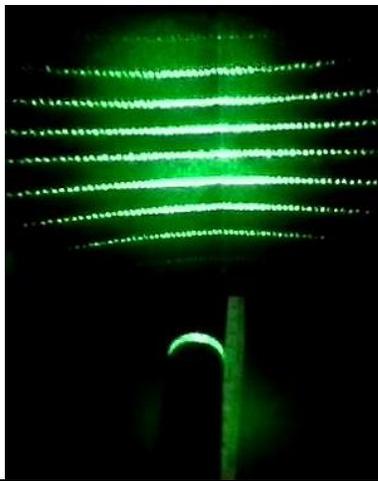
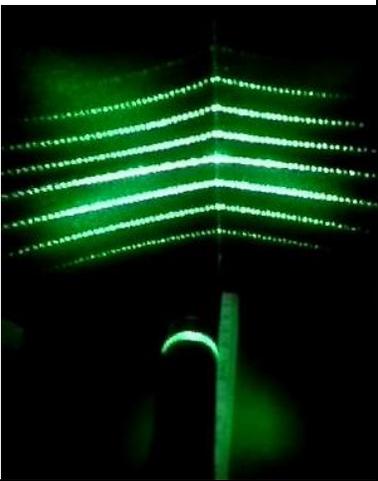
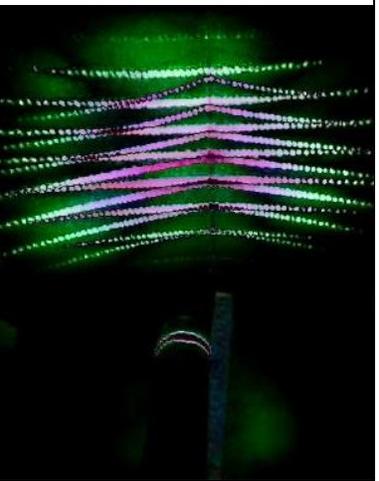
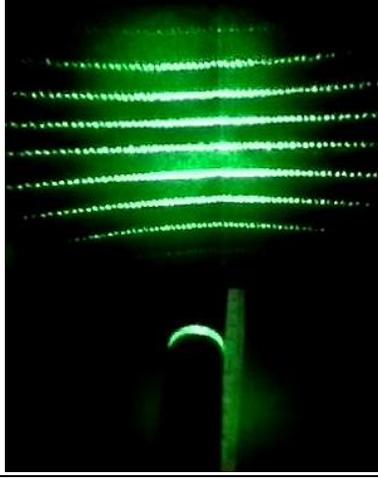


Figura [6.11] Puntos que forman el perímetro de la comparación de "G)" y "H)".

Como se mencionó en la figura [6.10], estos puntos se deben a que la iluminación del haz no es homogénea; sin embargo la presencia del color morado además de que los puntos de color son mucho más intensos que en las imágenes "A)" y "B)" nos podría indicar que con el patrón de líneas de luz horizontales se pueden detectar cambios más finos que con las líneas de luz verticales. Esta conjetura se pondría a prueba con un estudio especializado en procesamiento digital de imágenes.



		
J) Lámina sin deformación, láser horizontal	J) Deformación eje horizontal convexo	J) Comparación
		
K) Lámina sin deformación, láser horizontal	K) Deformación eje vertical cóncavo	K) Comparación
		
L) Lámina sin deformación, láser horizontal	L) Deformación eje vertical convexo	L) Comparación

Como observamos en las secuencias de las imágenes “I)”, “J)”, “K)” y “L)”, en la imagen de cada comparación notamos la presencia intensa de puntos morados, fucsia, blancos, verdes y zonas completamente coloreadas en verde y en la parte baja de las imágenes unos pocos puntos tenues que forman el contorno del cabezal caleidoscópico como en la imágenes “G)” y “H)”.

Al observar estas imágenes se refuerza la hipótesis de que la posición horizontal de las líneas de luz podría influir como un mejor marcador para detectar cambios más finos en las deformaciones, y de esta forma la propuesta de valor “obtener medidas de alta precisión” se cumpliría.

2. Saber si las interacciones fundamentales planteadas no serán de gran repercusión para implementar el SM.

En cuanto a algún falso contacto entre los trozos debido a la longitud de los cables, la probabilidad de este punto se reduce ya que solo se cuenta con el cable que conecta la cámara con la computadora.

Como ya se mencionó, la iluminación del haz no es homogénea, lo cual se podría resolver cambiando la fuente de alimentación o el puntero láser por otro de calidad profesional, el inconveniente de esta última propuesta es fabricar el cabezal caleidoscópico.

Según la posición del cabezal caleidoscópico es el patrón de líneas de luz, y como observamos en los experimentos, la posición horizontal de líneas de luz detecta cambios más finos que con las luces verticales, sin embargo esta conjetura se pondría a prueba con un estudio especializado en procesamiento digital de imágenes.

En mi experiencia el grosor de cada punto que forma la línea de luz sí tiene un impacto importante en los resultados. Si se cambiara el cabezal caleidoscópico por uno que genere puntos más delgados y por ende formara líneas más finas, se podría detectar mayor presencia de cambios de colores y por lo tanto una mayor resolución en la deformación.

La resolución de la cámara es el factor más importante ya que lo que estoy comparando son imágenes tomadas de la lámina deformada, si tuviera una cámara que me diera mayor resolución en las imágenes podría detectar cambios más finos aun manteniendo la misma fuente de haz de luz.

Por último, la distancia entre el láser y la lámina determina la cantidad de puntos luminosos, por ello es importante mantener constante esa distancia con la finalidad que el patrón lumínico sea la referencia correcta para comparar las deformaciones.

3. Saber si las interacciones incidentales podrían afectar de sobremanera el funcionamiento del SM deseado.

Dentro del rango de operación que da el fabricante en el láser, los cambios bruscos de temperatura no afectan la operación del láser. En cuanto a la humedad no se tiene registro.

El polvo o suciedad en el ambiente sí podría afectar la imagen captada por la cámara ya que se sumaría cierta alteración a la iluminación no homogénea del haz. Una forma de controlar el polvo, mantener regulada la temperatura y reducir la humedad es usando extractores de aire.

Si el usuario desea variar la temperatura o humedad, se tendría que buscar un láser con un rango de operación adecuado, de esta forma las propuestas de valor que son soportar condiciones de temperatura y humedad se verían resueltas.

En el caso de interacciones incidentales sonoras como son hablar y aplaudir, no se verían afectadas las mediciones (cubriendo la propuesta de valor de mínima interferencia por ruido ambiente), sin embargo alguna vibración de la mesa donde se encuentre el láser influiría en las mediciones, debido a que la diferencia entre los patrones lumínicos no sería por deformación sino por errores de iluminación.

4. Saber si la naturaleza del material afecta la medición.

Por último, la naturaleza de la lámina no afecta este tipo de experimento, por lo tanto se puede hacer sobre cualquier superficie opaca. Sin embargo en superficies reflejantes se debe tener precaución ya que el láser, aun siendo un puntero de baja potencia, puede causar riesgos a la vista. Por ello se deben ocupar lentes polarizados a la longitud de onda del láser.

Una de las razones por las que no seguí experimentando con esta tecnología fue por la falta de lentes polarizados para cuidar mi integridad.

En conclusión, el sistema de medición sí podría ser implementado con el concepto "inspección con luz estructurada", debido a todos los puntos antes mencionados, sin embargo en el siguiente capítulo realizo la discusión sobre esta aseveración.

CAPÍTULO 7

DISCUSIÓN.

Este proyecto de investigación y diseño conceptual que propone un estudio complementario a las pruebas de durabilidad del ciclo de vida de las puertas de los automóviles y camionetas del KLT Bench – Ford, que es conocer la deformación que se presenta en la lámina que está cerca de las manijas debido a cargas aplicadas; cumpliendo con las especificaciones establecidas por desarrolladores de tecnología del CIA, UNAM.

El objetivo final del proyecto sería desarrollar un sistema mecatrónico que mida sin contacto y en tiempo real, deformaciones en láminas no rígidas. Sin embargo al ser analizado el proyecto en subfunciones, me di cuenta que es muy amplio, por lo que enfoqué mi estudio y tiempo al SM que sería la tecnología con que se analizarían las deformaciones. En mi experiencia, el SM debe de ser el punto de partida del SMAD/h, ya que el éxito que quiero alcanzar depende en gran medida del análisis de las deformaciones sin tocar la lámina.

Una vez que se desarrollaron varios conceptos para el SM, opté por realizar una metodología de selección para elegir el concepto dominante y evaluar sus puntos fuertes y débiles con respecto a las necesidades del cliente y otros criterios, de tal forma que se filtraron, seleccionaron y ordenaron jerárquicamente las alternativas viables, obteniendo los siguientes tres conceptos: “sensor ultrasónico y PLC”, “interferometría con láser y visión por computadora” e “inspección con luz estructurada”. Al realizar el diseño a nivel sistema de estos tres, obtuve que la “inspección con luz estructurada” es la opción que satisface la mayoría de las especificaciones del “enunciado de la declaración de la misión” del capítulo 2 “planeación del proyecto”.

La finalidad de este capítulo es resumir el por qué se eligió el concepto, realizar una auto evaluación y plantear las observaciones para realizar un prototipo final.

7.1 PROPUESTA DE SISTEMA DE MEDICIÓN (SM).

La siguiente tabla resume los resultados experimentales de cada uno de los tres conceptos estudiados, con la finalidad de comparar sus ventajas y desventajas. El código [3] que uso es el siguiente: (+) “mejor que” o “sí”, (0) “igual a” o “por comprobar”, (-) “peor que” o “no”.

Necesidades del cliente y otros criterios	Conceptos para SM		
	Sensor ultrasónico y PLC	Interferometría con láser	Inspección con luz estructurada
Poseo conocimiento previo	+	0	-
Respuesta positiva del cliente	0	+	+
Probado en láminas no rígidas	-	+	+
Mide en tiempo real	0	-	0
Obtiene medidas de alta precisión	-	+	0
Minimiza medición equivocada por fallas humanas	+	-	+
Las interacciones incidentales no repercuten en el funcionamiento	-	-	+
Comunica las medidas obtenidas	+	+	-
Obtiene información sin contacto	+	+	+
La naturaleza de la lámina afecta de manera positiva	+	-	+
El color afecta de manera positiva	0	-	+
Es un equipo portátil	0	-	+
Soporta parámetros de temperatura	0	-	0
Soporta parámetros de humedad	-	-	+
Interferencia por ruido ambiente	+	-	+
Calibración sencilla	0	-	+
Mantenimiento sencillo	0	-	+
Costo de mantenimiento	-	-	+
Costo de implementación	-	0	+
Facilidad de implementación	0	-	+
Facilidad de adquisición	0	0	0
Facilidad de uso	+	0	+
Facilidad de lectura de datos	+	+	-
Facilidad de programación	0	-	+
Riesgos a la salud	-	0	0
Cumple con todos los requerimientos	-	-	-
Suma +	8	6	17
Suma 0	10	5	5
Suma -	8	15	4
Evaluación neta	0	-9	13
Es adecuado para implementar el SM	No	No	Sí

Como se puede ver en la tabla, el concepto con puntos negativos es la “interferometría con láser y visión por computadora”. Aunque teóricamente se pueden obtener medidas del orden de micrómetros, las interacciones incidentales generan en el patrón de interferencia alteraciones, además de que se requiere platar las láminas a medir a un factor de reflexión mayor a 85%, entre otros muchos puntos que se explicaron en el capítulo 5.

El concepto con un puntaje de cero es el “sensor ultrasónico y PLC”. El inconveniente de este concepto son los dos sensores 873C que debido a la divergencia de la onda acústica, se presenta interferencia al ocuparlos de forma paralela, por lo que la resolución que obtengo no es óptima para medir deformaciones del orden de milímetros, entre otros puntos que se explican en el capítulo 4.

Por último, el concepto que tuvo la mayoría de puntos positivos es la “inspección con luz estructurada”, y por tal motivo es mi propuesta para el sistema de medición. En el capítulo 6 se explican todos los puntos, pero se hace especial énfasis en:

- La adquisición de datos se hace sin contacto alguno gracias a la técnica de luz estructurada e inspección visual, y con un estudio especializado en procesamiento digital de imágenes se podría realizar en tiempo real. Esto hace efectivas las siguientes propuestas de valor: tiempo de adquisición menor que el de los SCMAD; no se requiere colocar escalas, guías, reglas, en la carrocería; sistema robusto; costo de mantenimiento e implementación conveniente.
- Con una cámara de alta definición se podrían obtener imágenes con más píxeles para que la información obtenida por la técnica de inspección visual sea de alta precisión, que es otra propuesta de valor.
- Para minimizar los riesgos de obtención de información equivocada por fallas humanas, otra propuesta de valor, se sabe que la distancia entre el láser y la lámina debe ser constante para que el patrón lumínico nos proporcione información veraz.
- En este punto del experimento, no se dice cómo es la deformación o cuál es su magnitud, pero con un estudio especializado en procesamiento digital de imágenes se puede obtener.
- Lo que se ha obtenido del experimento es una serie de colores que son: azul oscuro, verde, morado, fucsia y blanco, los cuales nos dicen que existe deformación. Entre más clara sea la coloración, la deformación es mayor. Se debe recordar que la presencia del negro en la imagen quiere decir que no existe deformación alguna.
- Se debe tener precaución al experimentar, ya que el láser puede provocar daños a la vista.

7.2 ALCANCES DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS. AUTOEVALUACIÓN

El desarrollo de productos requiere un equipo de trabajo. En este proyecto entendí la importancia de crear un equipo multidisciplinario, ya que el conocimiento de cada miembro impactará en: mayor aporte de experiencias, conocimiento e información para resolver las necesidades, conocimiento especializado, enfocar a cada miembro del equipo en un punto especial del proyecto, realizar objetivos en menor tiempo, etc.

El objetivo final del proyecto que es desarrollar un sistema mecatrónico (SMAD/h) que mida sin contacto y en tiempo real deformaciones en láminas no rígidas, queda como una meta a largo plazo o trabajo a futuro, debido a lo complejo del proyecto y el restringido equipo de trabajo.

La teoría solo es una aproximación de la práctica. Los experimentos realizados a los tres conceptos se prepararon con cierto conocimiento teórico previo y con el objetivo de cumplir con la declaración de la misión, sin embargo al experimentar con el prototipo (físico - enfocado) obtengo que las interacciones fundamentales e incidentales son puntos que se deben de minimizar para no tener gran repercusión en los resultados. En los casos que no se cumplieron con ciertos puntos de la misión, investigué el porqué de esos resultados y los expuse en el respectivo capítulo.

Implementar el sistema de medición con el concepto de “inspección con luz estructurada” me pareció una opción adecuada ya que al momento de realizar los experimentos, las interacciones fundamentales e incidentales tienen menor o nulo impacto en los resultados que los otros conceptos, sin embargo con un estudio especializado en procesamiento digital de imágenes se puede pasar de “obtener información de deformaciones” a “obtener medidas de las deformaciones”. Por otra parte, los resultados obtenidos cubren con la mayoría de las propuestas de valor descritas en el “enunciado de la declaración de la misión”; las propuestas de valor faltantes se pueden alcanzar realizando el estudio especializado en procesamiento y cambiando el puntero láser por un láser de calidad profesional.

Una de las razones por las que no seguí experimentando con esta tecnología es que se debe tener precauciones con el láser, ya que éste puede provocar daños a la vista

7.3 OBSERVACIONES FINALES

En mi experiencia, se podrían minimizar aún más las interacciones fundamentales e incidentales de la siguiente manera:

- La probabilidad de un falso contacto entre trozos debido a la longitud de los cables, se reduce debido a que solo se cuenta con el cable que conecta la cámara con la computadora.
- La iluminación no homogénea del haz, se podría resolver cambiando la fuente de alimentación o el puntero láser por otro de calidad profesional, el inconveniente de esta última propuesta es fabricar el cabezal caleidoscópico.
- Según la posición del cabezal caleidoscópico es el patrón de líneas de luz, y como observamos en los experimentos, la posición horizontal de líneas de luz detecta cambios más finos que con las luces verticales, sin embargo esta conjetura se pondría a prueba con un estudio especializado en procesamiento digital de imágenes.
- Si se cambiara el cabezal caleidoscópico por uno que genere puntos más delgados y por ende formara líneas más finas, se podría detectar mayor presencia de cambios de colores y por lo tanto una mayor resolución en la deformación.
- La resolución de la cámara es el factor más importante ya que lo que estoy comparando son imágenes tomadas de la lámina deformada. Si tuviera una cámara que me diera mayor resolución en las imágenes podría detectar cambios más finos aun manteniendo la misma fuente de haz de luz.
- La distancia entre el láser y la lámina determina la cantidad de puntos luminosos, por ello es importante mantener constante esa distancia con la finalidad que el patrón lumínico sea la referencia correcta para comparar las deformaciones.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El objetivo final del proyecto será desarrollar un sistema mecatrónico (SMAD/h) que mida sin contacto y en tiempo real, deformaciones en láminas no rígidas. Sin embargo al desarrollar el proyecto en módulos y plantear los alcances para cada uno de ellos, me di cuenta que requiero varios sistemas para lograr que funcione adecuadamente el SMAD/h. Por lo tanto la investigación que realicé ha sido enfocada en la actividad de planeación y experimentación del sistema de medición (SM), que es el sistema que analizará las deformaciones sin tocar la lámina.

Después de haber desarrollado varios conceptos que cumplían con el requerimiento de analizar láminas sin contacto, ocupé la metodología de “selección de conceptos” con base a las necesidades del cliente y otros criterios, para descartar algunos de forma rápida, sin hacer prototipos y pruebas. Así obtuve que los conceptos viables eran: “sensor ultrasónico y PLC”, “interferometría con láser y visión por computadora” e “inspección con luz estructurada”.

Al realizar el diseño a nivel sistema (prueba del concepto, arquitectura preliminar del prototipo, planeación del prototipo, experimentación y resultados) con cada uno de los conceptos, y obtener las ventajas y desventajas técnicas de implementar el SM con esa tecnología, obtuve que la “inspección con luz estructurada” es la opción que satisface la mayoría de las propuestas de valor del “enunciado de la declaración de la misión” del capítulo 2 “planeación del proyecto”. Las propuestas de valor faltantes se pueden alcanzar realizando el estudio especializado en procesamiento digital de imágenes y cambiando el puntero láser por un láser de calidad profesional.

En cuanto al concepto de “inspección con luz estructurada”, es la combinación de la técnica de luz estructurada con la inspección visual. El concepto se desarrolló proyectando un patrón de líneas de luz con ayuda de un cabezal para puntero láser, sobre la superficie a medir. Con una cámara y cierto software, puedo obtener información de la lámina, comparando dos imágenes

adquiridas por la cámara tras cierta fracción de tiempo, y así obtener una tercera imagen, la cual arroja una serie de colores que son: azul oscuro, verde, morado, fucsia y blanco, los cuales nos dicen que existe deformación. Entre más clara sea la coloración, la deformación es mayor. Se debe recordar que la presencia del negro en la imagen quiere decir que no existe deformación alguna.

Sé que la presencia del blanco y del verde en la imagen comparada es que existe una diferencia notoria o del orden de centímetros. En el caso del blanco, cuando se tiene un cambio fino, éste pasa a color fucsia; cuando se presenta un cambio aún más fino el fucsia pasa a morado; por último, con un cambio más fino el morado pasa a negro. En el caso del color verde, cuando se tiene un cambio fino, éste pasa a azul oscuro; con un cambio más fino el azul oscuro pasa a negro.

Al realizar el experimento del concepto, encontré que las interacciones fundamentales e incidentales tienen menor o nulo impacto en los resultados que los otros conceptos. En mi experiencia, se podrían minimizar aún más las interacciones fundamentales de la siguiente manera:

- La iluminación no homogénea del haz, se podría resolver cambiando la fuente de alimentación o el puntero láser por otro de calidad profesional, el inconveniente de esta última propuesta es fabricar el cabezal caleidoscópico.
- La resolución de la cámara es el factor más importante ya que lo que estoy comparando son imágenes tomadas de la lámina deformada, si tuviera una cámara que me diera mayor resolución en las imágenes podría detectar cambios más finos aun manteniendo la misma fuente de haz de luz.
- La distancia entre el láser y la lámina determina la cantidad de puntos luminosos, por ello es importante mantener constante esa distancia con la finalidad que el patrón lumínico sea la referencia correcta para comparar las deformaciones.

Como trabajo futuro, se puede abordar a profundidad la técnica de inspección con luz estructurada haciendo especial énfasis en los siguientes puntos:

- Según la posición del cabezal caleidoscópico es el patrón de líneas de luz, y como observamos en los experimentos, la posición horizontal de líneas de luz detecta cambios más finos que con las luces verticales, sin embargo esta conjetura se pondría a prueba con un estudio especializado en procesamiento digital de imágenes.
- Con un estudio especializado en procesamiento digital de imágenes se puede pasar de “obtener información de deformaciones” a “obtener medidas de las deformaciones”, al relacionar las imágenes con las cargas aplicadas.
- Obtener la relación entre la magnitud de la deformación de la lámina y los colores que se presentan en la imagen comparada.
- Si se cambiara el cabezal caleidoscópico por uno que genere puntos más delgados y por ende formara líneas más finas, se podría detectar mayor presencia de cambios de colores y por lo tanto una mayor resolución en la deformación.

Una vez concluido el sistema de medición, la siguiente fase sería el sistema de brazo robótico (SB), el cual se encargará de transportar al SM de forma paralela al desplazamiento de la puerta. En este punto destaco que la importancia de terminar con un buen SM es que su información podría ser usada como realimentación al módulo de medición mecánica para mandar señales al módulo de actuación y así automatizar el producto.

Por último, un proyecto de diseño y desarrollo de producto debe realizarse por un grupo multidisciplinario para obtener resultados satisfactorios en periodos de tiempo cortos. La teoría solo es un modelo de referencia de un hecho, al realizar un experimento se tienen variables que pueden afectar el buen funcionamiento, el aporte de un ingeniero es encontrar “la pieza” que minimice esas interacciones incidentales para realizar un vínculo mucho más aproximado entre el trabajo teórico y el experimental, y así obtener un nuevo modelo funcional.

REFERENCIAS

- [1] Mercado V. David, Peralta R. Rogelio (2013). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para validación de carrocerías*. Tesis de licenciatura, UNAM.
- [2] Ford Motor Company (junio 2014 – agosto 2015). Exposición del proyecto “KLT Bench – Ford” en el edificio del CIA, facultad de ingeniería, CU, UNAM.
- [3] K. T. Ulrich and D. S. Eppinger (2008). *Product design and development*. New York: McGraw-Hill Higher Education.
- [4] Capítulo 5. Vizán, G. (2006). *Elementos estructurales del vehículo; Ciclos formativos mantenimiento de vehículos autopropulsados*. Editex.
- [5] Ford Motor Company (n.d.). *Ficha técnica de Mustang – Shelby*. Consultado el 1 de noviembre del 2013, página web “Camsa” distribuidor de automóviles Ford: <http://www.fordcamsa.com.mx/MUSTANG-SHELBY/13/ficha-tecnica/Dimensiones/>
- [6] Globaljig International (n.d.). *Hoja de datos de GlobalScan*. Consultado el 1 de noviembre del 2013, página web “Globaljig International” productor de equipo para talleres de carrocería: http://www.globaljig.it/prodotti/GlobalScan_scheda_tecnica.pdf
- [7] Spanesi internacional (2006). *Publicaciones del departamento de carrocería y pintura*. Consultado el 1 de noviembre del 2013, página web “Spanesi internacional” productor de equipo para reparación de vehículos: <http://www.spanesi.es/publicaciones/cz/cz-ene06-touch.pdf>
- [8] Spanesi internacional (2013). *Catálogo Martech Car - Spanesi*. Consultado el 1 de noviembre del 2013, página web “Spanesi internacional” productor de equipo para reparación de vehículos: http://82.223.149.148/eBook/Catalogo_MartechCar_Spanesi/#/58/
- [9] Pérez H. (n.d.). *Labor de un perito en hechos de tránsito*. Consultado el 1 de Noviembre del 2013, página web Autobody Magazine por internet: http://www.autobodymagazine.com.mx/abm_previo/2012/05/la-labor-de-un-perito-en-hechos-de-transito/
- [10] González, V. (2008a). *Diseño mecatrónico: Guía de clase*. México: Departamento de ingeniería mecatrónica, UNAM
- [11] González, V. (2008b). *The thesis process*. México: Departamento de ingeniería mecatrónica, UNAM

- [12] González, V. (2008c). *Formulación de una hipótesis extendida*. México: Departamento de ingeniería mecatrónica, UNAM
- [13] Lleó A. y Lleó L. (2011). *Gran manual de magnitudes físicas y sus unidades.: Un estudio sistemático de 565 magnitudes físicas*. Ediciones Díaz de Santos.
- [14] Jaramillo A., Prieto F., y Boulanger P. (2007). *Inspección de piezas 3D: revisión de la literatura en revista ingeniería e investigación vol. 27 No. 3*, 118-126.
- [15] Dirección general de información, Universidad de colima (n.d.). Boletín de prensa “*LA TERMOGRAFÍA ES LA TÉCNICA MÁS EXACTA PARA DETECTAR CÁNCER DE MAMA*”. Consultado el 1 de mayo del 2014, página web “Universidad de Colima”: <http://www.ucol.mx/boletines/noticia.php?id=8604>
- [16] BOSCH (n.d.). *Instrucciones de manejo: GLM 100 C Professional*. Consultado el 1 de mayo del 2014, página web “BOSCHm innovación para tu vida”: <http://www.bosch-professional.com/es/es/glm-100-c-34166-ocs-p/>
- [17] Pérez, A. (2004). *Patología del aparato locomotor en ciencias de la salud*. Editorial Médica Panamericana.
- [18] Lehmann, C. (1989). *Geometría analítica*. Editorial LIMUSA.
- [19] Abramowitz M., Fellers T. J., Davidson M. W. (2012). *The nature of electromagnetic radiation*. Consultado el 3 noviembre del 2014, página web “Microscopy resource center”: <http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/electromagintro.html>
- [20] González, V. (1992). *Metodología de diseño electrónico en un proyecto de desarrollo tecnológico*. Tesis de maestría, UNAM.
- [21] Allen-Bradley y Rockwell Automation (1999a). *Bulletin 873C Ultrasonic proximity sensor*. Consultado el 1 de noviembre del 2013, página web “Rockwell Automation: Listen. Think. Solve.”: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/873c-in001_-en-p.pdf
- [22] Allen-Bradley y Rockwell Automation (1999b). *SLC processors*. Consultado el 1 de noviembre del 2013, página web “Rockwell Automation: Listen. Think. Solve.”: <http://ab.rockwellautomation.com/es/programmable-controllers/slc-500-controllers#/tab5>
- [23] Centro Español de Metrología (2011). Glosario de términos: *Resolución (de un dispositivo visualizador)*. Consultado el 3 de noviembre del 2014, página web “Centro Español de Metrología: Innovando en metrología por un mundo más exacto” http://www.cem.es/cem/metrologia/glosario_de_terminos?page=12

- [24] Sánchez A. M., (2011). *Espectroscopía óptica y alta presión en esmeraldas naturales y sintéticas*. Tesis de Posgrado, UNAM.
- [25] Chávez C. M., (2010). *Caracterización de un espejo deformable de membrana para la reconfiguración de pulsos de femtosegundos*. Tesis de licenciatura, UNAM.
- [26] Apple Inc. (2014). *Especificaciones técnicas de iPhone5S*. Consultado el 3 de noviembre del 2014, página web: <http://www.apple.com/mx/shop/buy-iphone/iphone5s>
- [27] Chapa C. J., (1990). *Manual de instalaciones de alumbrado y fotometría*. Editorial Limusa.
- [28] Facilísimo interactive (n.d.). *Herramientas de carpintería: el sargento*. Consultado el 4 de mayo del 2014, página web: http://bricolaje.facilísimo.com/herramientas-de-carpinteria-el-sargento_820151.html
- [29] Tecnologías de información y comunicación (2014). UNAM da acceso a Wolfram Mathematica. Consultado el 3 de noviembre del 2014, página web: <http://www.tic.unam.mx/noticias/2015/04/2015-04-16-mathematica.html>
- [30] Tienda de software de la UNAM (2014). *Científico, Mathematica – Licenciatura/Posgrado*. Consultado el 3 de noviembre del 2014, página web: <http://www.software.unam.mx/?product=mathematica-licenciaturaposgrado-2>
- [31] Laserpointerpro (2014). *Tienda de punteros láser profesionales* Consultado el 6 de octubre del 2014, página web: <http://www.laserpointerpro.com/es/10mw-532nm-openback-kaleidoscopic-green-laser-pointer-pen-p-342.html>
- [32] Jiménez P. Naybi (2013). *Identificación de un modelo simple de masa neuronal para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson*. Tesis de Posgrado, UNAM.