

# Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería Mecánica e Industrial

Departamento de Mecatrónica

## **Diseño y Construcción de un Sistema Básico de Tomografía Ultrasónica**

Presenta: **Victor Solórzano Flores**

Director de Tesis: Dr Miguel Molero

2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Resumen

Este trabajo tiene como finalidad el diseño e implementación de un sistema básico de tomografía ultrasónica para la detección de defectos y caracterización de materiales. El sistema de tomografía está dividido en tres sistemas, cada uno encargado de un proceso específico: sistema de posicionamiento, sistema de emisión-recepción de pulsos ultrasónicos y el sistema de control. Para el sistema de posicionamiento, se diseñó y construyó una estructura para controlar el movimiento automatizado de dos brazos que siguen una trayectoria circular, alrededor de la muestra que se está inspeccionando. Ambos brazos sujetan a los transductores, encargados de realizar las mediciones, funcionando uno como emisor y el segundo como receptor. El movimiento automatizado se implementó mediante el diseño de un sistema de control que permite sincronizar el sistema de posicionamiento con la adquisición de los pulsos ultrasónicos emitidos y recibidos por los transductores. Para configurar y manejar el sistema de tomografía ultrasónica se implementó una interfaz gráfica de usuario que permite integrar los comandos de control tanto del sistema de posicionamiento como del sistema de emisión-recepción de pulsos ultrasónicos utilizando una computadora personal. Finalmente, se presenta la puesta a punto del sistema construido y una serie de pruebas obtenidas en distintos materiales bajo inspección.

## **Dedicatoria**

A mis padres, por brindarme su amor incondicional.

A mis tías, por darme su cariño y apoyo.

Al Dr. Miguel Molero, por darme su tiempo y conocimientos.

## **Agradecimientos**

A la UNAM por brindarme los conocimientos y experiencias que me hicieron crecer como persona.

A la Dra. Lucía Medina Gómez por el apoyo otorgado en este trabajo,

A la DGAPA por la beca otorgada para la realización del trabajo de tesis, Proyecto PAPIIT IT118811-3

Al Instituto de materiales por el apoyo ofrecido para terminar la tesis.

# Índice general

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Ensayos no destructivos . . . . .	1
1.2. END por ultrasonidos . . . . .	1
1.2.1. Características de las ondas . . . . .	3
1.2.2. Tipos de ondas . . . . .	4
1.2.3. Fenómenos principales involucrados en la propagación de las ondas ultrasónicas . . . . .	5
1.2.4. Generación de ultrasonidos. . . . .	5
1.2.5. Técnicas de medición . . . . .	6
1.2.6. Formatos de representación. . . . .	7
1.2.7. Escaneo automático . . . . .	7
1.3. Objetivo de la tesis . . . . .	8
1.4. Diseño Conceptual del Sistema de Tomografía Ultrasónica . . . . .	8
1.5. Estructura del trabajo de tesis . . . . .	9
<b>2. Diseño del Sistema de Posicionamiento</b>	<b>11</b>
2.1. Diseño General del Sistema de Posicionamiento . . . . .	11
2.1.1. Diseño conceptual del sistema de posicionamiento . . . . .	11
2.1.2. Teoría de diseño de engranes . . . . .	12
2.1.3. Ecuaciones para cálculo de engranes . . . . .	14
2.1.4. Esfuerzo a la flexión de los dientes. . . . .	15
2.1.5. Razón de contacto e interferencia. . . . .	15
2.1.6. Selección de materiales y motores . . . . .	16
2.1.7. Diseño del tren de engranes . . . . .	18
2.1.8. Manufactura de los engranes . . . . .	20
2.1.9. Unión engrane-eje y piñón-motor. . . . .	20
2.1.10. Selección de chumaceras. . . . .	21
2.1.11. Diseño de los soportes de los transductores. . . . .	21
2.1.12. Diseño del soporte para el sistema de posicionamiento. . . . .	23
2.2. Diseño del sistema electrónico de control de potencia . . . . .	25
2.3. Paro de emergencia . . . . .	27

<b>3. Sistema de emisión-recepción de pulsos ultrasónicos</b>	<b>29</b>
3.1. Esquema general del sistema emisión-recepción . . . . .	29
3.2. Implementación del sistema de emisión-recepción . . . . .	30
3.2.1. Excitación electrónica para el transductor emisor. . . . .	31
3.2.2. Transductores . . . . .	32
3.2.3. Pre-amplificador . . . . .	33
3.2.4. Adquisición de las señales ultrasónicas . . . . .	33
<b>4. Diseño e implementación del sistema de control</b>	<b>35</b>
4.1. Diseño del sistema de control . . . . .	35
4.2. Controlador . . . . .	36
4.3. Interfaz gráfica de usuario . . . . .	37
4.3.1. Comunicación con el sistema de posicionamiento. . . . .	38
4.3.2. Comunicación con el sistema de emisión-recepción . . . . .	41
<b>5. Construcción, puesta a punto y pruebas del sistema de tomografía</b>	<b>43</b>
5.1. Construcción del sistema de tomografía ultrasónica . . . . .	43
5.2. Puesta a punto del sistema . . . . .	49
5.3. Pruebas del sistema básico de tomografía ultrasónico en transmisión . . . . .	51
<b>6. Conclusiones</b>	<b>57</b>
<b>A. Planos del sistema de posicionamiento</b>	<b>59</b>
<b>B. Plataforma de desarrollo Arduino</b>	<b>65</b>
B.1. Características de la tarjeta Arduino . . . . .	65
B.2. Características principales del Arduino . . . . .	65
B.2.1. Alimentación . . . . .	65
B.2.2. Comunicación . . . . .	65
B.2.3. Programación . . . . .	66
B.2.4. Diagrama esquemático . . . . .	66
<b>C. Código Fuente: Interfase Arduino</b>	<b>67</b>

# Índice de figuras

---

1.1. Inspección por ultrasonido. . . . .	2
1.2. Amplitud. . . . .	3
1.3. Ondas longitudinales. . . . .	4
1.4. Ondas transversales. . . . .	4
1.5. Refracción. . . . .	5
1.6. Técnicas de emisión y recepción de ultrasonidos. . . . .	6
1.7. Sistemas de representación. . . . .	7
1.8. Sistema de Tomografía ultrasónica. . . . .	8
2.1. Vista superior del arreglo deseado. . . . .	11
2.2. Estructura rotacional del diseño propuesto. . . . .	12
2.3. Parámetros involucrados en la transmisión de potencia. . . . .	13
2.4. Diagrama de relación de dos engranes. . . . .	14
2.5. Fuerzas presentes en un diente de engrane. . . . .	15
2.6. Volumen y peso de las diferentes partes del sistema. . . . .	17
2.7. Engranes acoplados a los ejes. . . . .	19
2.8. Engranes manufacturados. . . . .	21
2.9. Cople seleccionado. . . . .	22
2.10. Chumaceras seleccionadas. . . . .	22
2.11. Soporte de los transductores. . . . .	23
2.12. Soportes del sistema. a) Principal y b) Secundario. . . . .	24
2.13. Diagrama del sistema electrónico de control de potencia para un motor a pasos. . . . .	26
2.14. Pistas generadas en el software ARES. . . . .	27
2.15. Fotografía del circuito implementado para el control de potencia. . . . .	27
2.16. Interruptor utilizado para el paro de emergencia. . . . .	28
2.17. Circuito de protección para el paro de emergencia. . . . .	28
3.1. Elementos involucrados en la emisión-recepción ultrasónica. . . . .	30
3.2. HandyScope HS3. . . . .	31
3.3. Diagrama de conexiones. . . . .	31
3.4. Transductores ultrasónicas de inmersión. . . . .	32
3.5. Preamplificador Olympus. . . . .	33
3.6. Adquisición de los pulsos emitidos y recibidos en agua, aluminio y bronce. . . . .	34
4.1. Algoritmo de control implementado en el microcontrolador ATmega328. . . . .	37
4.2. Etapa 1 a) Algoritmo de interfaz gráfica. b) Interfaz gráfica. . . . .	38
4.3. Etapa 2 del algoritmo de interfaz gráfica. . . . .	39

4.4. Etapa 3 del algoritmo de interfaz gráfica. . . . .	40
4.5. Interfaz gráfica para la configuración del generador. . . . .	41
4.6. Algoritmo de configuración del sistema de adquisición. . . . .	42
5.1. Integración Engranajes-Piñon, Ejes y Motores. . . . .	43
5.2. Integración del sistema de posicionamiento. Soporte principal con: a) chumaceras b) ejes. . . . .	44
5.3. Sistema de posicionamiento. Integración con: a) Soporte Secundario, b) Brazos. . . . .	45
5.4. Fotografías de las caras del gabinete para el sistema de control y electrónica de potencia. . . . .	46
5.5. Conexiones entre sistemas. . . . .	47
5.6. Fotografías del sistema construido de tomografía ultrasónica. a) Vista Frontal, b) Vista Lateral . . . . .	48
5.7. Sujeción de los transductores. . . . .	49
5.8. Cambio en la distancia de los transductores. . . . .	50
5.9. Tornillos de sujeción. . . . .	50
5.10. Punto ciego de los transductores. . . . .	51
5.11. Angulos de medición. . . . .	52
5.12. Comparación entre una inspección normal y con restricciones para un $\theta = 10^\circ$ . . . . .	53
5.13. Inspección tomográfica para un ángulo de $20^\circ$ en la primera iteración con respecto al emisor. . . . .	53
5.14. Fotografía de las probetas utilizadas en la inspección de tomografía ultrasónica. A la izquierda se muestra la probeta cilíndrica de Aluminio, mientras que a la derecha la probeta cúbica de Concreto. . . . .	54
5.15. Inspecciones sobre la probeta cilíndrica de Aluminio. . . . .	55
5.16. Inspecciones sobre la probeta cúbica de Concreto. . . . .	56
A.1. Plano del cilindro principal. . . . .	59
A.2. Plano del cilindro secundario. . . . .	60
A.3. Plano del soporte del sensor principal. . . . .	61
A.4. Plano del soporte del sensor secundario. . . . .	62
A.5. Plano del engrane principal. . . . .	63
A.6. Plano del engrane secundario. . . . .	64
B.1. Diagrama esquemático. . . . .	66

# Indice de Tablas

---

2.1. Características de los motores a seleccionar. . . . .	17
2.2. Volumen de los componentes del sistema. . . . .	17
2.3. Peso de los componentes del sistema. . . . .	18
2.4. Datos para calcular el torque. . . . .	18
2.5. Características de los engranes. . . . .	18
2.6. Esfuerzo a la flexión del tren de engranes. . . . .	19
2.7. Componentes del sistema de control de potencia. . . . .	26
3.1. Especificaciones del HandyScope HS3. . . . .	30
4.1. Elementos del sistema de control. . . . .	36
4.2. Protocolo de comunicación. . . . .	40
B.1. Características principales del Arduino. . . . .	66

---

# CAPITULO 1

## Introducción

---

### 1.1. Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos (END) permiten la identificación de materiales defectuosos antes de que se utilicen en procesos de conformado, así como para realizar inspecciones en componentes que ya se encuentran en servicio. El uso más amplio de este tipo de ensayos se da en la industria donde se utilizan para identificar, clasificar y seleccionar materias primas, para comprobar la composición química, para la detección de fisuras internas en componentes y en la detección de grietas superficiales.

Dependiendo del tipo de material, pieza o estructura es el tipo de END que se utiliza, los principales tipos de ensayos son los siguientes:

- Inspección por líquidos penetrantes.
- Inspección por partículas magnéticas.
- Inspección por Ultrasonido.
- Inspección por Rayos X.
- Inspección por corrientes parásitas.

### 1.2. END por ultrasonidos

La inspección por ultrasonidos emplea ondas acústicas de frecuencias superiores a 20 KHz, ultrasonidos, que se propagan mediante la transmisión de energía entre partículas adyacentes en un medio, ya sea sólido, líquido, o gaseoso. La inspección ultrasónica se utiliza para detectar y evaluar fallas en los materiales, realizar mediciones dimensionales y caracterización de materiales. Algunas de las ventajas que presentan los END por ultrasonidos son:

- Poder de penetración superior en todo medio (sólido, líquido, gas).
- Las piezas requieren una mínima preparación.

- Se generan imágenes detalladas.
- Detección de discontinuidades tanto superficiales como interiores.

Entre las limitaciones que presenta este tipo de inspección se tiene:

- La superficie debe ser accesible para realizar la inspección.
- Difícil inspección en materiales con formas irregulares, dimensiones pequeñas, y heterogéneos.
- Difícil interpretación de las señales ultrasónicas adquiridas en materiales heterogéneos.

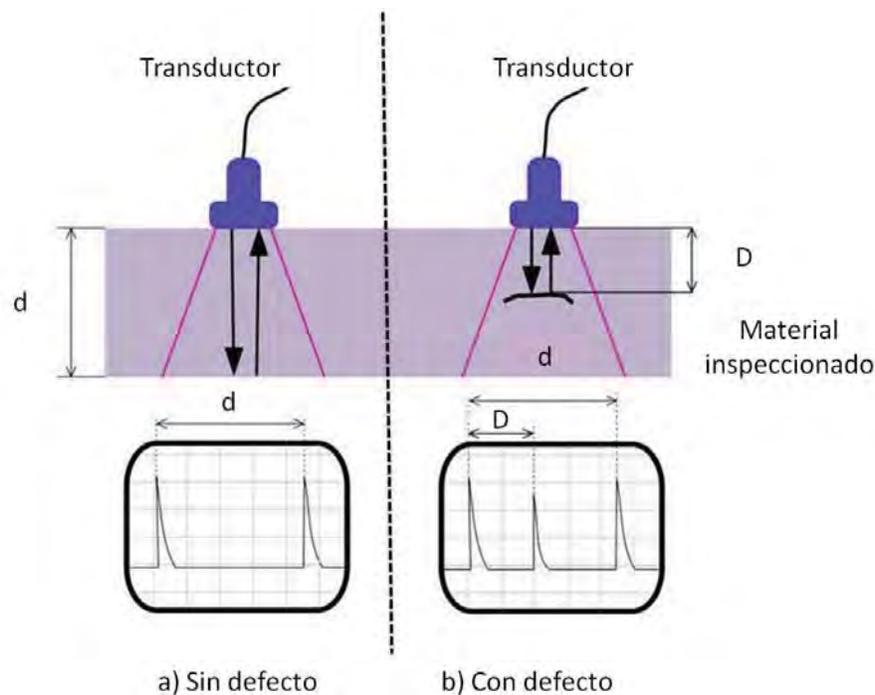


Figura 1.1: Inspección por ultrasonido.

Las ondas ultrasónicas son generadas por un cristal o cerámico piezoeléctrico denominado transductor que tiene la propiedad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Al ser excitado eléctricamente el transductor vibra a ciertas frecuencias generando ondas mecánicas. Una inspección ultrasónica se lleva a cabo mediante la insonificación de pulsos ultrasónicos sobre un material, de tal forma que diferentes fenómenos acústicos están involucrados durante la propagación de los pulsos ultrasónicos. Mediante la interpretación de los pulsos ultrasónicos que han viajado por el material, se puede detectar defectos presentes, o bien caracterizar ciertas propiedades mecánicas. Por ejemplo, en la Figura 1.1a se observa un pulso ultrasónico insonificado en un material libre de defectos es reflejando solamente por la cara superior e inferior del material inspeccionado, por lo que se aprecia solamente dos pulsos recibidos,

uno debido al primer reflejo por parte de la cara superior y el otro debido a la reflexión por la cara inferior. Por otra parte, en la Figura 1.1b, se muestra que al inspeccionar un material que incluya un defecto, se presentan tres pulsos reflejados, el primero por parte de la cara superior del material, el segundo debido al defecto interno y el último a consecuencia de la cara inferior. Nótese que el pulso ultrasónico pierde más energía al encontrarse con un defecto interno en el material en comparación con la reflexión por parte de las caras del material. Por tanto, la correcta interpretación del comportamiento de los pulsos ultrasónicos recibidos pueden brindar información de la microestructura de los materiales de forma no destructiva. No obstante, es necesario conocer e interpretar los diferentes y complejos fenómenos acústicos involucrados en la inspección. A continuación se describen los principales factores y fenómenos involucrados en las inspecciones no destructivas por ultrasonidos.

### 1.2.1. Características de las ondas

Las características principales de las ondas son las siguientes:

- Amplitud, es una medida de la variación máxima del desplazamiento, es la distancia máxima entre el punto más alejado y el punto medio de la señal. En acústica, la amplitud comúnmente se mide en decibelios (Figura 1.2).
- Frecuencia, la frecuencia es una magnitud que mide el número de repeticiones/ciclos/periodos por unidad de tiempo de la señal.
- Frecuencia de muestreo, es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para su representación como una señal discreta.

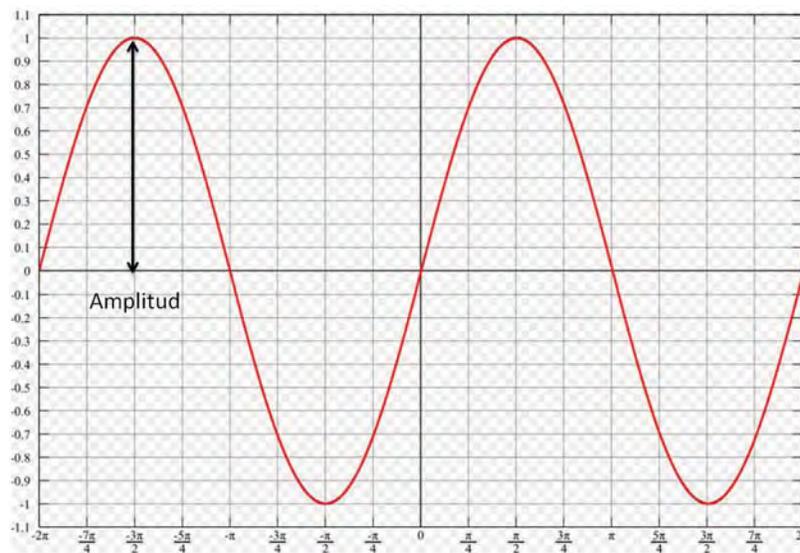


Figura 1.2: Amplitud.

### 1.2.2. Tipos de ondas

Las ondas acústicas se clasifican básicamente en función de la dirección de oscilación de las partículas en el medio y la dirección de propagación de la onda:

- Ondas longitudinales o de compresión, donde el movimiento de oscilación de las partículas es paralelo a la dirección de la propagación de la onda. Este tipo de onda se puede propagar en sólidos, líquidos y gases (ver Figura 1.3).

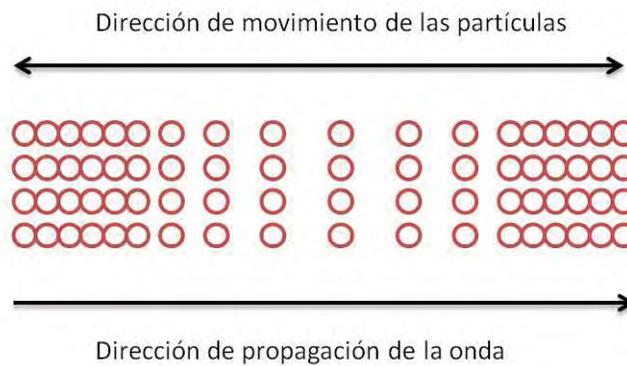


Figura 1.3: Ondas longitudinales.

- Ondas transversales o de corte, donde el movimiento de oscilación de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Esta clase de onda sólo se propaga en medios sólidos ya que los fluidos y gases carecen de enlaces transversales (ver Figura 1.4)

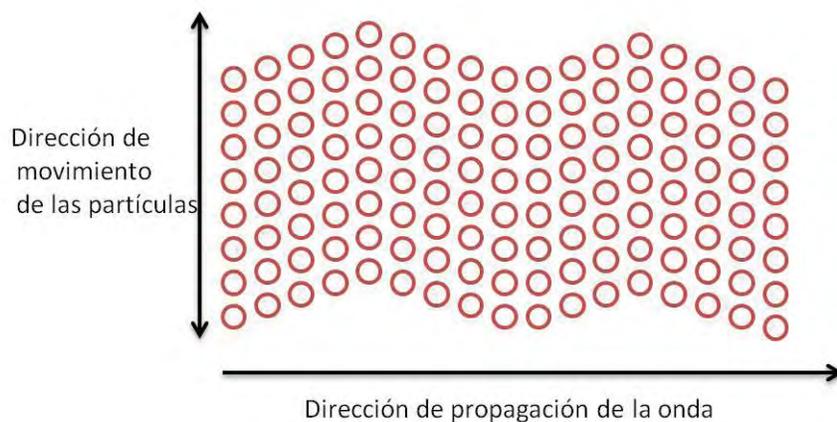


Figura 1.4: Ondas transversales.

### 1.2.3. Fenómenos principales involucrados en la propagación de las ondas ultrasónicas

Cuando las ondas ultrasónicas atraviesan un medio, su intensidad disminuye con la distancia debido a varios efectos:

- La dispersión es ocasionada por que los materiales no son homogéneos, el tamaño de grano y la anisotropía son los factores que mas afectan.
- La absorción es la consecuencia de la transformación de la energía ultrasónica en calor producida por el frenado en la oscilación de las partículas, entre más fino sea el grano del material la absorción disminuye.
- La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a otro, esto se debe a la impedancia acústica, que es la resistencia que opone un medio a la propagación de las ondas. En los END por ultrasonido es importante conocer este factor ya que ayuda en el diseño de transductores ultrasónicos y en la evaluación de la absorción del sonido en el medio. Entre mas diferente sea la impedancia entre los medios mas porcentaje de la onda se refleja (ver Figura 1.5).

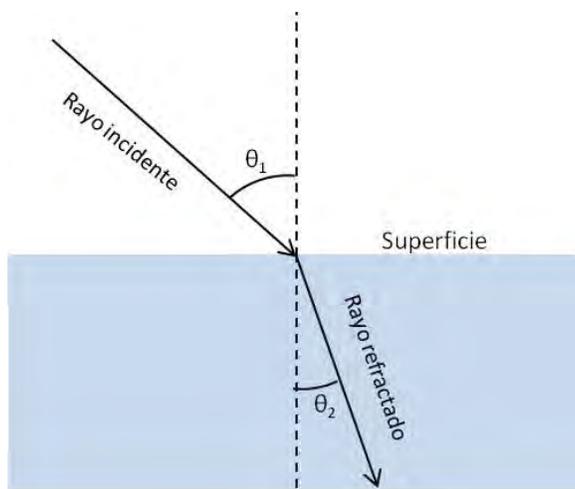


Figura 1.5: Refracción.

### 1.2.4. Generación de ultrasonidos.

Los ultrasonidos son ondas acústicas de altas frecuencias (>20 KHz) que pueden ser generadas generalmente con:

- Transductores piezoeléctricos: se basan en la vibración de un cristal piezoeléctrico con la característica de cambiar de forma al ser aplicada una diferencia de potencial, al contrario, si se ejerce presión mecánica sobre él se generan cargas eléctricas en su superficie, se utilizan para generar altas frecuencias. Para su fabricación se utilizan materiales cerámicos como el Titano de Bario.

- Transductores capacitivos: poseen dos laminas actuando como electrodos del capacitor, una lamina es elástica y la otra rígida, cuando se genera una diferencia de potencial el campo eléctrico variable que se crea entre los electrodos produce fuerzas de atracción y repulsión que hacen vibrar la lámina elástica.
- Transductores electromagnéticos-acústicos: las ondas acústicas se generan por la vibración de la fuerzas de Lorentz que se producen por la interacción de un campo magnético estático y las corrientes inducidas por una bobina alimentada con corriente alterna de alta frecuencia. Este tipo de transductor no es de contacto por lo que se utiliza en aplicaciones donde se encuentran altas temperaturas o superficies rugosas.

### 1.2.5. Técnicas de medición

Las técnicas de medición de los END por ultrasonidos más habituales según la emisión y recepción de los pulsos ultrasónicos son la técnicas de pulso-eco y de transmisión. La técnica de transmisión se realiza cuando se tiene acceso a dos caras opuestas del material, utilizando dos transductores tal que uno transmite el pulso ultrasónico mientras el otro lo recibe. Cuando en la muestra esta presente alguna discontinuidad la intensidad acústica disminuye proporcionalmente a la superficie de dicha discontinuidad. En cambio, la técnica de pulso-eco sólo necesita acceso a una cara del material y un único transductor utilizado tanto como emisor del pulso ultrasónico y como receptor de los ecos generados por la reflexión de energía del pulso enviado debido a discontinuidades y/o defectos. En la Figura 1.6 se ejemplifica tanto la técnica de pulso-eco y de transmisión.

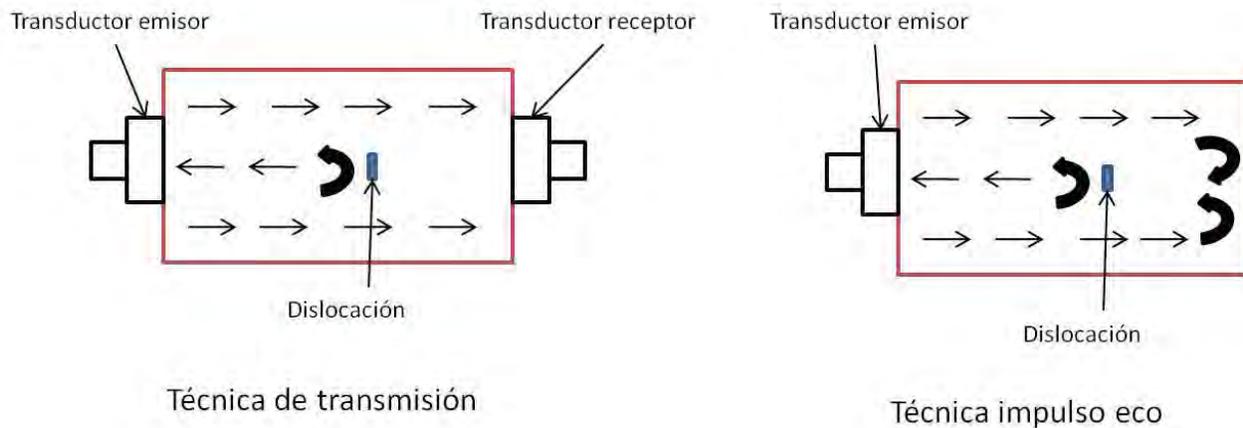


Figura 1.6: Técnicas de emisión y recepción de ultrasonidos.

### 1.2.6. Formatos de representación.

Los tres tipos de formatos de representación más usados (véase Figura 1.7) son:

- Representación tipo A (A-scan). La amplitud de las señales ultrasónicas recibidas son graficadas en función del tiempo recorrido.
- Representación tipo B. Este tipo de representación se utiliza con equipos automáticos, consiste en la representación de una sección de la pieza en inspección, una vez que el transductor sea desplazado por un recorrido determinado.
- Representación tipo C. En este tipo de representación, la pieza representada se muestra con una vista en planta donde las discontinuidades se pueden marcar en escala real, para poder realizar esta representación es necesario inspeccionar por completo una superficie.



Figura 1.7: Sistemas de representación.

### 1.2.7. Escaneo automático

Los sistemas de escaneo ultrasónico automáticos integran tres sistemas principales para lograr su funcionamiento, el sistema de instrumentación ultrasónico, el sistema mecánico que incorpora el sistema de instrumentación y el control mediante una interfase de usuario. Señales ultrasónicas son adquiridas en cada una de las diferentes posiciones establecidas para los transductores. La información ultrasónica adicionalmente puede ser procesada para generar imágenes detalladas de las superficies o del interior del material.

### 1.3. Objetivo de la tesis

El proyecto que aborda la presente tesis está enfocada en el diseño y construcción de un sistema de tomografía ultrasónica en transmisión que comprende el diseño, construcción y puesta a punto de un sistema de posicionamiento radial para el movimiento de transductores ultrasónicos, y un sistema de control para el sincronismo del sistema de posicionamiento con el sistema de emisión-recepción de las señales ultrasónicas. Adicionalmente se ha diseñado una interfase gráfica de usuario para controlar ambos sistemas.

### 1.4. Diseño Conceptual del Sistema de Tomografía Ultrasónica

El sistema de tomografía ultrasónica en inmersión propuesto en esta tesis se compone de tres sistemas principales: el sistema de posicionamiento, el sistema de control y el sistema de emisión-recepción de pulsos ultrasónicos, véase Figura 1.8.

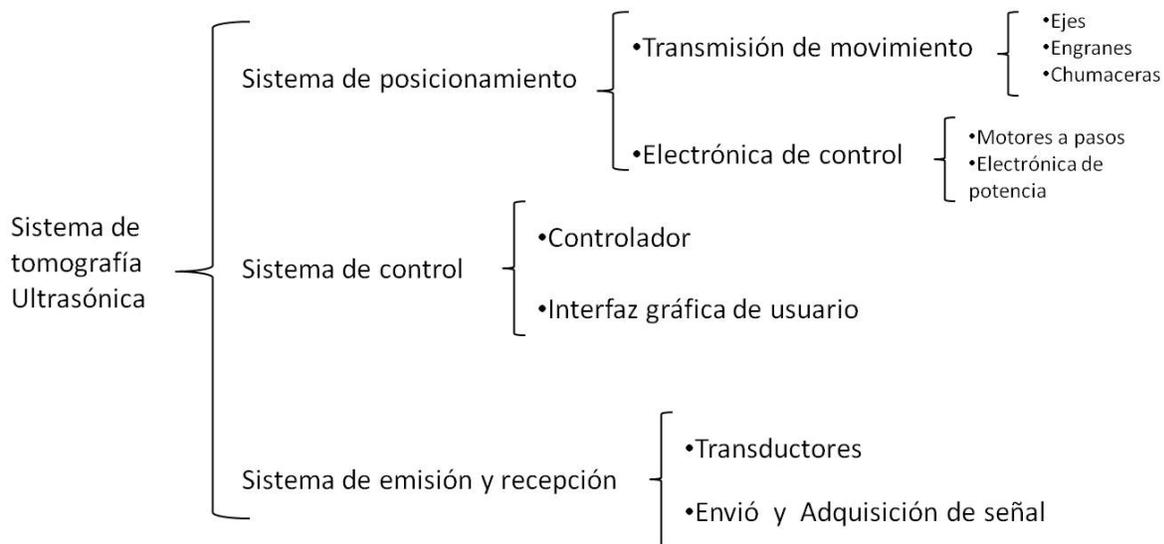


Figura 1.8: Sistema de Tomografía ultrasónica.

El sistema de posicionamiento (SP) es el encargado de generar el movimiento de los transductores ultrasónicos para la adquisición de la señal. El sistema consta de componentes mecánicos que transmiten el movimiento así como la etapa de electrónica de control y potencia que controla y alimenta a los motores. El sistema de control (SC) es el encargado de establecer la comunicación entre el usuario y el sistema, con el objetivo principal de sincronizar el sistema de posicionamiento con el sistema de emisión-recepción de señales ultrasónicas. Finalmente, el sistema de emisión-recepción de señales ultrasónicas es el encargado de generar, transmitir y recibir las ondas ultrasónicas por medio de un osciloscopio y generador de funciones digital programable y dos transductores ultrasónicos. En los capítulos consecuentes se describen cada uno de estos sistemas y los componentes que los forman.

## 1.5. Estructura del trabajo de tesis

El presente trabajo de tesis consta de seis capítulos que están distribuidos de la siguiente manera:

- El primer capítulo está enfocado en dar una breve introducción sobre la inspección ultrasónica y los fenómenos físicos involucrados que son de importancia para el diseño y construcción del sistema propuesto de tomografía ultrasónica.
- El segundo capítulo describe el proceso de diseño y construcción del sistema de posicionamiento, así como también los casi como también los requerimientos y cálculos para diseñar el sistema de transmisión de potencia mecánica.
- El tercer capítulo explica las características de los componentes del sistema de emisión y recepción de pulsos ultrasónicos así como resultados obtenidos al realizar pruebas con diferentes materiales en una solo posición del sistema de tomografía.
- El cuarto capítulo muestra la implementación de los sistemas anteriores así como el protocolo de comunicación entre estos para que trabajen en sincronía.
- El quinto capítulo consta de dos partes, la primera denominada puesta a punto muestra los cambios realizados al diseño original una vez construido y puesto a trabajar, la segunda parte nos muestra los resultados obtenidos con el sistema trabajando por medio de una serie de imágenes obtenidas mediante el escaneo.
- El sexto capítulo consta de las conclusiones del trabajo de tesis.

---

## CAPITULO 2

# Diseño del Sistema de Posicionamiento

---

### 2.1. Diseño General del Sistema de Posicionamiento

#### 2.1.1. Diseño conceptual del sistema de posicionamiento

En este sistema propuesto se utiliza la técnica de inspección por transmisión para realizar las mediciones, por lo que se necesitan dos transductores, uno para generar y el otro para recibir las señales. Para generar un mapeo completo de la pieza es necesario tener un arreglo de los sensores en distintas posiciones dentro de una circunferencia establecida. En la Figura 2.1 se observa un ejemplo del arreglo deseado.

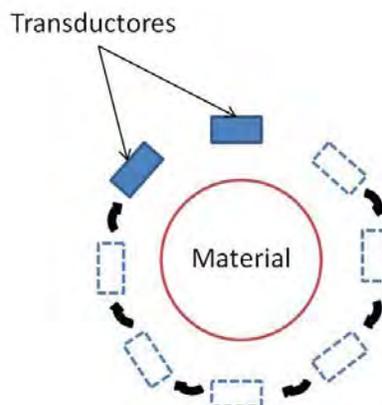


Figura 2.1: Vista superior del arreglo deseado.

El sistema de posicionamiento se encarga de manipular el movimiento de los transductores ultrasónicos para la adquisición de datos. Las especificaciones principales propuestas del sistema de posicionamiento son las siguientes:

- El movimiento de los dos transductores debe ser concéntrico.
- La distancia entre los transductores en todo momento debe ser de 30 [cm].
- La posición de los transductores tiene que ser controlado independientemente.

- Las caras de los transductores deben estar alineadas en todo momento.
- Las mediciones tomadas deben ser exactas y precisas.

El movimiento de los transductores ultrasónicos se realiza por medio de dos ejes concéntricos acoplados a dos brazos que los sujetan. En la Figura 2.2 se muestra la estructura rotacional del diseño propuesto.

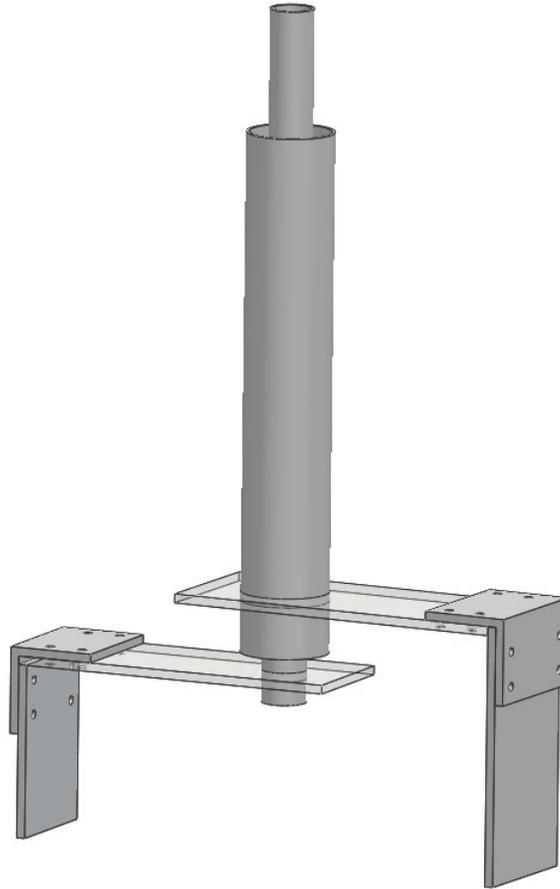


Figura 2.2: Estructura rotacional del diseño propuesto.

La transmisión del movimiento de los dos cilindros es mediante dos pares de engranes acoplados a los cilindros, generando el posicionamiento controlado de los transductores. Las dimensiones de los cilindros y de los brazos que sostiene los transductores ultrasónicos se encuentran en el Apéndice A.

### 2.1.2. Teoría de diseño de engranes

Para realizar el diseño del tren de engranes es necesario definir el torque que transmiten los ejes del sistema. Los parámetros y constantes que definen el torque que se necesita están definidos por la siguiente ecuación [6]:

$$\tau_A = J_A \frac{d^2\theta_A}{dt^2} + \beta_A \frac{d\theta_A}{dt} + F_{CA} \frac{\omega_A}{|\omega_A|} \quad (2.1)$$

donde la suma de los momentos de inercia del sistema están definidos por la variable  $J_A$ ,  $F_{CA}$  es la fricción de Coulomb de los engranes,  $\omega_A$  es la velocidad angular del motor,  $\beta_A$  es el coeficiente de fricción viscosa y  $\tau_A$  es el torque, tal que en la Figura 2.3 se muestran los parámetros involucrados.

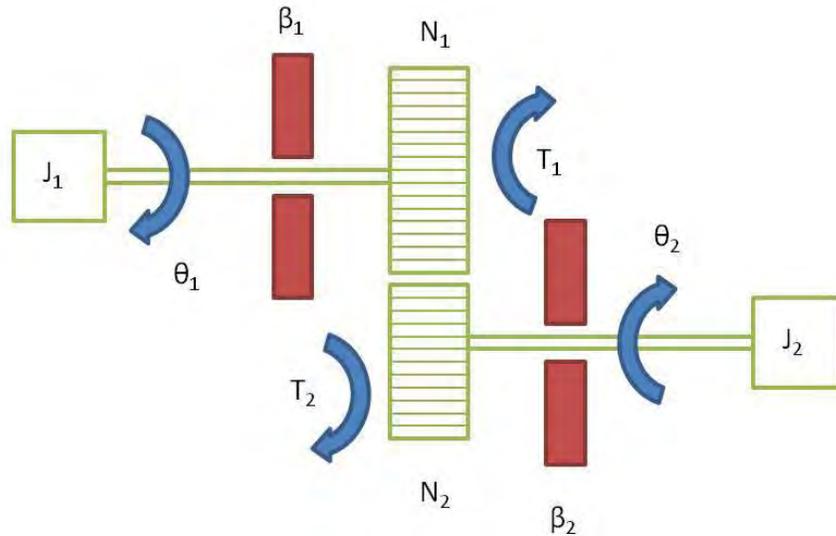


Figura 2.3: Parámetros involucrados en la transmisión de potencia.

Los momentos de inercia que se toman en cuenta en el sistema son con respecto a la estructura rotacional y las placas que componen a los brazos, los cuales son calculados como sigue [3]:

- La inercia de un cilindro hueco con pared delgada está definido por:

$$J_{AC} = m_{CP} r_{cp}^2 \quad (2.2)$$

donde  $m_{cp}$  es la masa del cilindro y  $r_{cp}$  su radio.

- La inercia de la placa está definida por:

$$J_{AP} = \frac{m_{A_2}(a_{A_2}^2 + b_{A_2}^2)}{12} \quad (2.3)$$

donde  $m_{A_2}$  es la masa,  $a$  es el ancho y  $b$  es el largo de la placa.

El tren de engranes que transmite la potencia del motor hacia los cilindros se muestra en la Figura 2.4. Las ecuaciones que definen la geometría de los engranes, el torque y velocidad que transmiten se muestran en la siguiente sección.

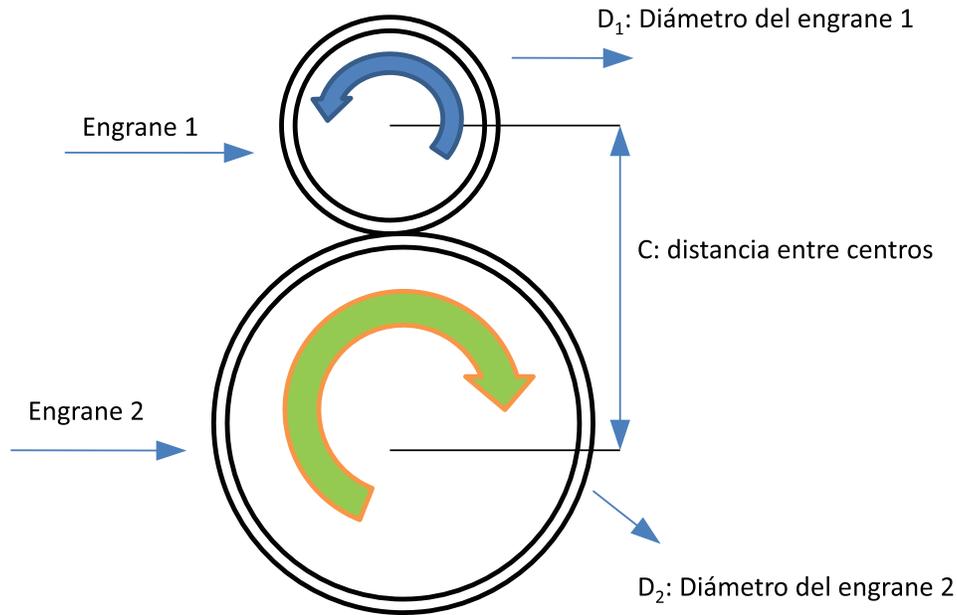


Figura 2.4: Diagrama de relación de dos engranes.

### 2.1.3. Ecuaciones para cálculo de engranes

La relación de la velocidad angular, el torque, el diámetro primitivo y el número de dientes están definidos como sigue:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{D_1}{D_2} \quad (2.4)$$

donde  $N$  es el número de dientes de cada engrane y  $D_i$  sus diámetros respectivos. La distancia entre los centros de los engranes se define como:

$$c = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{N_1 + N_2}{2P} \quad (2.5)$$

donde  $P$  es el paso diametral definido como el número de dientes de un engrane dividido por el diámetro del círculo de paso, que se obtiene como la distancia del arco medida a lo largo del círculo de paso a partir de un punto en un diente:

$$P = \frac{N}{D} \quad (2.6)$$

### 2.1.4. Esfuerzo a la flexión de los dientes.

El esfuerzo a la flexión se genera cuando se aplica una fuerza perpendicular a su eje longitudinal; en el caso del diente de un engrane se idealiza como una viga sujeta a este tipo de esfuerzo. Para estimar el esfuerzo flexionante en los dientes de los engranes se utiliza la ecuación de flexión de Lewis [?]:

$$\sigma = \frac{F_t}{bY} \quad (2.7)$$

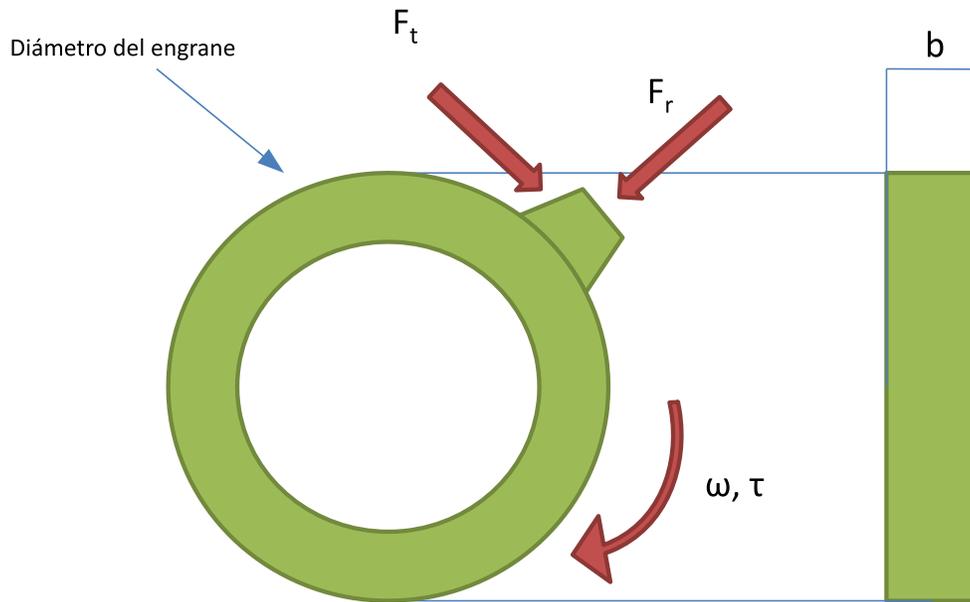


Figura 2.5: Fuerzas presentes en un diente de engrane.

donde  $F_t$  es la fuerza tangencial,  $b$  es la profundidad del diente,  $P$  es el paso diametral e  $Y$  es el coeficiente de Lewis. En la Figura 2.5 se muestran las fuerzas que afectan al diente y los parámetros geométricos utilizados para el cálculo del esfuerzo de flexión. Se toma un ángulo de presión normalizado de  $20^\circ$  por lo que el coeficiente de Lewis para este ángulo de presión se define como:

$$Y = \frac{N}{7(N + 8)} \quad (2.8)$$

### 2.1.5. Razón de contacto e interferencia.

El ángulo  $\phi$  entre la línea de presión (normal) y la tangente común a los círculos de paso es conocido como el ángulo de presión, véase la Figura 2.5. La razón de contacto se define como el ángulo de acción dividido por el ángulo de paso. Dependiendo del valor obtenido es el contacto sobre los dientes [4]:

- Si la razón de contacto es igual que 1, significa que un par de dientes está siempre en contacto.

- Si la razón de contacto es menor que 1, significa que hay un intervalo durante el cual no hay dientes en contacto. Los engranes son usualmente diseñados con una razón de contacto igual a 1.2 como valor mínimo.
- Para una razón de contacto igual que 1.2, significa que un par de dientes está en contacto al 100 % y dos pares están en contacto al 20 % del tiempo.

La razón de contacto está definida por:

$$r_c = \frac{\sqrt[2]{(r_2 + a_2)^2 - (r_2 \cos \phi)^2} - r_2 \sin \phi + \sqrt[2]{(r_1 + a_1)^2 - (r_1 \cos \phi)^2} - r_1 \sin \phi}{P_b} \quad (2.9)$$

donde  $r$  es el radio de cada engrane y  $P_b$  está definido por:

$$P_b = \frac{\pi \cos \phi}{P} \quad (2.10)$$

Si el contacto entre dos engranes ocurre por debajo del círculo base de uno de los engranes, la interferencia se presenta y se pierde la razón de velocidad constante. La interferencia está dada por la formula:

$$r_{max} = \sqrt[2]{(r_2 \cos \phi)^2 + (c \sin \phi)^2} \quad (2.11)$$

### 2.1.6. Selección de materiales y motores

El peso de los componentes depende del material que los conforma, por lo que se analizaron tres diferentes materiales para el diseño y construcción del sistema de posicionamiento, tales como el acero, el aluminio y el acrílico. Dos condiciones se establecieron para la selección del material: i) soportar las cargas de los transductores y el sistema; ii) el material elegido debe tener propiedades mecánicas adecuadas y un bajo peso. En la Figura 2.6 se observa que el peso de los componentes disminuye al usar tanto aluminio como acrílico. Dadas sus buenas propiedades mecánicas y su bajo peso se selecciono el aluminio como el material de manufactura para el sistema.

El torque necesario para mover el sistema depende de la velocidad angular que el motor proporcione. En la Tabla 2.1 se muestran las características de los dos motores que se consideraron. Aunque el servo-motor permite generar un mayor torque que el Motor a pasos, sin embargo, la imposibilidad de modificar la velocidad de operación y no dar un giro completo de 360° lo descarta. Por tanto, se eligió el motor a pasos, (National Instruments, NEMA 17-42BYGHM810) [9] con las características descritas en la Tabla 2.1 y con un consumo máximo de 2.4 [A] y un voltaje máximo de operación de 12 [V].

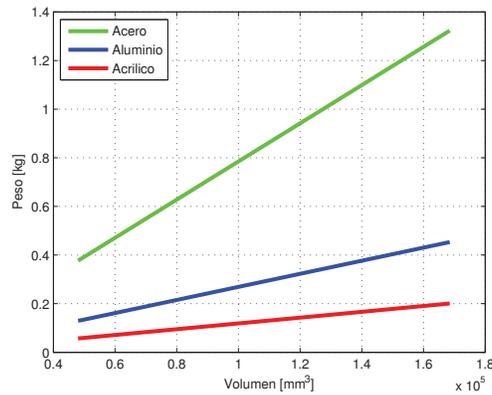


Figura 2.6: Volumen y peso de las diferentes partes del sistema.

Características	Motor a pasos[9]	Servo-motor
Precisión de giro	0.9°	1°
Control eléctrico	✓	✓
Torque	0.4707 [Kg cm]	19.8 [Kg cm]
Precio	400 MX	700MX
Cambio de velocidad	✓	×
Giro	360°	180°

Tabla 2.1: Características de los motores a seleccionar.

La fricción  $F_{CA}$  entre los engranes comparada con las demás variables es mínima por lo se desprecia su contribución. Para obtener los momentos de inercia del sistema se necesitan las dimensiones y peso de los componentes. En la Tabla 2.2 y 2.3 se muestran el volumen y el peso de los componentes, respectivamente, y en el Apéndice A se encuentran sus respectivas dimensiones.

Pieza	Volumen [mm³]
Cilindro A (CP)	48028.66
Cilindro B (CS)	49242.46
Soporte transductor A (SA)	168518.19
Soporte transductor B (SB)	130648.26

Tabla 2.2: Volumen de los componentes del sistema.

Definido el material y la geometría del sistema, se calcula el torque necesario de los motores. En en la Tabla 2.4 se muestran los datos obtenidos para los dos ejes. El torque máximo del motor es de 0.43 [N m], por lo que se aumenta la potencia por medio de un tren de engranes para que el sistema trabaje a velocidades mayores pero sacrificando el torque.

Pieza	Peso [Kg]			
	Aluminio	Acero	Acrílico	Componentes
Cilindro A (CP)	0.1299	0.3770	0.0571	-
Cilindro B (CS)	0.1324	0.3865	0.0585	-
Soporte sensor A (SA)	0.4533	1.3228	0.2005	-
Soporte sensor B (SB)	0.3514	1.0255	0.1554	-
Transductor A				0.3
Transductor B				0.3

Tabla 2.3: Peso de los componentes del sistema.

	Brazo Transductor A	Brazo Transductor B
Velocidad angular	10.47 [rad/s]	10.47 [rad/s]
Momento de inercia	0.0019 [Kg m <sup>2</sup> ]	0.0015 [Kg m <sup>2</sup> ]
Viscosidad del Agua	0.001 [Pa s]	0.001 [Pa s]
Fricción	0	0
Torque	0.4083 [N m]	0.3245 [N m]

Tabla 2.4: Datos para calcular el torque.

### 2.1.7. Diseño del tren de engranes

El torque define las características de los engranes por la ecuación (2.5) y por criterio de diseño la distancia entre sus centros es de 60 [mm]. Con estos datos se obtienen tanto el diámetro como el número de dientes de los engranes tal como se muestra en la Tabla 2.5.

	Engrane	Piñón
Diámetro [mm]	80	40
Número de dientes	40	20
Paso diametral [mm]		0.5
Razón de interferencia		1.69
Razón de contacto máxima		57.15
Razón de contacto calculada		42.00

Tabla 2.5: Características de los engranes.

De la ecuación (2.7) y los datos de las Tablas 2.4, 2.5 se calculan los esfuerzos a la flexión de los dientes del tren de engranes, como se muestra en la Tabla 2.6. Como el esfuerzo a la flexión del aluminio

es mayor a los datos obtenidos y presenta un menor peso que el acero (veasé Figura 2.6), por tanto se ha elegido maquinar los engranes en aluminio.

	Engrane	Piñón
$F_t$	8.32 [N]	4.16 [N]
Y	0.10	0.11
$\sigma$	$166,4 \times 10^3$	$75,63 \times 10^3$

Tabla 2.6: Esfuerzo a la flexión del tren de engranes.

Diseñados los dos pares de engranes se acoplan al sistema obteniendo el diseño que se muestra en la Figura 2.7.

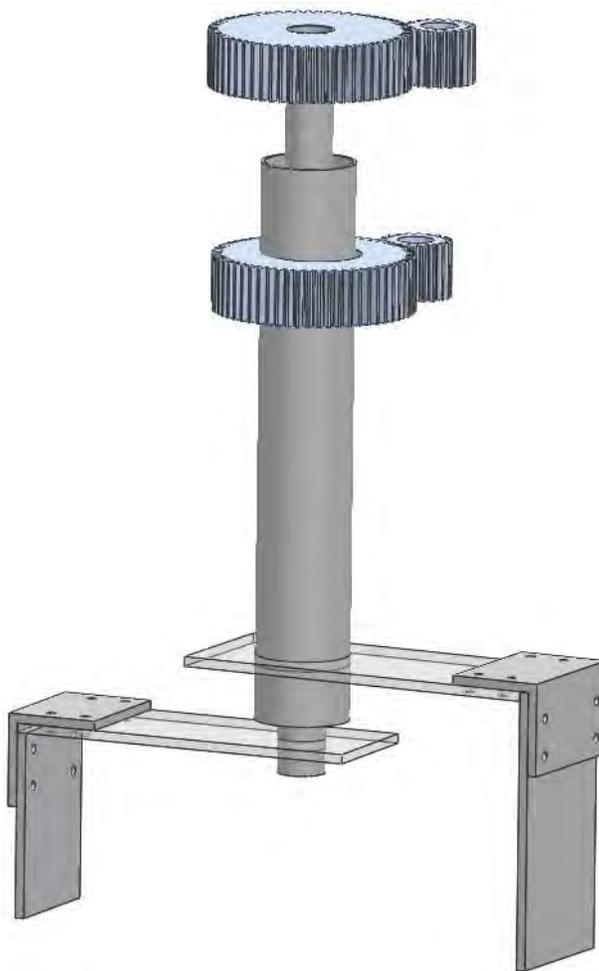


Figura 2.7: Engranes acoplados a los ejes.

### 2.1.8. Manufactura de los engranes

Para verificar que los engranes se acoplaran correctamente antes de su manufactura, se llevo a cabo una simulación tridimensional del movimiento del sistema de engranaje. Esta simulación se ejecuto usando el software de diseño mecánico *Solid Edge* definiendo un diseño tridimensional del sistema de engranes. Una vez comprobado el funcionamiento correcto del sistema de engranaje diseñado mediante la simulación se obtuvieron los planos de los cuatro engranes que se muestran en el Apéndice A. La manufactura del engranaje se realizo en el Instituto de investigaciones en materiales (IIM-UNAM). Con la ayuda de los responsables en el área de manufactura se realizo el código de control numérico a partir de los planos dados para manufacturar los engranes. El mecanizado de los dientes de los engranajes a nivel industrial se realizan en máquinas talladoras construidas ex-profeso para este fin, llamadas fresas madres. Para reducir el costo de este proceso la manufactura se hizo en una fresadora universal utilizando cortadores de carburo de tungsteno de 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 de pulgada. Los cortadores de 1/4 y 1/8 se utilizaron para marcar el contorno de los engranes y hacer el barrenado de la parte central. Los cortadores de 1/16 y 1/32 se utilizaron para definir el contorno de los dientes. En la Figura 2.8 se muestra una fotografía de los engranes y piñones manufacturados.

### 2.1.9. Unión engrane-eje y piñón-motor.

La unión de los engranes con los ejes fue por medio de soldadura. Normalmente, para soldar aluminio se usa soldadura por arco bajo gas protector con un electrodo consumible que es un proceso en el que el arco se establece entre un electrodo de hilo continuo y la pieza a soldar, estando protegido de la atmósfera circundante por un gas inerte (proceso MIG) o por un gas activo (proceso MAG). No obstante, como los ejes de aluminio tienen un espesor muy pequeño es necesario utilizar otro método de soldadura para que el material no se deshaga. Se utilizo un producto para soldar aluminio, cobre, zinc, bronce que se llama *DuraFix* que no necesita fundente, solo un soplete que alcance los 400°C como gas propano u oxioacetileno. La unión producida es más fuerte que el metal original y libre de porosidades y escoria. Los pasos para soldar las piezas utilizando *Durafix* son:

1. Limpiar bien la superficie
2. Usar un cepillo de acero inoxidable.
3. Fundir *DuraFix* directamente en la pieza calentada previamente, pero nunca aplicando la llama directamente a la varilla *DuraFix*.

Para unir los piñones con los ejes de los motores se seleccionó un cople de aluminio para un eje de 5 [mm] con un prisionero para sujetar el eje del motor. El cople está unido con el piñón por medio de cuatro tornillos de 1/8 de pulgada. En la Figura 2.9 se muestra el cople seleccionado.

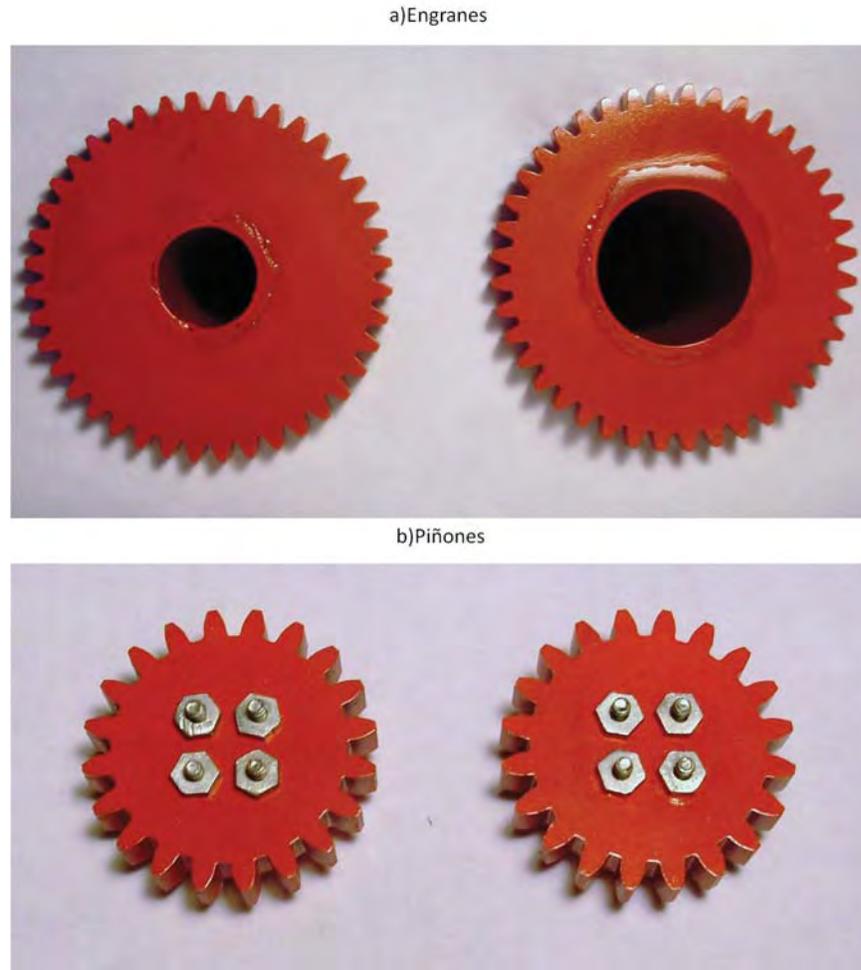


Figura 2.8: Engranes manufacturados.

### 2.1.10. Selección de chumaceras.

Para permitir el movimiento rotatorio de los ejes además de proporcionar sujeción se ha elegido una chumacera SKF-F202 . Este modelo permite la unión de la chumacera por medio de cuatro tornillos al soporte general, permitiendo que los ejes no tenga movimiento en la dirección perpendicular a la rotación. Se requirió una chumacera por cada uno de los dos ejes que comprende el sistema de posicionamiento. La dimensiones del radio de cada eje son 1 y 1 1/2 de pulgada. En la Figura 2.10 se observan las chumaceras utilizadas.

### 2.1.11. Diseño de los soportes de los transductores.

Los soportes que sostienen los transductores constan de dos elementos, el primero es el brazo principal acoplado por medio de un tornillo aprisionador al eje. El segundo elemento es la placa donde se monta el transductor. Esta placa o brazo de sujeción puede ser cambiandapor otras dependiendo del diámetro del



Figura 2.9: Cople seleccionado.



Figura 2.10: Chumaceras seleccionadas.

transductor utilizado. El brazo de sujeción está acoplada al brazo principal mediante un par de escuadras de acero que unen a los dos elementos en su parte interior. Los transductores están fijados a los brazos de sujeción mediante un empaque de plástico que limita su movimiento. En la Figura 2.11 se observa el diseño esquemático de los soportes.

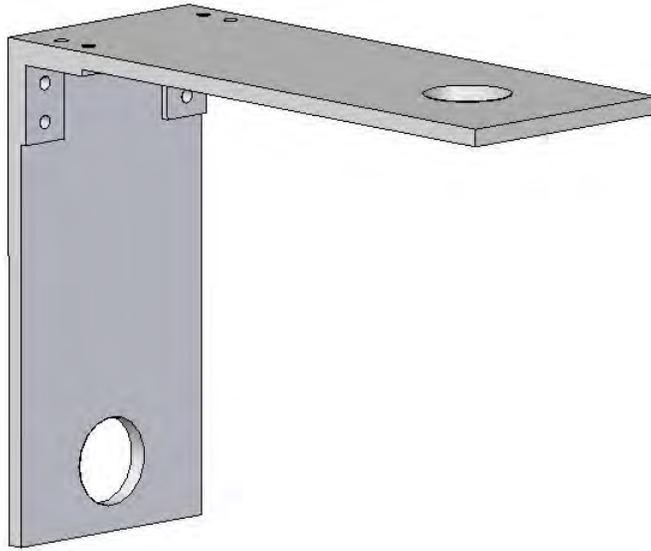


Figura 2.11: Soporte de los transductores.

### 2.1.12. Diseño del soporte para el sistema de posicionamiento.

El soporte brinda estabilidad y sujeción para las diferentes partes del sistema de posicionamiento, compuesto de dos partes principales:

- La primera parte está encargada de proporcionar sujeción para los engranes, motores, chumaceras y ejes. Por medio de un sistema de cuatro tornillos sin fin, se puede alinear el sistema además de modificar su altura.
- La segunda parte del soporte proporciona la altura necesaria para que el tanque con agua donde se realizan las pruebas no soporte el peso del sistema de posicionamiento.

Para la construcción del soporte se utilizaron dos placas de aluminio de 6 [mm] con dimension 200 x 250 [mm], paralelas entre ellas y unidas en sus extremos mediante cuatro tornillos sin fin de 3/8 de pulgada. En cada una de las placas se encuentra un juego de engranes con su respectivo motor y chumacera. La chumacera y los motores están sujetos al soporte por medio de cuatro tornillos de 3/8 . La segunda parte del soporte es construida con una placa de aluminio de 6 [mm] de 450 x 600 [mm] con cuatro soportes de aluminio de 450 [mm] de altura y 25 x 12 [mm] de área transversal. En la Figura 2.12 se observa una representación esquemática de los dos soportes y los componentes anteriormente descritos.



a) Soporte principal



a) Soporte secundario

Figura 2.12: Soportes del sistema. a) Principal y b) Secundario.

## 2.2. Diseño del sistema electrónico de control de potencia

El sistema de potencia se encarga de transformar y controlar la energía eléctrica con la finalidad de alimentar otro equipo. Los dispositivos electrónicos que conforman este sistema son semiconductores que deben cumplir con las siguientes características [8]:

- Proporcionar dos estados claramente definidos, uno de alta impedancia (bloqueo) y otro de baja impedancia (conducción).
- Controlar el paso de un estado a otro con facilidad y con un mínimo consumo de potencia.
- Capacidad de soportar grandes intensidades de corriente y altas tensiones cuando está en estado de bloqueo y con pequeñas caídas de tensión entre sus electrodos cuando está en estado de conducción. Ambas condiciones los capacitan para controlar grandes potencias.
- Rapidez de funcionamiento para pasar de un estado a otro.

El sistema de potencia consta de dos partes, la primera es la encargada de transformar y regular la corriente alterna a continua para alimentar a los motores a pasos. Se ha utilizado una fuente de poder comercial (3-12 [V] a 2.4 [A]) que cuenta con las características que demandan los motores a pasos. La segunda etapa es la encargada de recibir los pulsos enviados por el microcontrolador y generar el movimiento de los motores. El circuito electrónico seleccionado es un Puente H con especificaciones mostradas en [17] tal que es un sistema de conmutación controlado por dos señales digitales de baja potencia, generalmente es utilizado para el control de giro de los motores. Cuando el sistema detecta un “1” lógico en una de sus dos entradas de control y un “0” en la otra, se conecta el motor a la fuente de alimentación con una determinada polaridad. Por otra parte, si la señal de control que estaba en “1” pasa a “0” y la de “0” pasa a “1”, entonces el puente H conecta la fuente al motor con la polaridad invertida facilitando el giro en sentido contrario. El puente H trabaja con 4 transistores: 2 NPN y 2 PNP. Dado que el puente H seleccionado no cuenta con diodos de protección para corrientes inversas generadas por las bobinas, se deben de conectar los diodos a la salida de los pines que generan los pulsos para energizar las bobinas.

En la Figura 2.13 se presenta un diagrama del circuito implementado para el sistema de potencia. Se utilizó el software *ARES* para generar automáticamente las pistas del circuito y el PCB (*printed circuit board*). En la Figura 2.14 se observan las pistas generadas, que fueron impresas en hojas de transferencia para plasmarse en una placa PCB por medio de calor. Mediante un baño en cloruro férrico se eliminó la capa de cobre que sobraba dejando las pistas solamente. Una fotografía del circuito con los elementos soldados se muestra en la Figura 2.15. Los componentes utilizados para implementar el sistema de potencia se muestran en la Tabla 2.7.

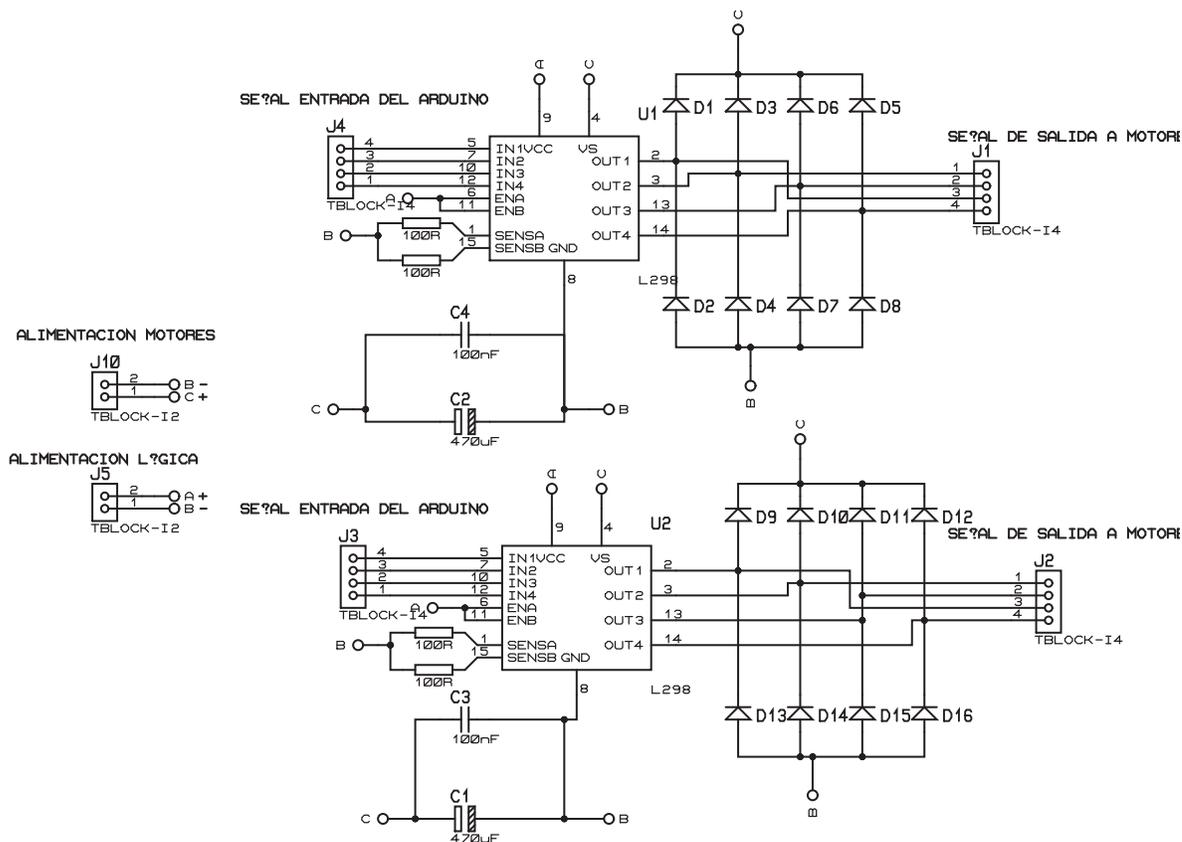


Figura 2.13: Diagrama del sistema electrónico de control de potencia para un motor a pasos.

Componentes	Especificación
Resistencias	0.5 omhs a 2 watts
Capacitores	100 uF, 470 uF
Puente h	L298
Diodos	1N4947
Disipador de calor	TO-220
Conectores	Molex macho y hembra de 4 pins.
Convertidor de voltaje	De 3 a 12 Vcc, 2.5 Amps.
Conector para PCB	—
Placa PCB	10x10 [cm]
Clorúro Férrico	—
Hojas de transferencia	—

Tabla 2.7: Componentes del sistema de control de potencia.

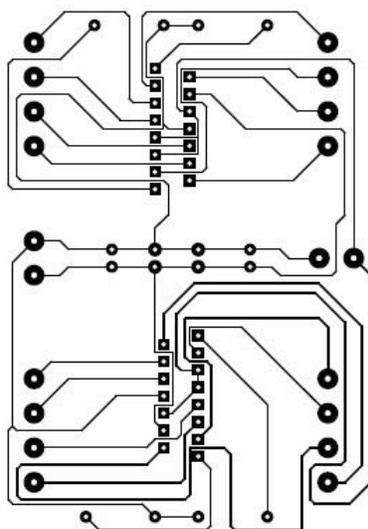


Figura 2.14: Pistas generadas en el software ARES.



Figura 2.15: Fotografía del circuito implementado para el control de potencia.

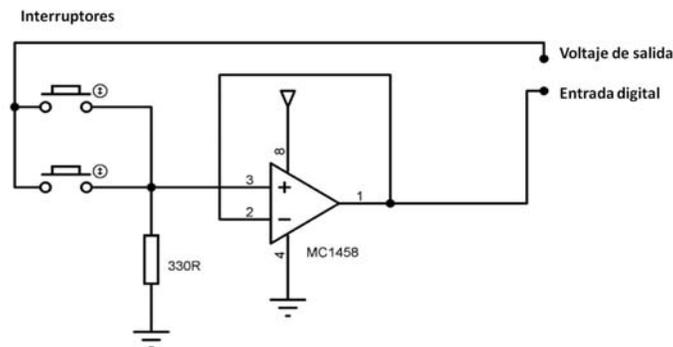
### 2.3. Paro de emergencia

Para proteger a los motores de un mal funcionamiento se cuenta con un sistema de paro de emergencia que consta de dos interruptores, acoplados en cada uno de los lados de uno de los brazos que soportan a un transductor. En caso de que uno de los motores pierda el control este se parara inmediatamente al accionar el interruptor. El tipo de interruptor cuenta una con palanca de lamina para su accionamiento y tiene un rango de trabajo de 5 [A] y 125 [Vca]. Su vida útil es de 200,000 operaciones eléctricas y 100,000 mecánicas. En la Figura 2.3 se muestra una imagen del interruptor seleccionado.

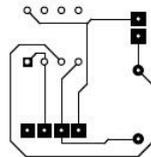


Figura 2.16: Interruptor utilizado para el paro de emergencia.

El interruptor trabaja en una configuración normalmente abierta, en operación normal el interruptor manda un “0” lógico al sistema de control, mientras que en el momento de un mal funcionamiento en el sistema de posicionamiento manda un “1” lógico. El sistema de control al recibir la información del interruptor mantiene el funcionamiento o genera una interrupción. Dado que los interruptores están localizados cerca del agua se diseñó un circuito de protección para evitar que el sistema de control sufra algún daño. Este circuito consta de un amplificador operacional MC1458 en configuración de seguidor tal que proporciona la misma tensión de salida que de entrada siendo este el dispositivo que se dañe en caso de un corto circuito. En la Figura 2.17 se muestra el circuito implementado junto con las conexiones eléctricas de los interruptores, las pistas generadas para construir el circuito físico y una fotografía del circuito construido. Aparte de los interruptores de paro de emergencia, el sistema cuenta con un botón de encendido y apagado para generar un paro automático en el sistema interrumpiendo la adquisición y movimiento de los motores. En el momento de utilizar el botón de encendido para generar un paro definido por el usuario, la información del sistema de posicionamiento se pierde por lo que se tiene que empezar una nueva inspección.



a) Circuito diseñado



b) Pistas generadas

Figura 2.17: Circuito de protección para el paro de emergencia.

---

## CAPITULO 3

# Sistema de Emisión-Recepción de Pulsos Ultrasónicos

---

### 3.1. Esquema general del sistema emisión-recepción

El sistema de emisión-recepción ultrasónico es el encargado de generar los pulsos así como recibir y guardar la señales obtenidas. El sistema de emisión puede ser dividido en tres elementos, como sigue:

- • Sistema para la excitación electrónica del transductor emisor
- • Transductor que transforma la energía eléctrica en mecánica, generando el ultrasonido.
- • Material acoplante entre el transductor emisor y el elemento a inspeccionar.

El sistema de recepción está encargado de recibir los pulsos ultrasónicos y puede ser dividido en dos etapas:

- ○ Un transductor encargado de transformar la energía mecánica en eléctrica.
- ○ Un sistema de procesamiento encargado de adquirir digitalmente la señal e interpretarla.

Las mediciones se realizan por medio de la técnica en transmisión en inmersión, como se menciona en el Capítulo 1 que consiste de dos transductores diseñados para inspecciones en inmersión (Panametrics), uno genera el pulso ultrasónico y el otro lo recibe para cada posición configurada en el sistema de posicionamiento. En la Figura 3.1 se observa los elementos involucrados en el sistema de emisión-recepción ultrasónica.

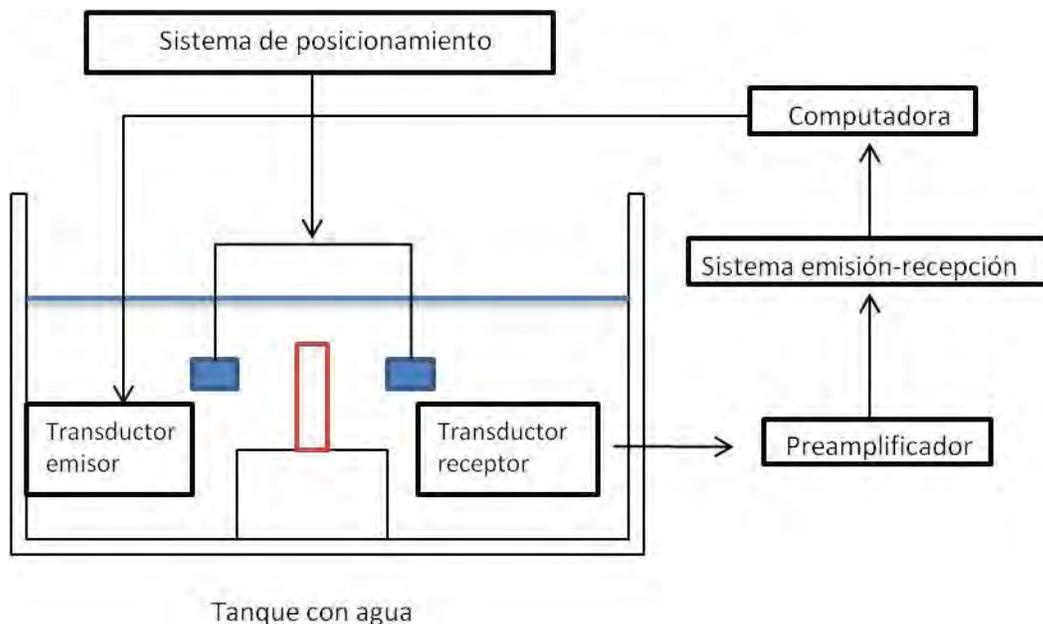


Figura 3.1: Elementos involucrados en la emisión-recepción ultrasónica.

### 3.2. Implementación del sistema de emisión-recepción

La excitación electrónica y la adquisición de los pulsos ultrasónicos han sido implementados con un osciloscopio digital programable HandyScope HS3 (véase Figura 3.2). Este equipo cuenta con dos canales de entrada y un generador de funciones. El generador de funciones se utiliza para la excitación electrónica del transductor emisor y los canales de entrada se emplean para la adquisición tanto del pulso de emisión como del pulso ultrasónico correspondiente al transductor de recepción. Las especificaciones del HandyScope HS3 se muestran en la Tabla 3.1.

Sistema de adquisición	Parámetros
Rango	200 [mV]–80 [V]
Canales de entrada	2 analógicos, BNC
Resolución	8-16 [bits]
Memoria	131072 muestras por canal.
Generador de funciones	
Resolución	12 [bits]
Amplitud	-12 a 12 [V]
Frecuencia de muestreo	50 [MHz]
Canales de salida	1 analógico

Tabla 3.1: Especificaciones del HandyScope HS3.



Figura 3.2: HandyScope HS3.

### 3.2.1. Excitación electrónica para el transductor emisor.

El generador de funciones del HandyScope HS3 puede configurarse para varios tipos de funciones, como: onda senoidal, onda cuadrada, onda triangular, pulso constante y ruido. Una ventaja de este generador de funciones es la virtud para implementar señales arbitrarias que el usuario define, ya sea por medio de un archivo o por software externo. Por tanto, mediante la generación de señales arbitrarias se implementa pulsos adecuadas para excitar electrónicamente el transductor emisor. Para iniciar la generación de la señal se tienen dos opciones:

- Señal digital externa.
- Generación automáticamente al habilitar el generador de funciones.



Pin	Description	Pin	Description
1	Ground	14	Ground
2	Reserved	15	Ground
3	External Power in DC	16	Reserved
4	Ground	17	Ground
5	+5V out, 10 mA max.	18	Reserved
6	Ext. sampling clock in (TTL)	19	Reserved
7	Ground	20	Reserved
8	Ext. trigger in (TTL)	21	Generator Ext Trig in (TTL)
9	Data OK out (TTL)	22	Ground
10	Ground	23	I <sup>2</sup> C SDA
11	Trigger out (TTL)	24	I <sup>2</sup> C SCL
12	Reserved	25	Ground
13	Ext. sampling clock out (TTL)		

Figura 3.3: Diagrama de conexiones.

La sincronía entre el sistema de posicionamiento y el sistema de emisión-recepción se implementa por medio de una señal digital externa proveniente del sistema de control a fin de iniciar la generación de las señales previamente establecidas. Cada vez que el sistema de posicionamiento termina de moverse a la siguiente posición, envía un pulso digital hacia generador confirmando que inicie la siguiente generación de pulsos. Para obtener la sincronía fue necesario la construcción de un cable DB-25 con conexiones específicas siguiendo el diagrama de la Figura 3.3. En el sistema propuesto sólo se utilizó tres conexiones: disparador externo del generador (pin 21), disparador de salida (pin 11) y disparador de entrada (pin 8) con sus respectivas tierras.

### 3.2.2. Transductores

Los transductores utilizados son de inmersión con frecuencia de operación a 1 MHz. Un transductor de inmersión está diseñado para trabajar sumergido en agua sin presentar corrosión en sus elementos, además la cara del transductor está diseñada para tener la misma impedancia que el agua para evitar en la medida de lo posible pérdidas en energía acústica entre estos dos medios (material piezoeléctrico y agua). El diámetro del transductor es de 1 pulgada y su longitud es de 65 [mm]. En la Figura 3.4 se observa una imagen de los transductores utilizados.



Figura 3.4: Transductores ultrasónicas de inmersión.

### 3.2.3. Pre-amplificador

La función del pre-amplificador es aumentar el nivel de la señal. En la configuración propuesta el pre-amplificador está conectado en la salida del transductor receptor para amplificar las señales recibidas (véase Figura 3.1) y después procesarlas. La amplificación se utiliza dado que al trabajar con materiales con microestructuras heterogéneas, los pulsos que viajan a través de estos materiales sufren de mayor atenuación y en consecuencia se necesita una mayor ganancia en la señal para obtener mejores resultados. Para el sistema implementado se utiliza un pre-amplificador de la marca *Panametrics* con una ganancia constante de 34 dB. La Figura 3.5 muestra una fotografía del pre-amplificador usado.

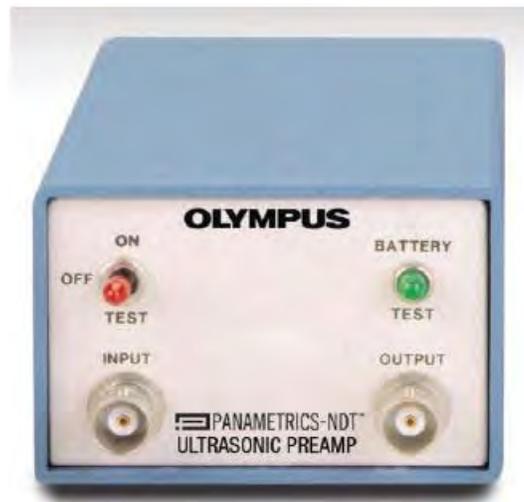


Figura 3.5: Preamplificador Olympus.

Para realizar las conexiones entre los transductores, el Pre-amplificador y el sistema de generación-emisión se seleccionaron cables BNC de 1.5 [m] de longitud y con una impedancia de 50 Ohms para evitar interferencias eléctricas en las mediciones.

### 3.2.4. Adquisición de las señales ultrasónicas

Mediante los dos canales de entrada del HandyScope HS3 se adquieren tanto los pulsos de emisión como los de recepción. Las señales adquiridas digitalmente son muestreadas a diferentes frecuencias de muestreo. En la configuración de los canales de entrada se establece la resolución en bits a utilizar y la sensibilidad de cada uno de estos. En la Figura 3.6 se muestra la adquisición de los pulsos de entrada y salida cuando se transmiten en agua, en aluminio y bronce. Del lado izquierdo se muestran los pulsos generados por el emisor, siendo los pulsos utilizados los mismos para todos los casos y definidos por la siguiente ecuación:

$$p(t) = (1 - \cos(\pi f_c t)) \cos(2\pi f_c t), \quad \forall t < 2/f_c \quad (3.1)$$

donde  $f_c$  indica la frecuencia del pulso sintético generado y  $t$  el tiempo.

Mientras que en la parte derecha se presentan para cada caso los pulsos recibidos. Para materiales como el aluminio se observa que con una ganancia en emisión igual a la usada en el caso de la propagación solamente en agua se obtienen buenos resultados, no obstante, entre más complejo sea la estructura del material se tendrán más pérdidas de energía y por consiguiente se tendrá que aumentar la ganancia de amplificación tanto en recepción como en emisión, por ejemplo como en el caso del bronce. Además de los factores de la microestructura tenemos factores de ruido que afectan en gran medida las mediciones. Es importante tener un sistema que sea preciso y exacto para obtener la mejor información del material.

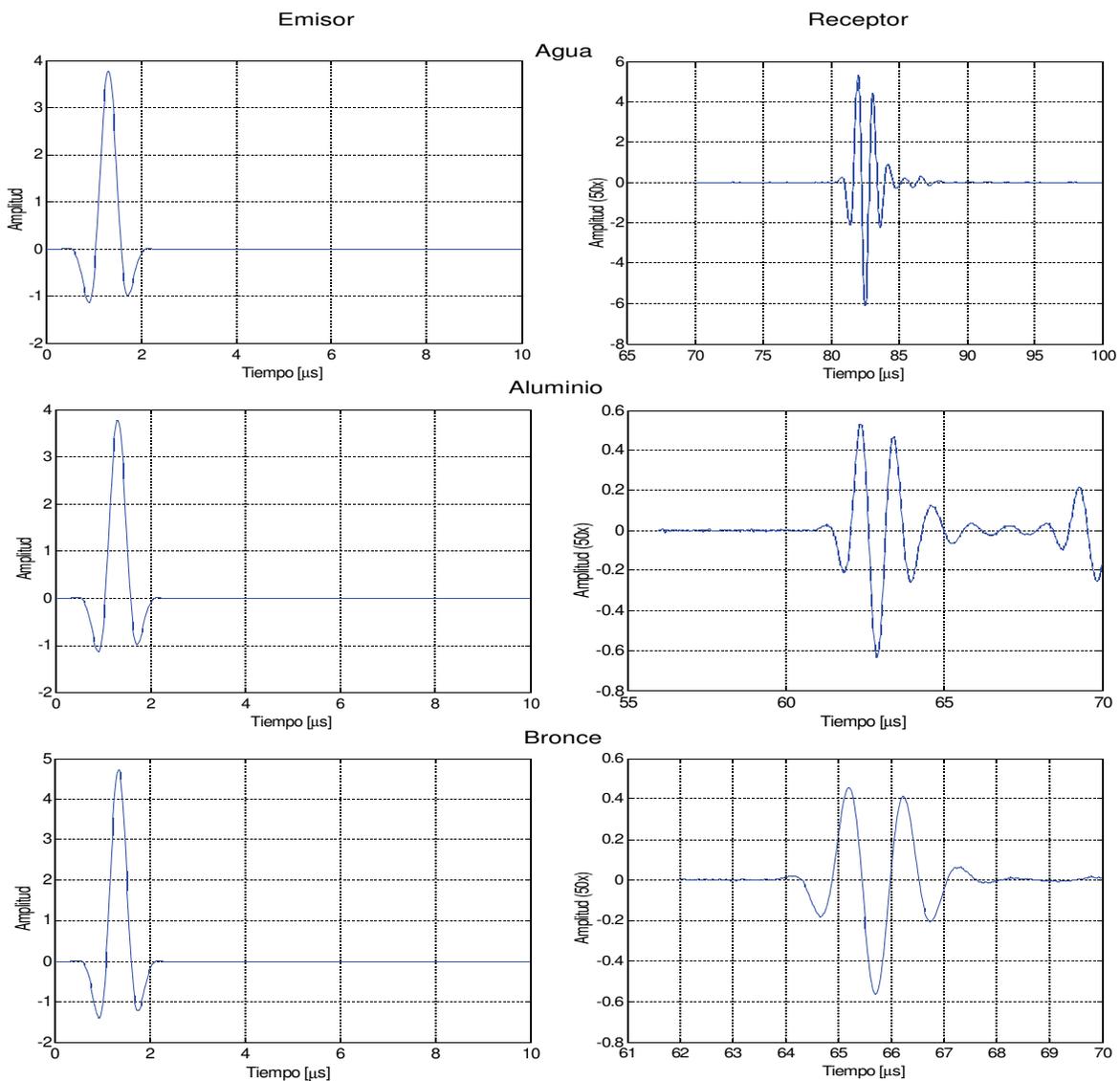


Figura 3.6: Adquisición de los pulsos emitidos y recibidos en agua, aluminio y bronce.

# Diseño e Implementación del Sistema de Control

---

### 4.1. Diseño del sistema de control

Un sistema de control es el encargado de regular el comportamiento de si mismo o de otro sistema con la finalidad de lograr un funcionamiento predeterminado. Existen dos tipos de sistemas de control según su comportamiento: i) Sistemas de control de lazo abierto; ii) Sistemas de control de lazo cerrado. Los sistemas de control de lazo abierto son aquellos en los cuales el proceso actúa ante una señal de entrada generando una señal de salida, este tipo de sistemas se caracteriza por ser sencillos, no son estables ante perturbaciones y la señal de salida no se compara con la señal de entrada del sistema. Los sistemas de control de lazo cerrado están en función de la señal de salida, utilizando la realimentación para ajustar el proceso de control, este tipo de control se caracteriza por ser más complejo, más estable ante perturbaciones y la señal de salida se compara con la entrada del sistema [1, 6].

Un sistema de control se divide en una serie de elementos característicos:

- Variable a controlar Es la señal de salida del sistema, se desea que esta adquiera un valor determinado.
- Sistema. Los elementos que realizan una determinada función.
- Actuador. Es el elemento que actúa sobre el sistema, este modifica la señal de salida.
- Controlador. Es el elemento que comanda al actuador.
- Sensor. Es el elemento que permite medir el valor de la variable de salida.
- Señal de referencia. Es el valor que se quiere que tome la variable de salida.

Se ha seleccionado un sistema de control abierto, debido a que el sistema de posicionamiento no se verá afectado por perturbaciones externas, además de que el movimiento está limitado por las características intrínsecas de los motores a pasos. Los elementos característicos del sistema implementado se muestran en la Tabla 4.1.

Variable a controlar	Posición de los sensores ultrasonicos
Sistema	Sistema de posicionamiento de tomografía
Controlador	Microcontrolador
Actuador	Motor a pasos
Señal de referencia	Paso de motor seleccionado por el usuario

Tabla 4.1: Elementos del sistema de control.

Dado que el sistema de control es de lazo abierto no se implemento un sensor físico para medir la posición de los sensores ultrasónicos, ya que se define y delimita por el sistema de control. El proceso de control implementado se lleva a cabo por medio de un microcontrolador, encargado de controlar el movimiento de los motores basándose en la configuración dada por el usuario. En la siguiente sección se describe la implementación del controlador.

## 4.2. Controlador

El controlador es el encargado de mantener en sincronía el sistema de posicionamiento y el sistema de adquisición de datos, también mantiene una comunicación con una interfaz gráfica de usuario implementada para indicar cada movimiento realizado por el sistema de posicionamiento. El microcontrolador ATmega328 ha sido seleccionado debido a su capacidad para establecer comunicación serial vía USB, por su ambiente de programación amigable. Las especificaciones de la placa Arduino y el microcontrolador ATmega328 se encuentran en el Apéndice B.

El algoritmo que utiliza el microcontrolador está dividido en tres etapas. La primer etapa es la encargada de inicializar las variables utilizadas, las librerías para generar el movimiento del motor a pasos y la inicialización de la comunicación serial. La segunda etapa está encargada de recibir los datos enviados y tomar las decisiones basados en estos. La tercera etapa es la encargada de realizar, el movimiento de los motores, su regreso y el envío del pulso digital para sincronizarse con el sistema de emisión recepción. La Figura 4.1 muestra un diagrama de flujo concerniente a las etapas mencionadas.

Como se puede observar en la Figura 4.1 la parte principal del algoritmo del controlador es un *switch-case* encerrado en una función cíclica, donde su función es estar preguntando por las diferentes acciones a tomar dependiendo de los datos que se envíen. El resto del código consiste en las funciones que controlan el movimiento de los motores, su regreso y la generación del pulso digital para la sincronía con el sistema de adquisición.

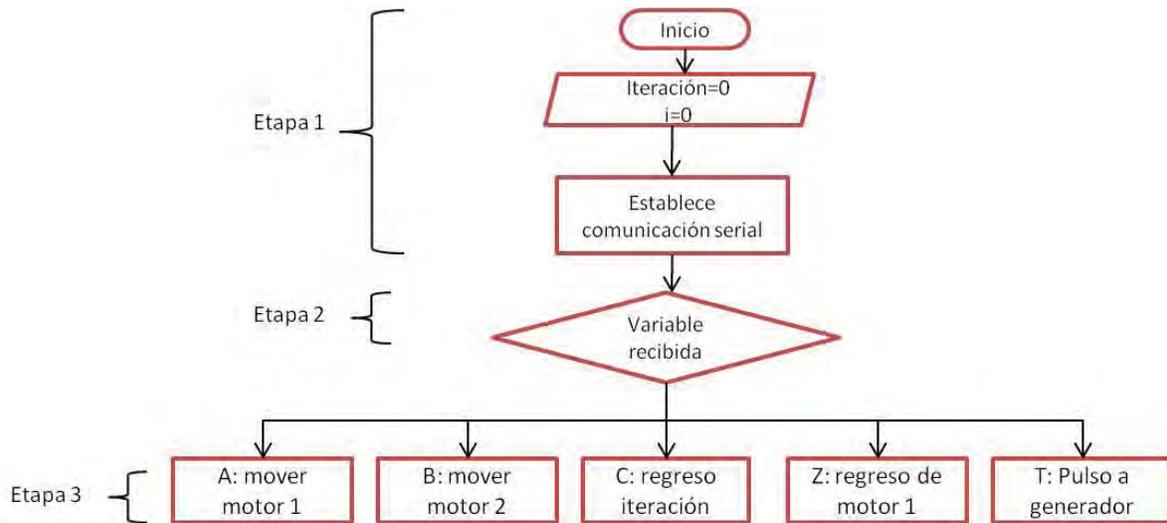


Figura 4.1: Algoritmo de control implementado en el microcontrolador ATmega328.

Para generar el movimiento de los motores se utilizó una librería especializada del Arduino, facilitando la programación y con la ventaja de solo indicar al motor el número de pasos que tiene que dar para llegar al ángulo deseado. Para mantener los sistemas en sincronía, el microcontrolador genera dos señales entre cada paso de los motores. La primera señal indica al sistema de adquisición que el sistema de posicionamiento esta listo para que se inicie el proceso de emisión-recepción en la posición establecida. Cuando ha finalizado el proceso de emisión-recepción en dicha posición, el sistema de adquisición envía una señal al controlador indicando que ha terminado, en este momento el controlador inicia el movimiento del sistema de posicionamiento para iniciar el mismo proceso en la siguiente posición. Una vez finalizado la inspección de tomografía ultrasónica, el controlador reinicia todas las variables y regresa el sistema de posicionamiento al cero establecido. Las rutinas de movimiento de los motores están programadas en el controlador. Con el fin de modificar las variables de velocidad y ángulo de medición así como establecer la comunicación con el usuario, se diseño una interfaz gráfica de usuario.

### 4.3. Interfaz gráfica de usuario

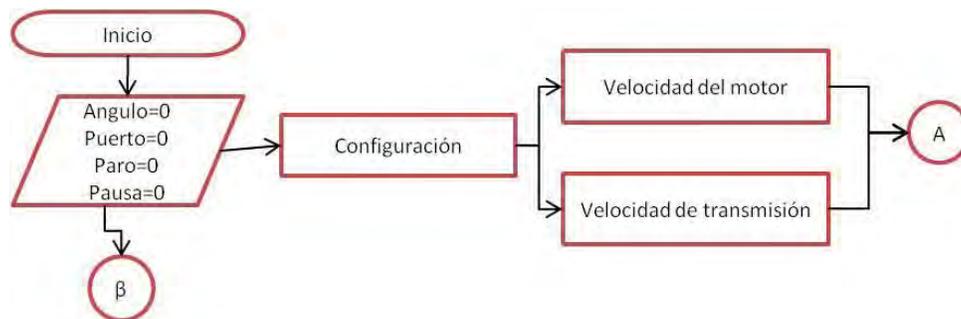
La interfaz gráfica de usuario es la encargada de establecer la comunicación entre el usuario y el sistema de control. Las especificaciones generales de la interfaz son:

- Permitir que el usuario modifique el ángulo de paso, la velocidad de paso de los motores y las características del generador de funciones.
- Permitir guardar configuraciones utilizadas para su uso posterior así como los datos generados por el escaneo ultrasónico.
- Tener opciones de pausa y reinicio del sistema de posicionamiento.

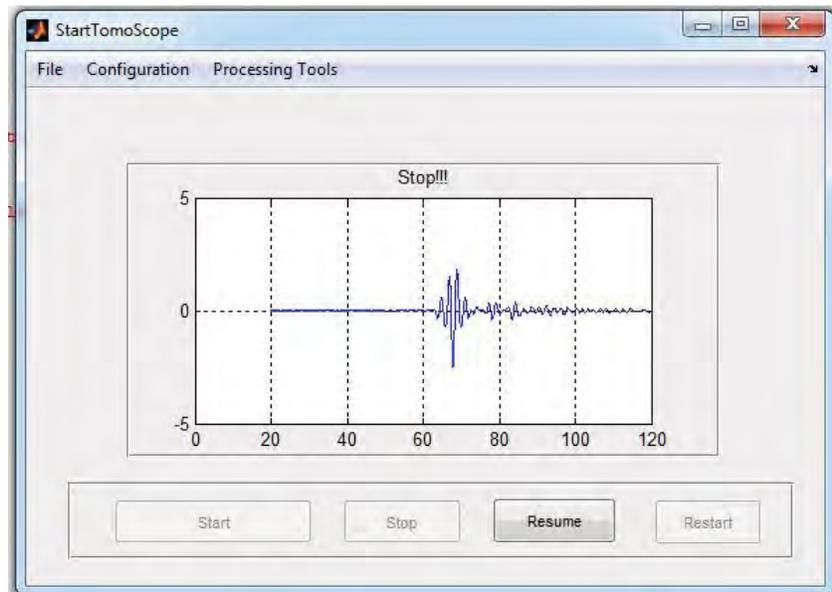
La interfaz gráfica está dividida en dos partes, la primera encargada de la comunicación con el sistema de control, la segunda encargada de comunicarse con el sistema de generación de señales.

#### 4.3.1. Comunicación con el sistema de posicionamiento.

La primera etapa del programa consiste en inicializar las librerías necesarias para el funcionamiento del sistema de adquisición y las variables que se utilizan en el programa, además de enviar al controlador variables preestablecidas para la configuración de la velocidad y el ángulo de los motores. Esta etapa se muestra en la Figura 4.2.



a)



b)

Figura 4.2: Etapa 1 a) Algoritmo de interfaz gráfica. b) Interfaz gráfica.

La segunda etapa del programa empieza cuando termina la inicialización y se está en espera del comienzo de la adquisición. En esta etapa el usuario tiene las opciones de ingresar la configuración manualmente o cargando un archivo previamente guardado en una sesión anterior. Las opciones disponibles de configuración para el sistema de posicionamiento son el ángulo que se desea que de el

motor y la velocidad que se requiera. Estas opciones se encuentran en la pestaña de configuraciones de la interfaz principal. Una vez presionado el botón de inicio se deshabilita los botones de configuración impidiendo que el usuario cambie la configuración una vez iniciado el proceso, si se desea cambiar al configuración de estas variables es necesario reiniciar el sistema y volver a empezar la adquisición. Esta etapa se muestra en la Figura 4.3.

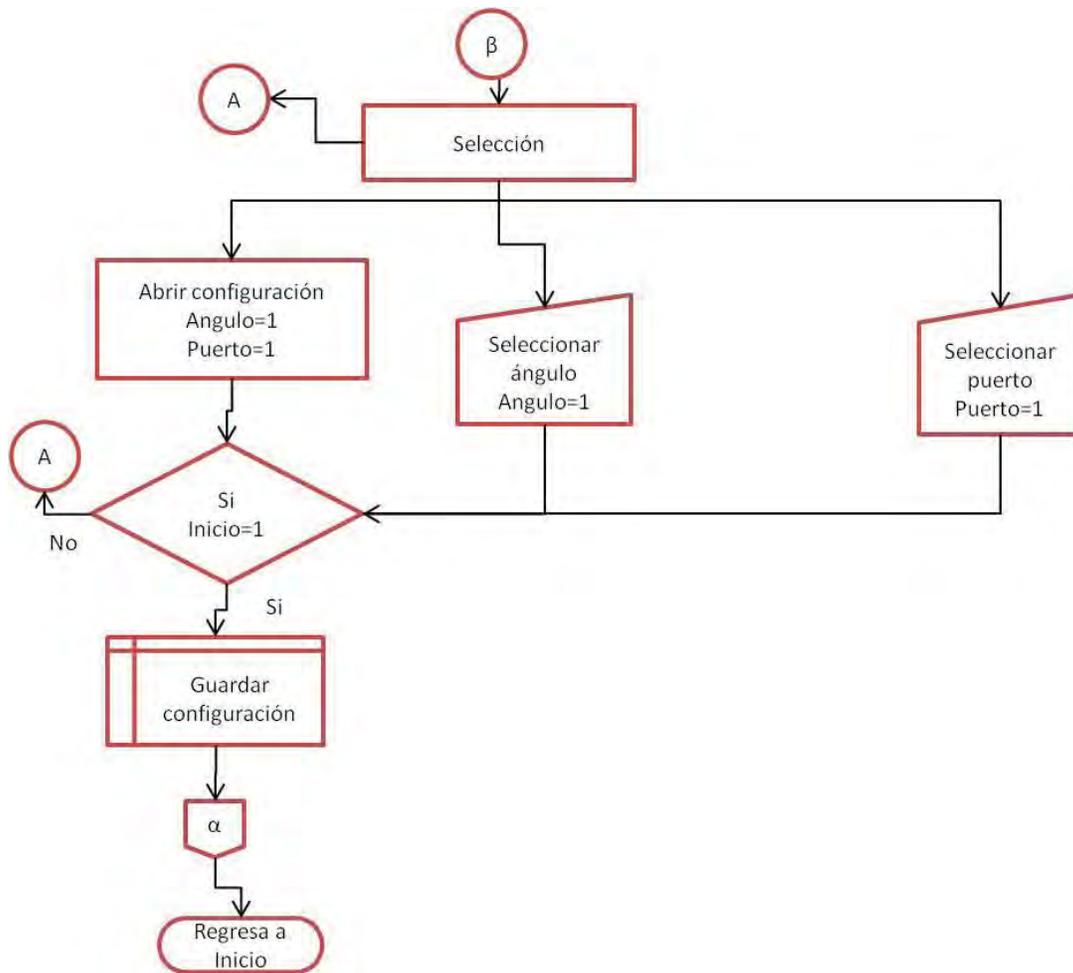


Figura 4.3: Etapa 2 del algoritmo de interfaz gráfica.

Una vez iniciada la adquisición el programa pasa a su tercera etapa que consiste en iniciar la sincronizan con el sistema de adquisición. El protocolo de comunicación que se utiliza se muestra en la Tabla 4.2, donde se indica que acción realiza el controlador en el momento en que el programa la mande los datos via comunicación serial.El algoritmo de esta etapa se muestra en la Figura 4.4.

Caracter	Acción que se realiza
A	Mover motor 1
B	Mover motor 2
C	Regreso de motor 1
Z	Reinicio del sistema
P	Configuración velocidad y ángulo
T	Pulso digital para la sincronización

Tabla 4.2: Protocolo de comunicación.

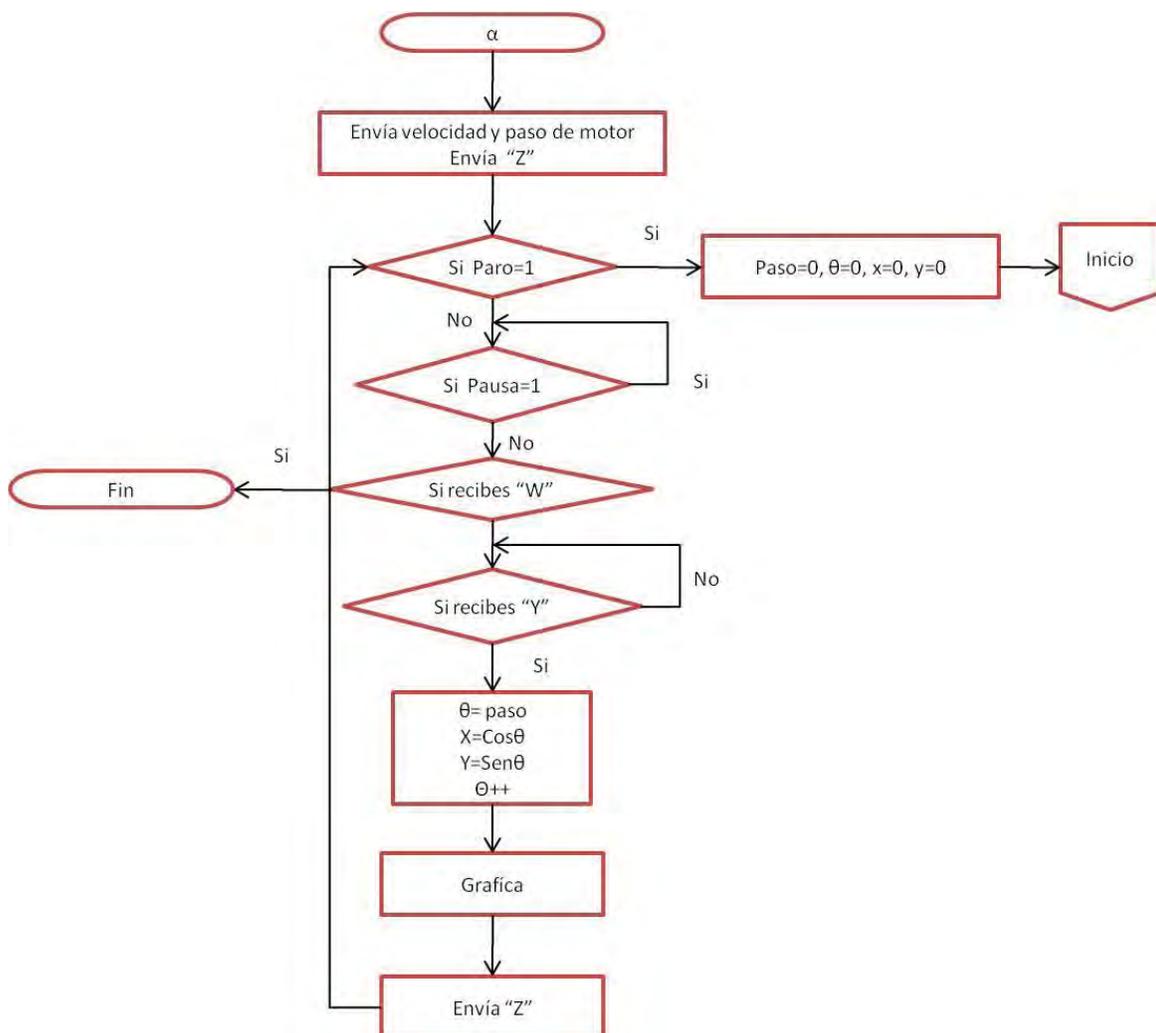


Figura 4.4: Etapa 3 del algoritmo de interfaz gráfica.

### 4.3.2. Comunicación con el sistema de emisión-recepción

El HandyScope HS3 cuenta con un software para configurar tanto del generador como los canales de recepción, sin embargo, para tener un mejor control sobre el sistema y sus configuraciones así como para sincronizar la adquisición de la señal con el sistema de posicionamiento se decidió diseñar un programa específico para el sistema implementado. En la segunda etapa del programa, donde se encuentra la configuración del sistema de posicionamiento, también se encuentra la parte que esta encargada de configurar el sistema de emisión y recepción ultrasónica. El usuario puede cambiar la frecuencia de muestreo, el numero de muestras, la sensibilidad y las pre-muestras, así como el tipo de señal que desee, dependiendo del material que vaya a utilizar y los transductores. En la Figura 4.5 se observa una imagen del la interfaz gráfica encargada de esta etapa.

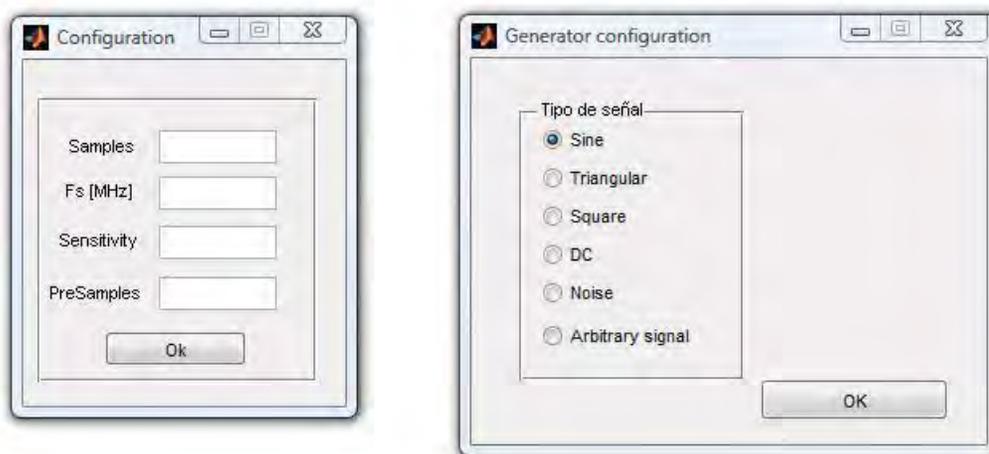


Figura 4.5: Interfaz gráfica para la configuración del generador.

El algoritmo utilizado para realizar la configuración del sistema se muestra en la Figura 4.6. Cada una de las configuraciones del sistema se encuentra en un sub-menu que el usuario puede acceder por medio de la interfaz principal.

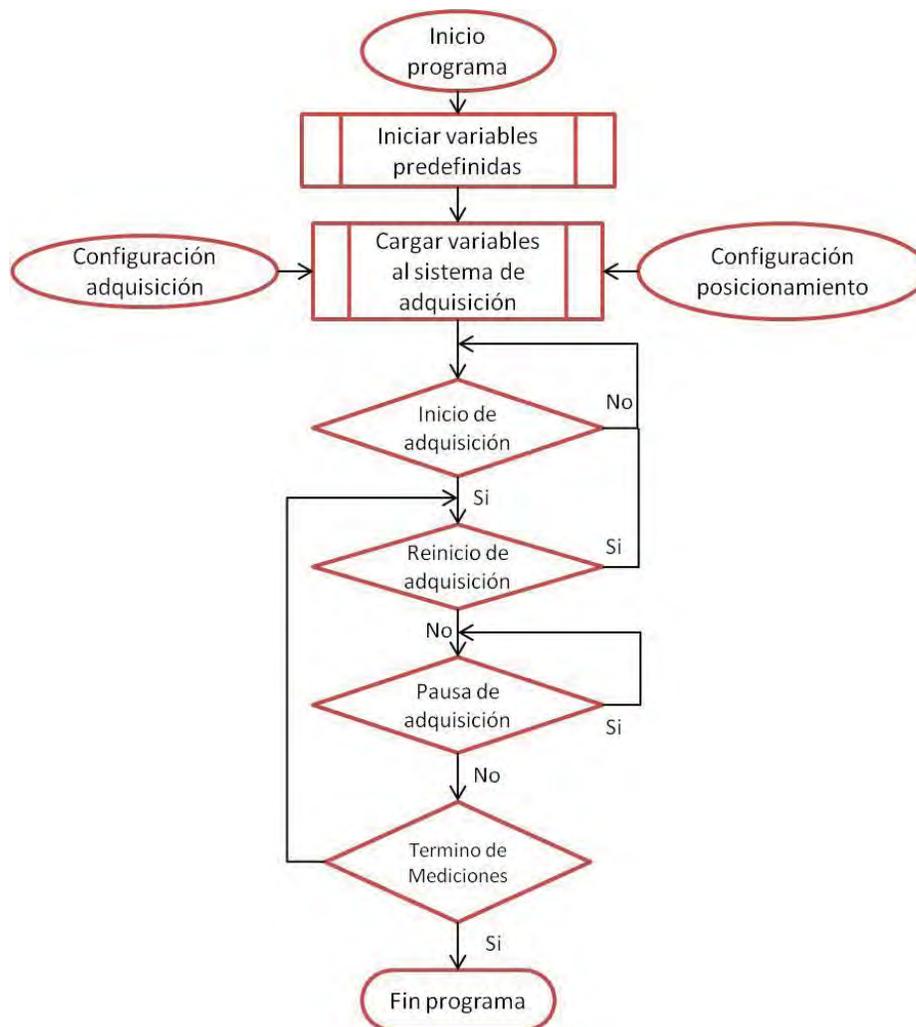


Figura 4.6: Algoritmo de configuración del sistema de adquisición.

---

# CAPITULO 5

## Construcción, Puesta a Punto y Pruebas del Sistema de Tomografía

---

### 5.1. Construcción del sistema de tomografía ultrasónica

Con base en los diseños, construcción e implementación descritos en capítulos anteriores de los sistemas que conforman el sistema de tomografía ultrasónica, se muestra a continuación su integración. Para integrar los diferentes elementos que constituyen al sistema de posicionamiento se acoplaron los dos pares de engrane-piñón a los engranes previamente soldados a los ejes. Los piñones están unidos por medio de sus respectivos coples a los motores como se muestra en la Figura 5.1.

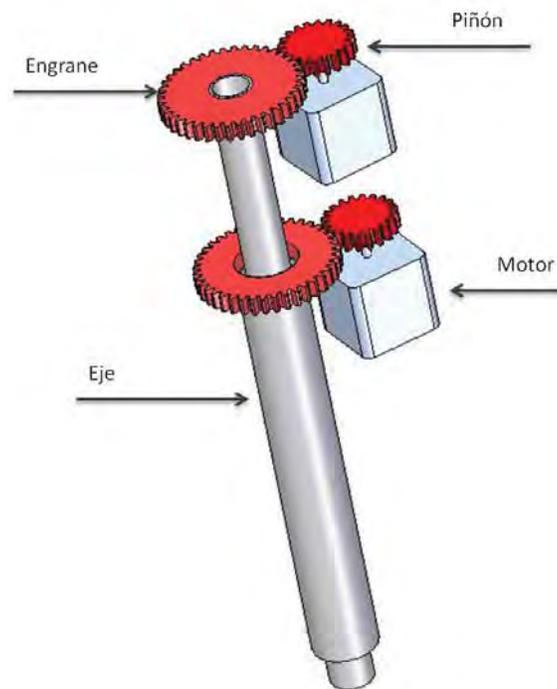


Figura 5.1: Integración Engranes-Piñon, Ejes y Motores.

Estos elementos se montan sobre el soporte principal mediante las chumaceras que están fijadas al soporte, las cuáles darán sujeción además de permitir el giro de los ejes, véase Figura 5.2a. Los ejes se sujetan a las chumaceras por medio de prisioneros que se ajustan por medio de una llave allen.

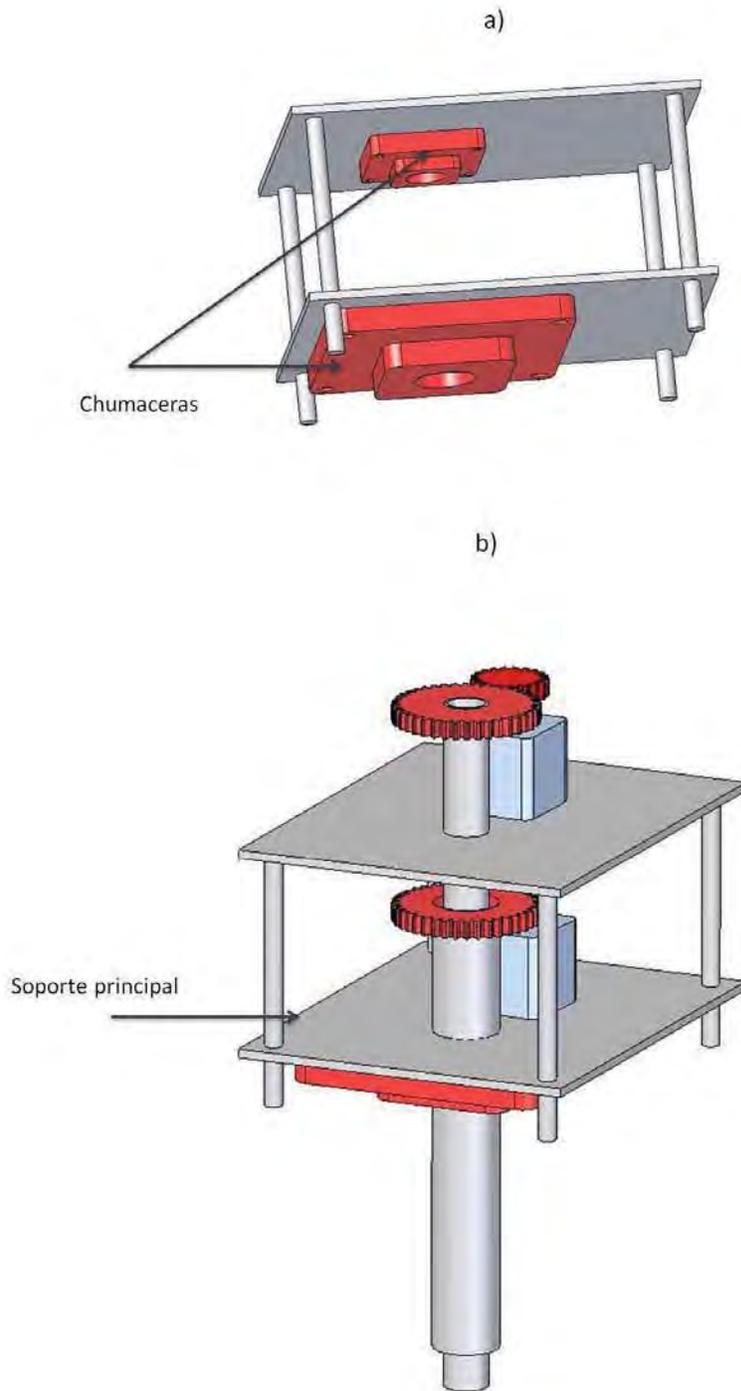


Figura 5.2: Integración del sistema de posicionamiento. Soporte principal con: a) chumaceras b) ejes.

Para mantener sujetos los motores a la distancia requerida se unen al soporte por medio de dos tornillos con tuerca por cada motor como se muestra en la Figura 5.2b. Este tipo de unión permite que cuando se inicie el movimiento entre los engranes, el motor se mantenga fijo evitando que haya un mal funcionamiento entre los dientes de los engranes. El soporte principal está unido por medio de cuatro tornillos con sus respectivas tuercas al soporte secundario que mantiene el sistema a una altura deseada sobre el tanque de agua donde se llevan a cabo las pruebas.

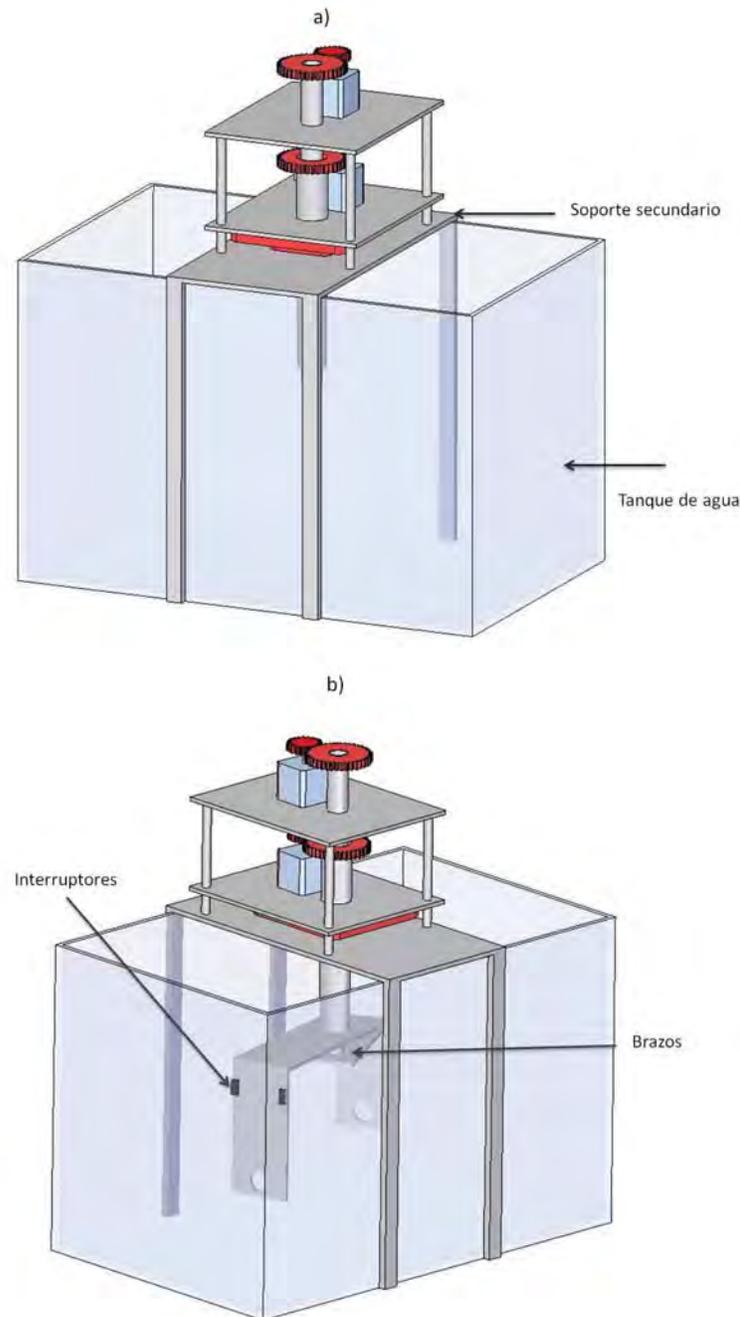


Figura 5.3: Sistema de posicionamiento. Integración con: a) Soporte Secundario, b) Brazos.

Además, el soporte secundario evita que el tanque de agua sostenga el soporte principal tal como se muestra en la Figura 5.3a. En la Figura 5.3b se muestra el sistema de posicionamiento con la incorporación de los brazos que sostienen a los transductores. Cada uno de los soportes de los transductores puede ser intercambiable por otros dependiendo del tamaño del transductor a usar. Esta característica del sistema permite hacer pruebas con diferentes tipos transductores sin tener que cambiar todo el brazo que lo sostiene. En el brazo principal se sujetan mediante tornillos dos interruptores que funcionan como paro de emergencia en el caso de mal funcionamiento tanto del sistema de control como del sistema de posicionamiento.

El sistema de control implementado sobre la plataforma Arduino y el circuito de electrónica de potencia que alimenta a los motores se integraron en un gabinete de plástico con conectores e interfases como se muestra en la Figura 5.4.

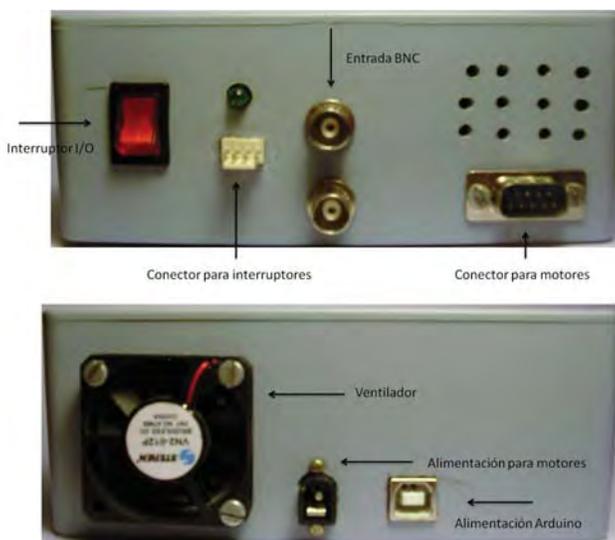


Figura 5.4: Fotografías de las caras del gabinete para el sistema de control y electrónica de potencia.

Como se observan de las fotografías, el gabinete cuenta con:

- Una salida para alimentación y comunicación de la plataforma Arduino mediante un conector USB.
- Un interruptor de encendido-apagado.
- Una salida para alimentar los motores usando un conector DB-9.
- Dos conectores BNC.
- Un conector Molex macho para los interruptores de paro de emergencia.
- Un indicador led de encendido.

Cabe mencionar que uno de los conectores BNC que incluye el gabinete está reservado para futuras funciones de sincronía e interfases con otros equipos. El otro conector BNC se conecta al conector DB-25 del osciloscopio TiePie (disparador externo del generador, pin 21) con la funcionalidad de sincronizar físicamente el sistema de control y posicionamiento de los motores con el sistema de emisión-recepción para la generación de la señal de emisión por parte del generador de funciones.

En la Figura 5.5 se muestra un esquema con las conexiones entre los componentes. El sistema de control y el sistema de emisión-recepción se comunican y se alimentan con la computadora por medio de cables USB. Las conexiones entre los transductores, el HandyScope HS3 y el pre-amplificador se realizan por medio de cables BNC de 1.5 [m] de 50 [ $\Omega$ ]. se hizo una conexión en paralelo por medio de un conector T entre el canal de salida del generador de funciones del HandyScope HS3 y un canal de entrada (CH1) para medir la señal correspondiente a la emisión del pulso ultrasónico generado. El otro canal de entrada (CH2) del HandyScope HS3 adquiere las señales recibidas por el transductor receptor, previamente amplificadas por el preamplificador. Los motores están alimentados mediante un cable DB-9 que se conecta al sistema de control.

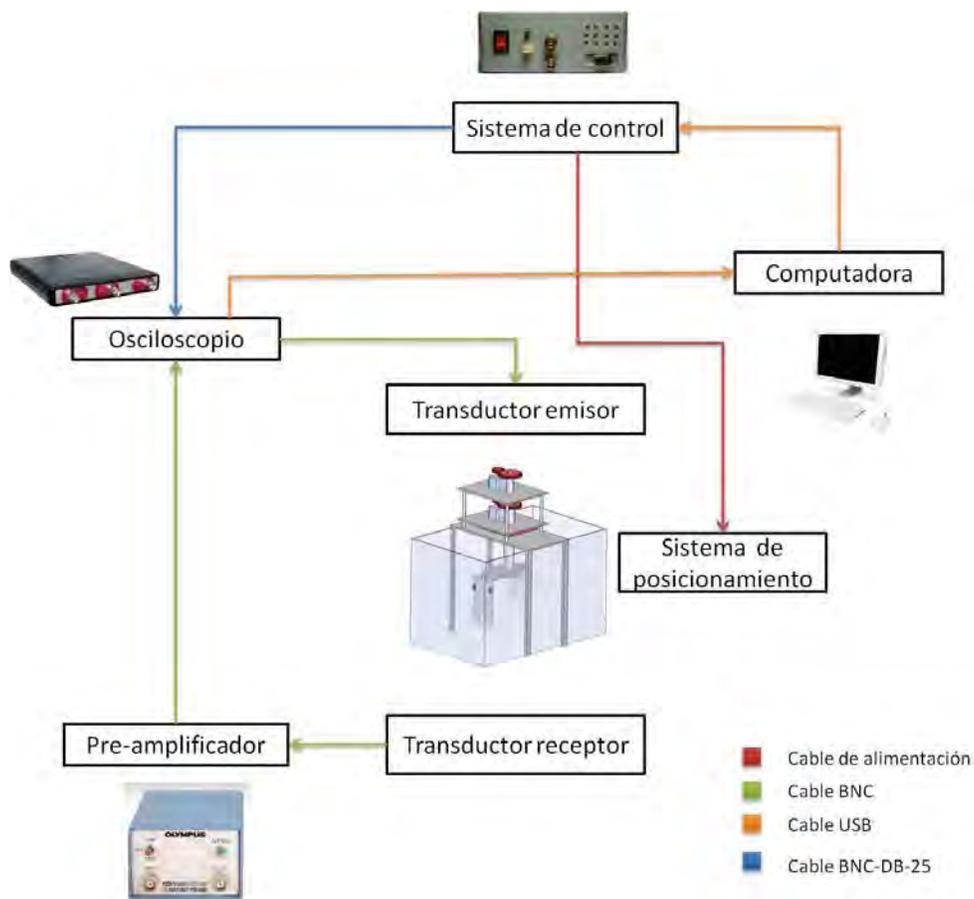
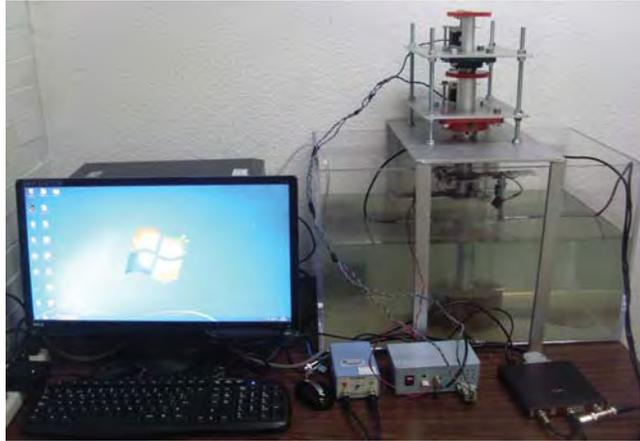


Figura 5.5: Conexiones entre sistemas.

En la Figura 5.6 se muestran dos fotografías del sistema completo. La primera fotografía muestra la parte frontal del sistema completo donde se observan los diferentes equipos utilizados: Pre-amplificador, sistema de control, sistema de emisión-recepción. En la segunda fotografía se muestra una vista lateral del sistema de posicionamiento montado sobre el tanque de agua.

a)



b)



Figura 5.6: Fotografías del sistema construido de tomografía ultrasónica. a) Vista Frontal, b) Vista Lateral

## 5.2. Puesta a punto del sistema

Finalizado el proceso de construcción del sistema completo se realizaron una serie de pruebas tanto mecánicas como de software con la finalidad de observar su funcionamiento y corregir los problemas existentes. Los problemas mecánicos que presentó el sistema son los siguientes:

- Falta de sujeción en el eje de los motores y los piñones, debido a que los prisioneros con que se sujetaban no lograban mantener la unión eje-piñón cuando se demandaba un mayor torque en el motor. Para solucionar el problema se hicieron dos barrenos de 5/64 de pulgada en cada uno de los ejes de los motores y los prisioneros se cambiaron por tornillos de una longitud mayor para que atravesaran el eje. Esto resultó con una mejor sujeción entre los componentes.
- La chumacera que sujetaba el eje de 1 pulgada tenía un juego entre sus componentes haciendo que el giro del eje no fuera estable, esto se solucionó cambiando por otra chumacera.
- El soporte del sistema presentaba inestabilidad dada su geometría y la falta de sujeción entre las dos partes en la que estaba dividido, esto se solucionó sujetando el soporte a la pared mediante un par de tornillos además de unir las dos partes por medio de los tornillos sin fin con los que cuenta el sistema.
- Falta de sujeción para los transductores, dado que la placa donde se montaron los transductores tenían un grosor de 6 [mm] no se logró tener una sujeción adecuada, además de que sólo se consiguieron tornillos de acero para esta medida lo que ocasionó su oxidación al estar sumergidos en el agua. La solución se consiguió mediante el cambio de placa por una de (12) [mm] y tornillos de acero inoxidable, véase Figura 5.7.

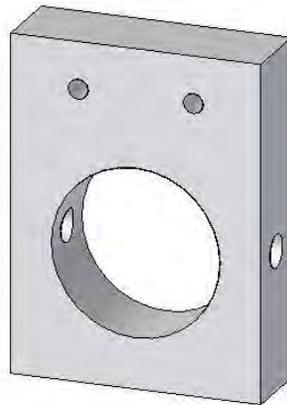


Figura 5.7: Sujeción de los transductores.

- Para variar la distancia entre transductores se manufacturaron una serie barrenos a lo largo del brazo que sujeta los transductores. Además para reducir el peso de los brazos, se redujo su área, véase Figura 5.8.

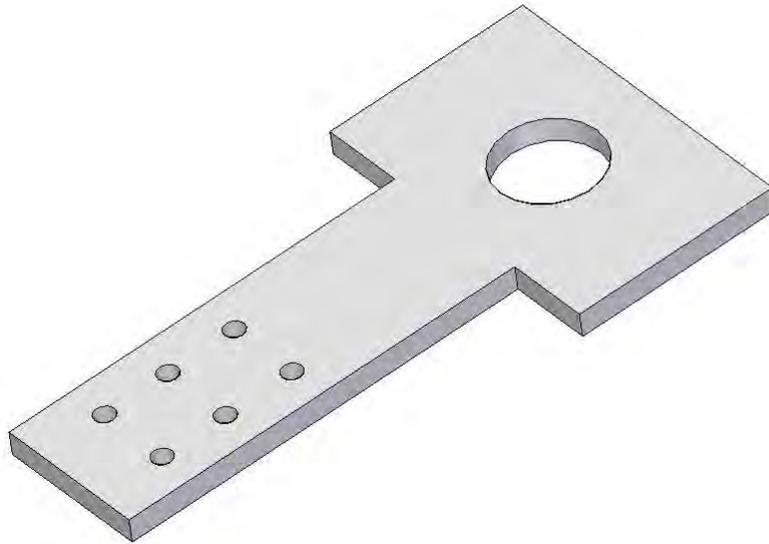


Figura 5.8: Cambio en la distancia de los transductores.

- Para mejorar la sujeción entres los brazos y los ejes del sistema de posicionamiento se agregaron tornillos de sujeción en el eje, véase Figura 5.9.

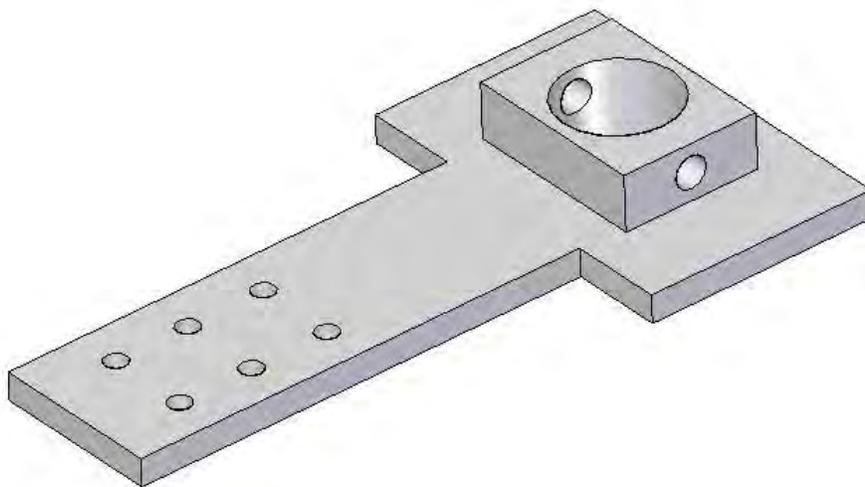


Figura 5.9: Tornillos de sujeción.

### 5.3. Pruebas del sistema básico de tomografía ultrasónica en transmisión

Para realizar las inspecciones mediante el sistema construido de tomografía ultrasónica es necesario conocer dos factores de diseño que afectan la forma en que se toman las mediciones:

- El sistema tiene un punto ciego al tomar las mediciones debido a que los brazos que soportan a los transductores se encuentran en el mismo plano de movimiento. En la Figura 5.10 se observa que en el punto donde los brazos se encuentran en su punto mas cercano se forma un ángulo de  $\theta=25.36^\circ$ , y dando un factor de seguridad se redondea este ángulo en  $30^\circ$ , el cual representa el espacio en donde los transductores no pueden hacer la medición. Para mediciones menores de  $30^\circ$  es necesario tomar en cuenta que el sistema no tomará ni la primera ni la ultima medición por cada posición del emisor. Para ángulos mayores a  $30^\circ$  no es necesario tomar esta consideración.

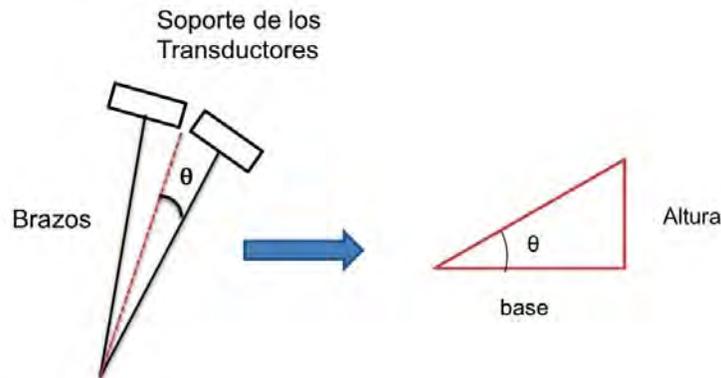


Figura 5.10: Punto ciego de los transductores.

- Los motores a pasos seleccionados son de 400 pasos, por lo que tienen una resolución de  $0.9^\circ$  por cada paso. Entonces al elegir un ángulo de medición es necesario darlo en múltiplos de  $0.9^\circ$ .

En la Figura 5.11 se muestran una serie de ejemplos para diferentes ángulos de medición, donde por cada posición del transductor emisor se hace un mapeo completo por parte del receptor. A medida que se seleccionen ángulos más pequeños, los transductores hacen mapeos más grandes lo que implica mayor resolución y generación de información más detallada de los materiales a inspeccionar. A su vez en los ángulos menores a  $30^\circ$  se observa como el punto ciego afecta las mediciones de los transductores. En la Figura 5.12 se observa la comparación entre un escaneo con un ángulo de medición de  $10^\circ$  sin ninguna restricción y con el punto ciego, claramente se observa que para cada posición del emisor los receptores adyacentes no reciben información como se puede apreciar en la figura como muescas alrededor del círculo.

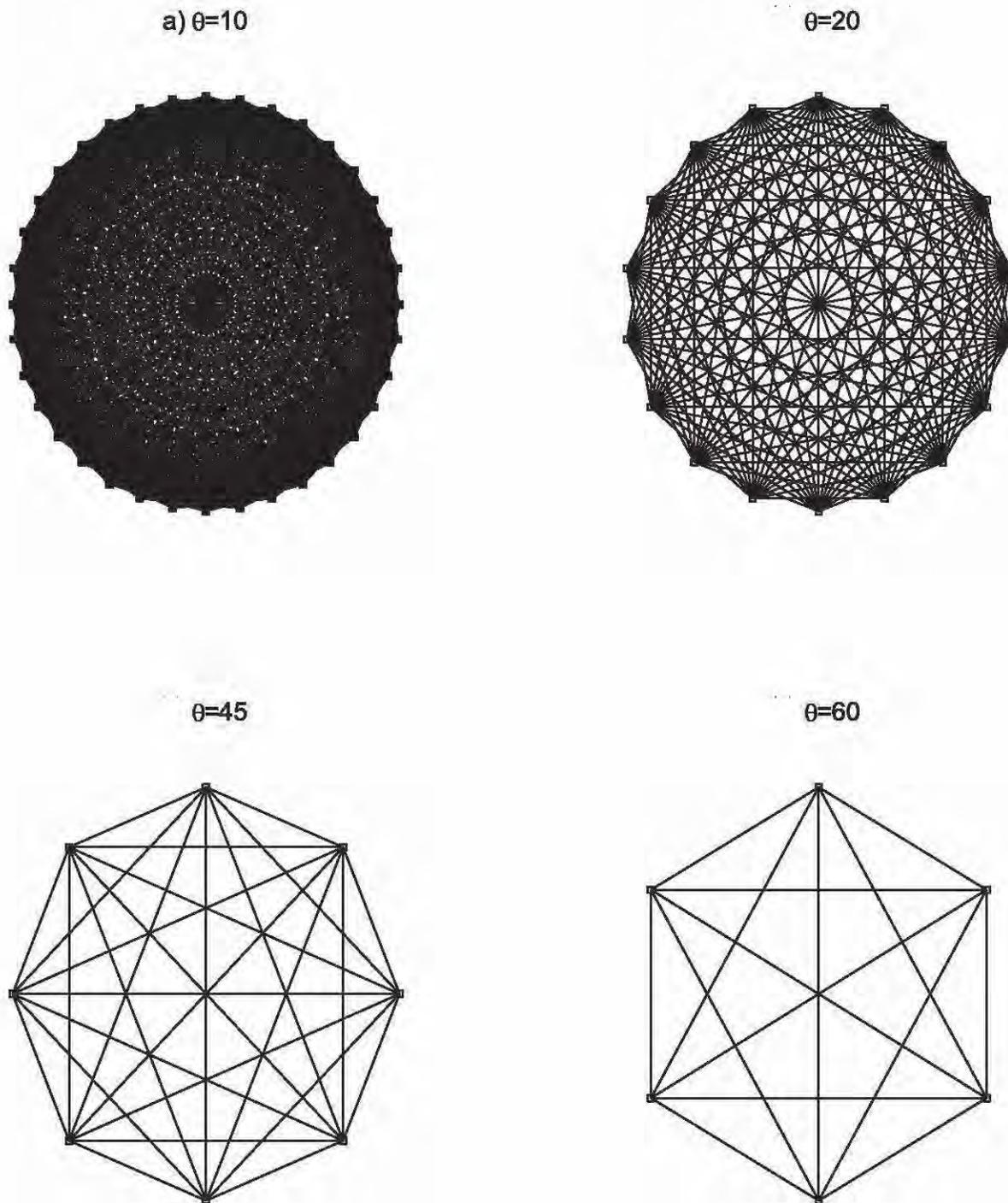


Figura 5.11: Angulos de medición.

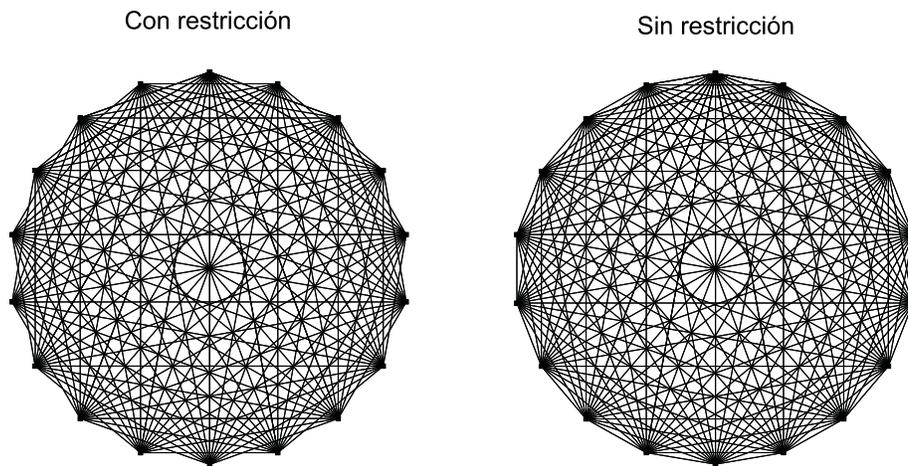


Figura 5.12: Comparación entre una inspección normal y con restricciones para un  $\theta = 10^\circ$ .

En la Figura 5.13 se muestra la forma en que se genera la inspección tomográfica para un ángulo de  $20^\circ$  en la primera iteración con respecto a una posición del transductor emisor. Independientemente del ángulo, el sistema realiza el mismo proceso para hacer el mapeo. Entre más posiciones se tengan del emisor lo que implica ángulos más pequeños se obtendrá mayor información del material.

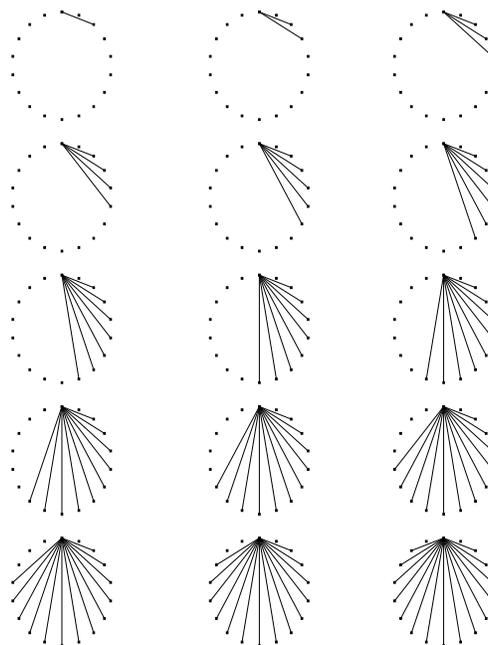


Figura 5.13: Inspección tomográfica para un ángulo de  $20^\circ$  en la primera iteración con respecto al emisor.

La inspecciones tomográficas se realizaron para dos materiales: una probeta de aluminio y una probeta de concreto como se muestra en la Figura 5.14.



Figura 5.14: Fotografía de las probetas utilizadas en la inspección de tomografía ultrasónica. A la izquierda se muestra la probeta cilíndrica de Aluminio, mientras que a la derecha la probeta cúbica de Concreto.

Cada una de las pruebas consistió en una sola posición del emisor para ángulos de  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  y  $20^\circ$ , siguiendo el mismo patrón de mapeo que se mostró en la Figura 5.13. Para la prueba con la probeta de aluminio se utilizó un transductor de 1 MHz y una probeta cilíndrica de diámetro 35 [mm] y una longitud de 140 [mm]. En la Figura 5.15 se muestran las imágenes generadas por las mediciones que se tomaron para la probeta de aluminio. Se observa que cada una de las señales en la gráfica es una posición del receptor donde las señales adquiridas y presentadas desde abajo hacia arriba de la figura corresponden a una inspección antihoraria con una única posición del emisor. Para el caso de la probeta de aluminio que es un material homogéneo, se observa que los pulsos adquiridos en cada una de las señales son ocasionados por una parte a la reflexión de los pulsos debido a la superficie circular de la probeta y por otro, por la transmisión de las señales ultrasónicas a lo largo del material. Asimismo, se observa que los pulsos recibidos de mayor amplitud son los respectivos a las posiciones más cercanas al transductor emisor debido a que los pulsos reflejados por la superficie del material. Como se mencionó con anterioridad entre más pequeño es el ángulo de medición se tiene más información del material tal que se observa con claridad en la figura a medida que se reduce el ángulo de paso. Para obtener una inspección completa del material es necesario obtener  $X+1$  posiciones del emisor por  $X$  posiciones del receptor. La prueba con concreto se realizó con un transductor de 0.5 MHz y una probeta cúbica de 50 x 50 [mm] de base por 100 [mm] de longitud. En la Figura 5.16 se muestran las imágenes generadas para la probeta de concreto, observando que los pulsos con mayor amplitud que se observan en la prueba a  $5^\circ$  los cuáles son generados por las aristas de la probeta. Para ángulos mayores no es posible encontrar estos puntos ya que el ángulo es lo suficientemente grande que en algunos casos no pasa por la arista. En este caso la pérdida de información debida al tamaño del ángulo es importante.

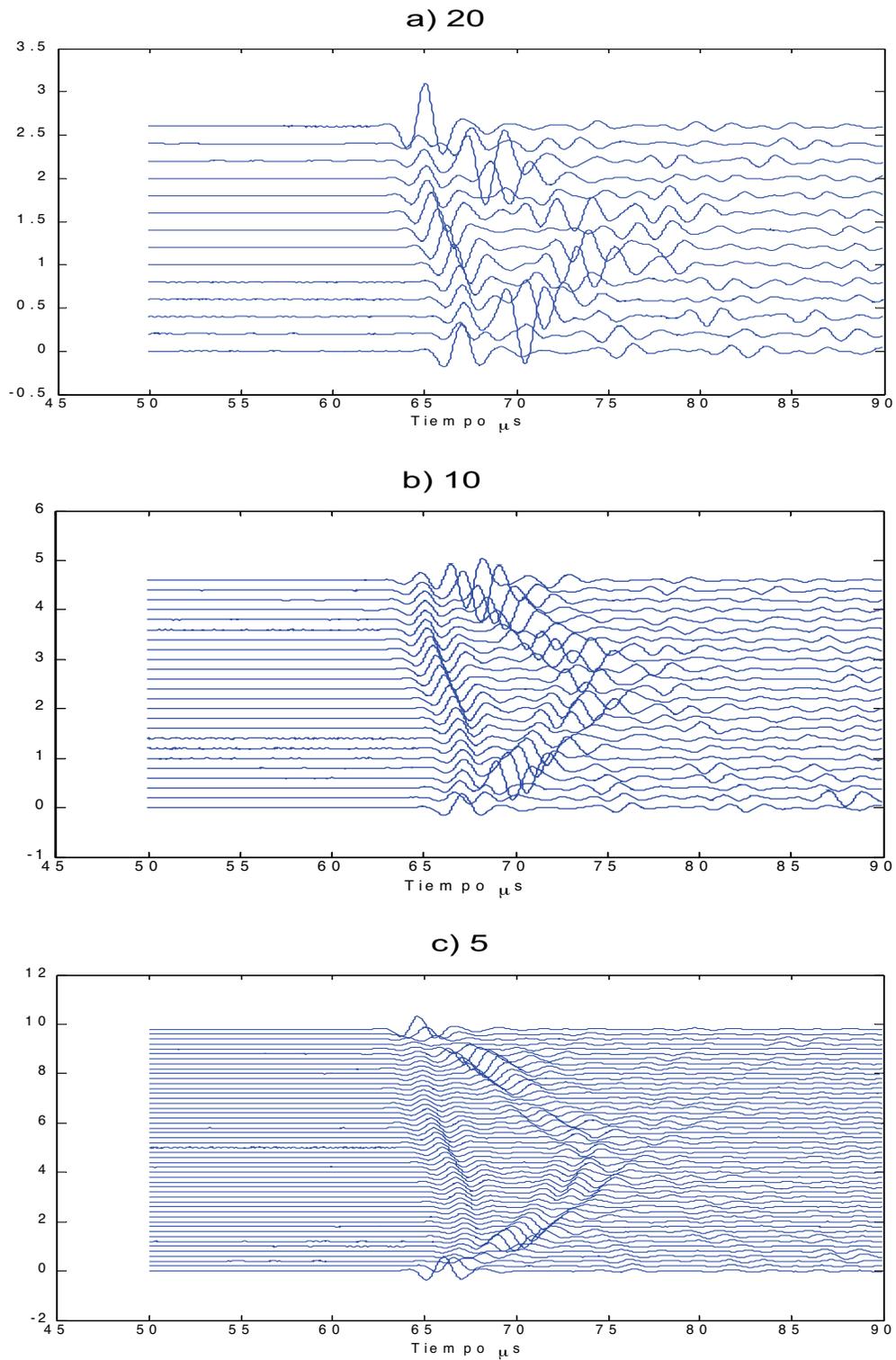


Figura 5.15: Inspecciones sobre la probeta cilíndrica de Aluminio.

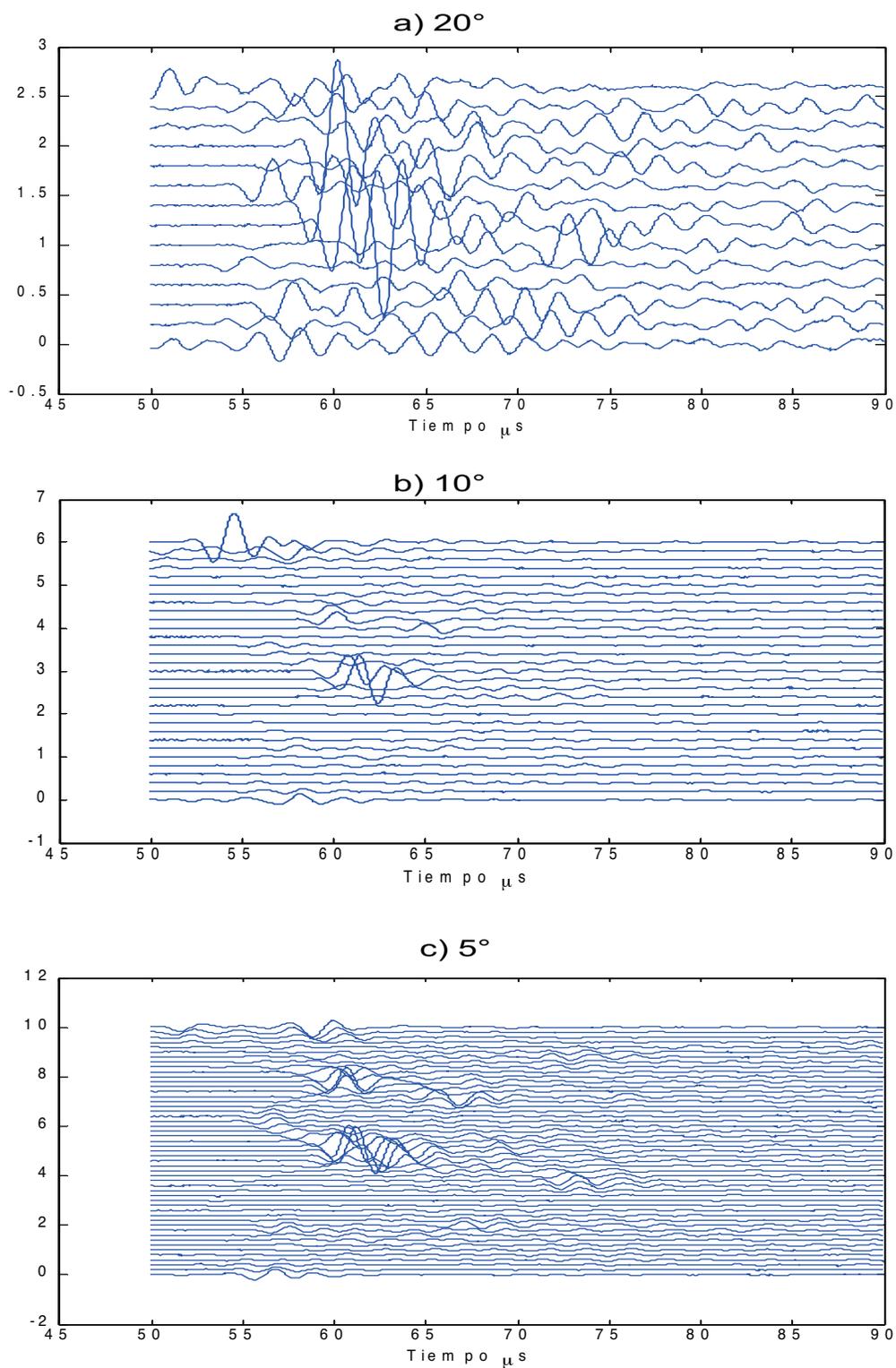


Figura 5.16: Inspecciones sobre la probeta cúbica de Concreto.

---

## CAPITULO 6

### Conclusiones

---

En este trabajo de tesis se ha diseñado, construido e implementado un sistema básico de tomografía ultrasónica para la detección de defectos y caracterización de materiales. El sistema de tomografía diseñado está dividido en tres sistemas, cada uno encargado de un proceso específico: sistema de posicionamiento, sistema de emisión-recepción de pulsos ultrasónicos y el sistema de control, sincronizados entre sí mediante una interfase gráfica de usuario.

El sistema de posicionamiento está encargado de controlar el movimiento automatizado de dos brazos por medio de dos motores a pasos para seguir una trayectoria circular alrededor de una muestra. Para formar la trayectoria circular cada uno de los brazos está unido a un eje que transmite el movimiento rotacional mediante un juego de engranes acoplados tanto a los ejes concéntricos como a los motores. Cada uno de los brazos sujeta un transductor, tal que uno funciona como emisor y otro como receptor. Esta configuración de diseño permite que los transductores se muevan de forma independiente, dando versatilidad al sistema en el momento de realizar los ensayos no destructivos. El ángulo de medición entre cada posición se puede variar desde 1 grado hasta 180°. La resolución del sistema es de 0.9°

Mediante el diseño e implementación de un sistema de control, se sincroniza el sistema de posicionamiento de forma automatizada con la adquisición de los pulsos emitidos y recibidos por los transductores. El sistema de control consta de un microcontrolador encargado de manipular los dos motores a pasos (ángulo y velocidad), establecer la comunicación y sincronía entre el sistema de posicionamiento y el sistema de emisión-recepción de los pulsos ultrasónicos. Asimismo, se implementó una interfase gráfica de usuario para establecer comunicación con el sistema de control y los otros sistemas por parte del usuario. La interfase gráfica de usuario da la posibilidad al usuario de configurar el sistema de tomografía y de iniciar tanto inspecciones manuales como automatizadas.

Para el diseño y construcción de un sistema de tomografía ultrasónica es importante tomar en cuenta la potencia requerida para mover el sistema y los factores físicos que afectan las mediciones. La potencia requerida está condicionada por los materiales con los que se trabaje y el tipo de transmisión de movimiento que se diseñe. Por tanto, en este trabajo se consideraron dos factores importantes: la

alineación correcta de las caras de los transductores para obtener mediciones más exactas y precisas, así como también el ruido que se genera y se suma en la señal causado por el equipo electrónico y los cables. Debido a esto, los elementos mecánicos que comprenden el sistema de posicionamiento, en particular los brazos, fueron los que estuvieron en constante cambio con el fin de asegurar que los transductores estuvieran fijos y alineados como se requería. Además de la alineación, otros factores importantes que no se tomaron en cuenta, fueron la vibración y el ruido generado por los engranes, la fricción generada por las chumaceras y el peso real final. Cabe mencionar que la implementación e integración del sistema de emisión-recepción de pulsos ultrasónicos se realizó sin tener literatura de referencia con respecto a la programación del osciloscopio genérico y su sincronía con el microcontrolador. No obstante, se logró integrar estos equipos de forma exitosa con el ambiente de programación en Matlab para la implementación de una interfase gráfica de usuario. Finalmente, se construyó y se puso a punto como se describe en el capítulo cinco un sistema que cumple con las especificaciones estipuladas.

Con base en las pruebas realizadas se sugieren las siguientes mejoras para el sistema:

- Las futuras mejoras para el sistema mecánico son el cambio de las chumaceras utilizadas por rodamientos sencillos unidos al soporte principal por medio de tornillos con el fin de eliminar el peso del sistema y reducir los costos. Para mejorar la alineación del sistema es necesario mantener unidos los brazos que soportan los transductores, eliminando la posibilidad de que el usuario los monte incorrectamente y genere mediciones incorrectas.
- Unir los engranes a los ejes por medio de tornillos tal que se necesitará manufacturar en los engranes cuatro barrenos para atornillarlos a una placa de aluminio. La placa estará soldada a los ejes, permitiendo que se puedan remover los engranes en caso de tener que cambiar el eje.
- Construcción de un soporte para mantener fijos los motores mediante el cambio de dos tornillos de sujeción por una estructura de aluminio que brinde mayor soporte a los motores.
- Con respecto a la electrónica de potencia no se tuvo dificultad alguna dado que el amperaje utilizado por los motores todavía está en el rango en el que se utiliza un puente H encapsulado. Sin embargo, para mejorar esta parte y reducir el espacio del sistema se tiene la opción de manufacturar el circuito diseñado sobre un circuito impreso.

# APENDICE A

## Planos del sistema de posicionamiento

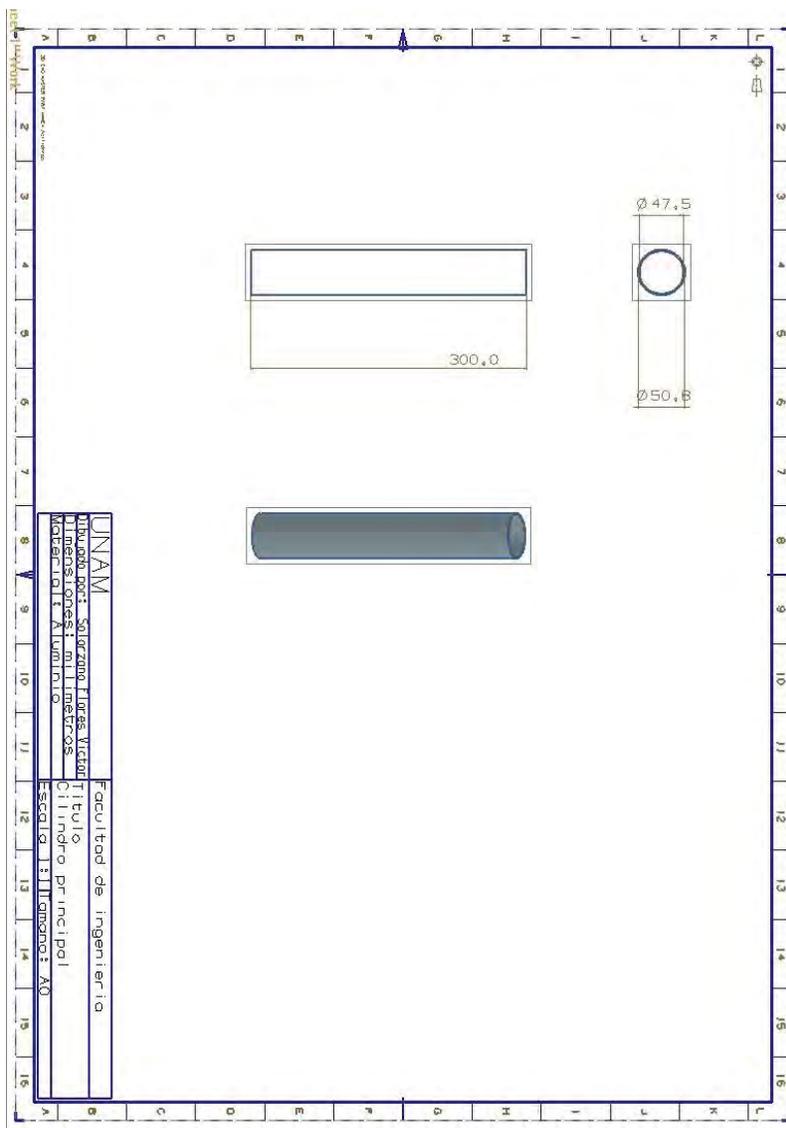


Figura A.1: Plano del cilindro principal.

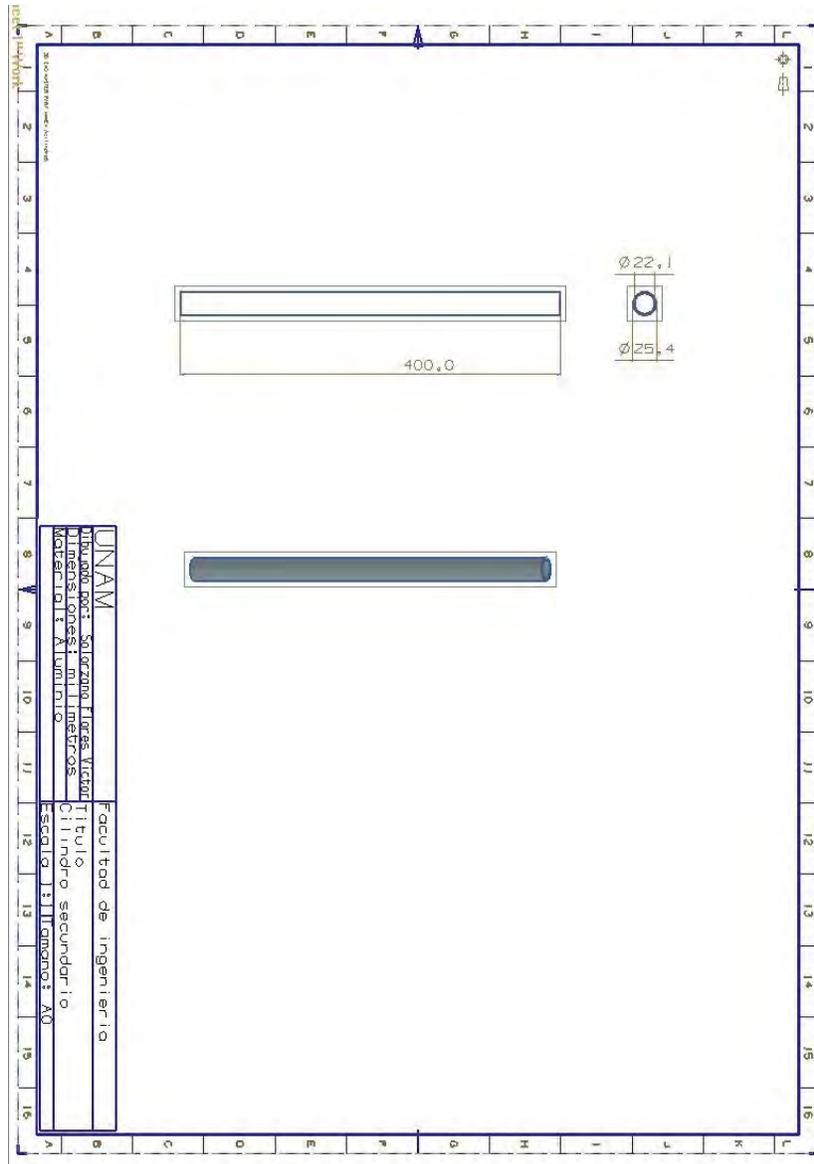


Figura A.2: Plano del cilindro secundario.

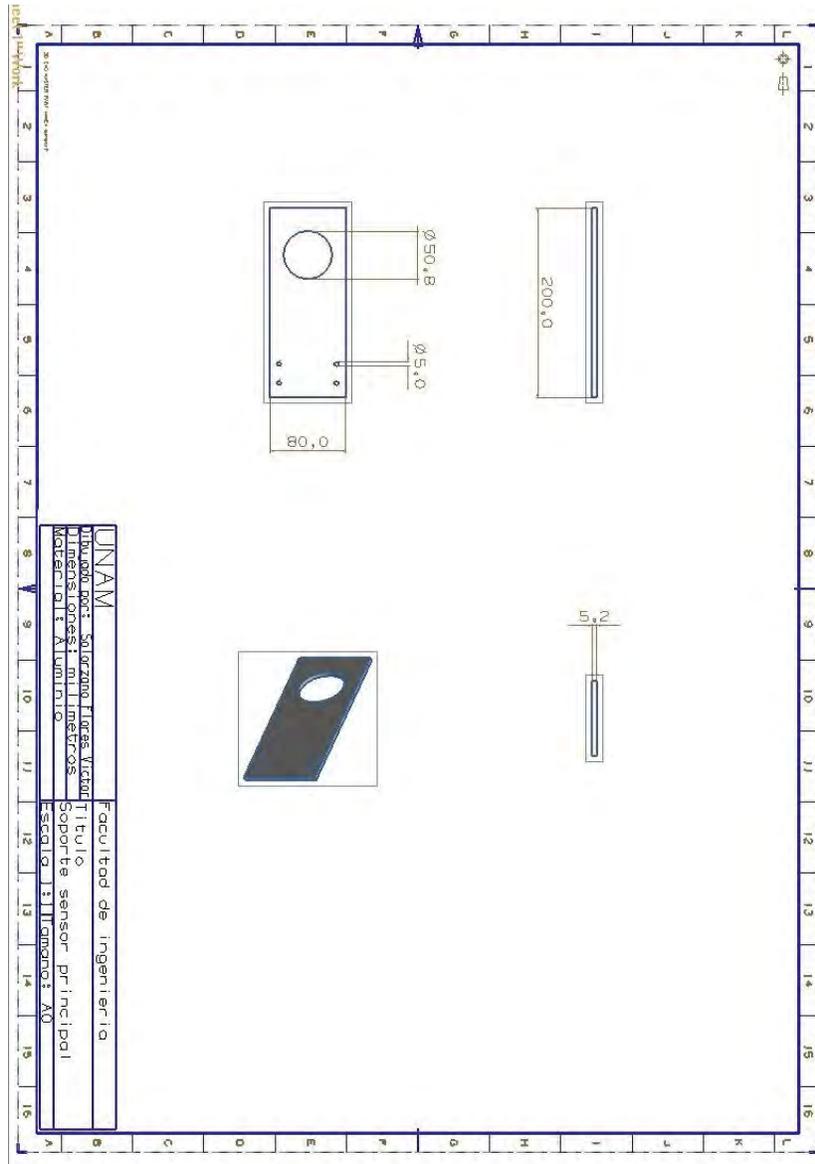


Figura A.3: Plano del soporte del sensor principal.

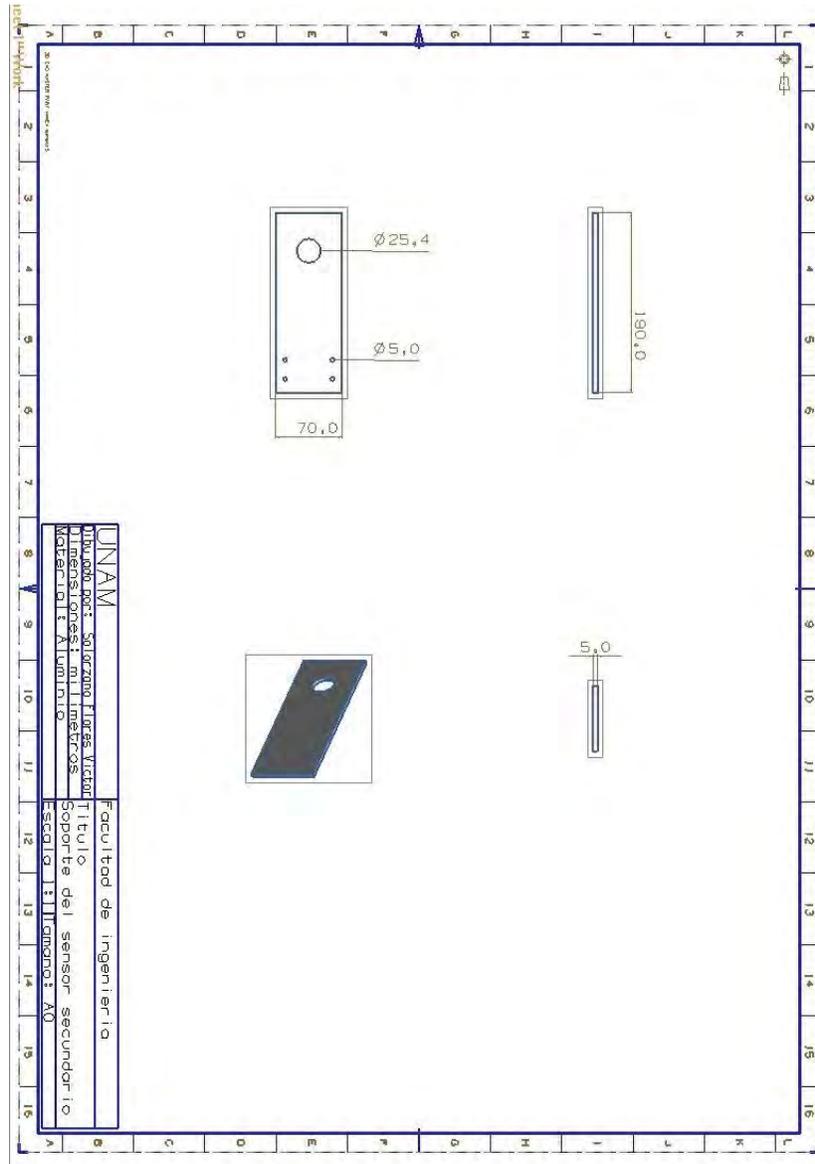


Figura A.4: Plano del soporte del sensor secundario.

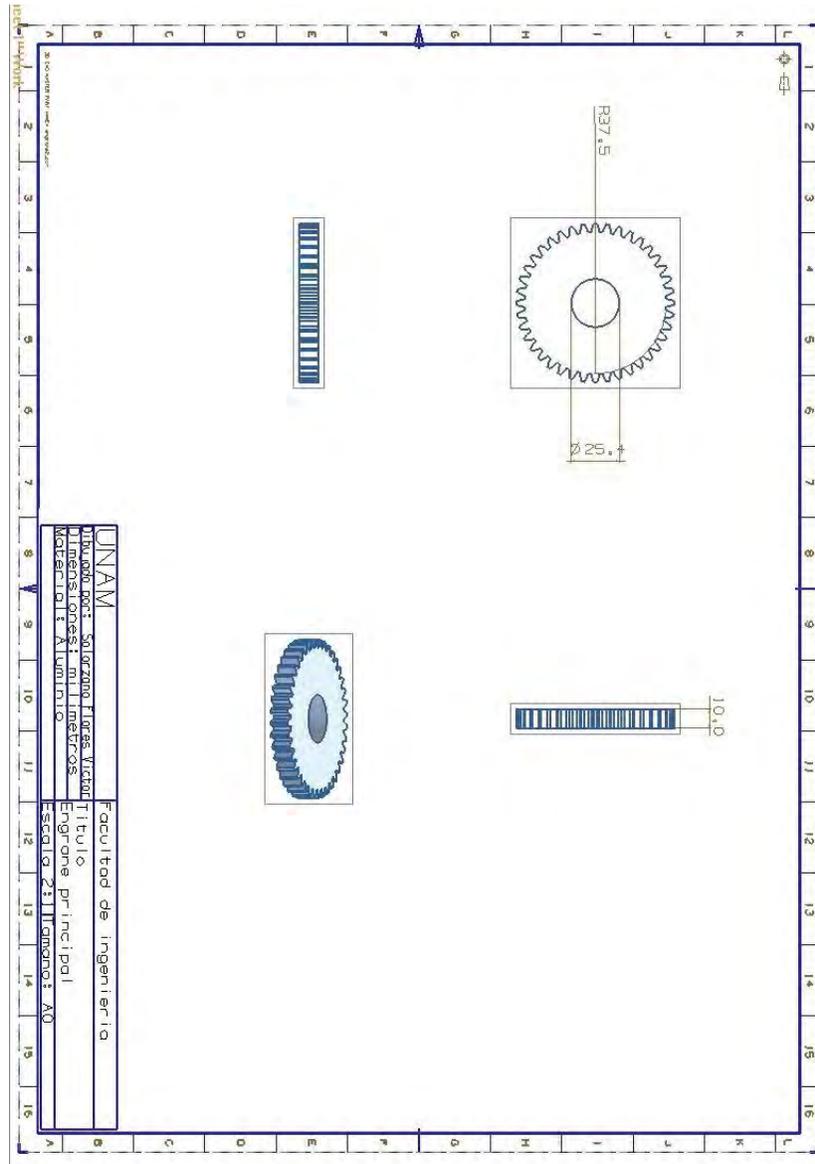


Figura A.5: Plano del engrane principal.

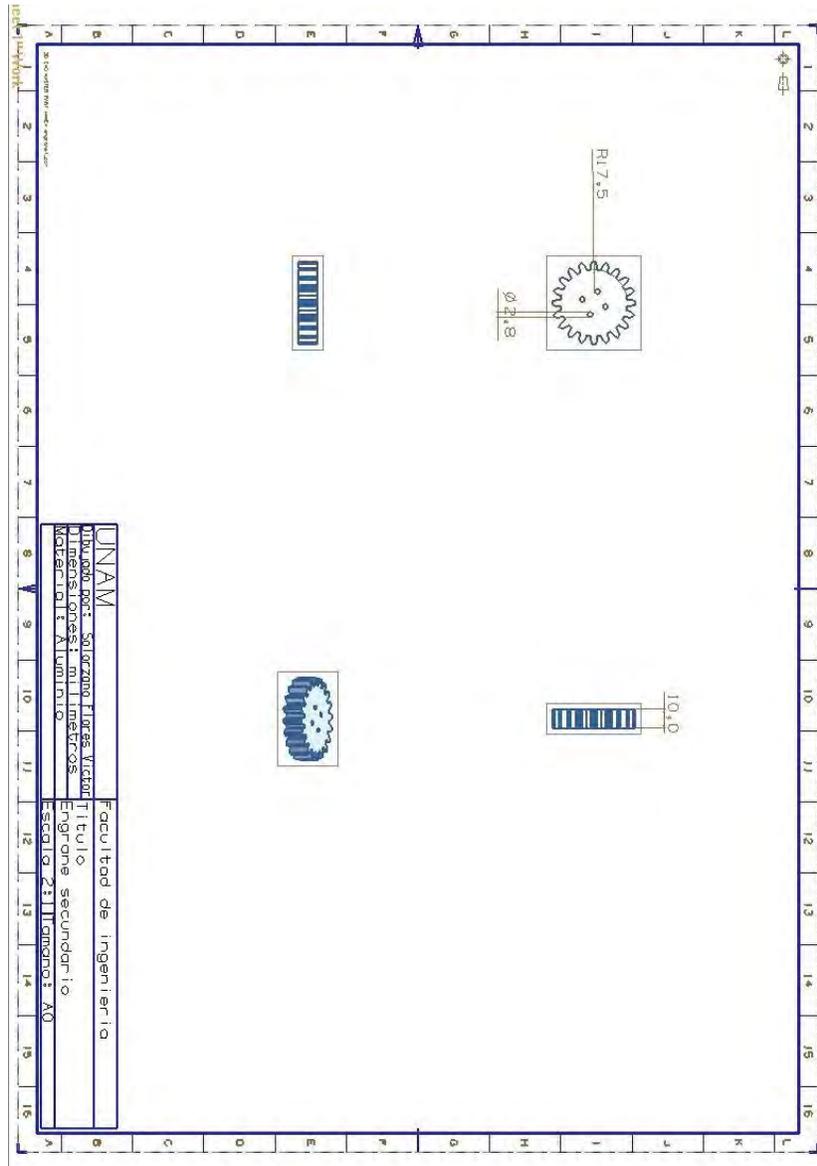


Figura A.6: Plano del engrane secundario.

---

# APENDICE B

## Plataforma de desarrollo Arduino

---

### B.1. Características de la tarjeta Arduino

Arduino es una plataforma de código abierto basado en una placa que utiliza un micro controlador en conjunto con un entorno de desarrollo para poder escribir software en el mismo. Las características principales de esta plataforma son las siguientes:

- Tiene un bajo costo en el mercado en comparación con otras plataformas.
- El software de Arduino se puede ejecutar en Windows, Mac OS X, y Linux.
- El código de programación es de código abierto con el cual se puede extender sus capacidades, si se tienen más experiencia en el área de la programación.
- Los micro controladores utilizados ATMEGA8 y ATMEGA168 pueden ser utilizados en cualquier placa diseñada por los usuarios, evitando las limitaciones que vienen con la placa misma.

El modelo utilizado para el proyecto fue el Arduino uno, las características de este modelo se muestran en la Tabla B.1:

### B.2. Características principales del Arduino

#### B.2.1. Alimentación

La placa Arduino es alimentada por medio de una conexión USB, o por una fuente externa, la selección de esta se realiza automáticamente al alimentarla. La tarjeta funciona con una fuente externa de 6 a 20 voltios. Si se suministran con menos de 7 V, sin embargo, el pin de 5V puede suministrar menos de cinco voltios y la placa puede ser inestable. Si se utiliza más de 12 V, el regulador de voltaje se puede sobre calentar y dañar la placa. El rango recomendado es de 7 a 12 [V]

#### B.2.2. Comunicación

El ATMEGA328 se comunica a una computadora o a otra placa Arduino por medio del UART TTL (5V) de comunicación en serie, que está disponible en los pines digitales 0 (RX) y 1 (TX) de la placa Arduino.

Micro controlador	ATMega328
Voltaje de funcionamiento	5V
Entrada de voltaje (recomendado)	7-12V
De voltaje de entrada	6–20V
Digital I / O Pins	14 (6 salidas PWM) pines:0-13
Pines de entrada analógica	6 pines 0-5
DC Corriente de pines I / O	40 mA
Actual de Pin 3,3 V DC	50 mA
Memoria Flash	32 KB ( ATMega328 )
SRAM	2 KB ( ATMega328 )
EEPROM	1 KB ( ATMega328 )
Velocidad del reloj	16 MHz

Tabla B.1: Características principales del Arduino.

También es compatible con I2C (IST) y la comunicación SPI. El software de Arduino incluye una librería para poder simplificar el uso de I2C.

### B.2.3. Programación

El ATMega328 integrado en la placa Arduino Uno viene con un gestor de arranque que permite poder cargar nuevo código al microcontrolador sin necesidad de tener un quemador externo, si se desea se puede omitir el gestor de arranque y programar del micro controlador a través de la ICSP.

### B.2.4. Diagrama esquemático

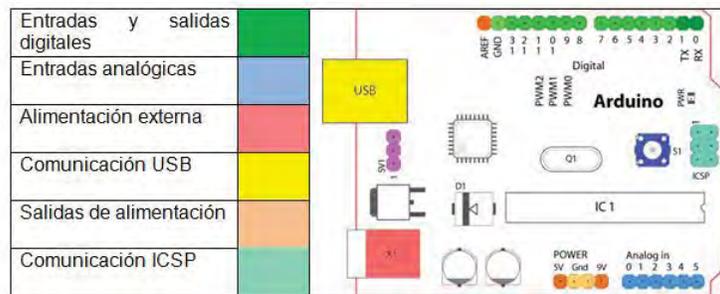


Figura B.1: Diagrama esquemático.

---

## APENDICE C

# Código Fuente: Interfase Arduino

---

```
#include <Stepper.h>
//Variables utilizadas
int bandera=0;
int M[3]={0,0,0};
int i=0;
int dato=0;
int angulo=22;
int vel;
int valor;
int contador1=0;
int contador2=0;
int contador3=0;
int sensoestado;
//Función para definir los pines de salida de los motores a pasos
//y la cantidad de pasos que tienen.
Stepper motor1=Stepper(400, 8, 9, 10,11);
Stepper motor2=Stepper(400,4,5,6,7);
void setup() {
//Inicializa la comunicación serial
Serial.begin(9600);
//Declaran pines de salida y entrada
pinMode(2, OUTPUT);
pinMode(3, INPUT);
pinMode(13,OUTPUT);
pinMode(12,OUTPUT);
//inicializa una velocidad para los motores a pasos.
motor1.setSpeed(20);
motor2.setSpeed(30); }
```

```
void loop(){
//Inicia comunicación serial
if (Serial.available()>0){
//Entra algoritmo de selección dado por un switch-case
dato = Serial.read();
switch(dato){
case 'P': for(i=0; i<3; i++) {
//Si llega P se pasa a la función de guardar ángulo
//para configurar el ángulo que se moverán los motores
while (Serial.available()==0 ) {}
dato = Serial.read();
M[i] = dato;
}
GuardarAngulo();
break;
case'A':
//Pasa a la función encargada de mover motor 1.
movermotor1();
break;
case'B':
//Pasa a la función encargada de mover motor 2.
movermotor2();
break;
case'C':
//Pasa a la función que regresa el motor 1 de su iteración.
regresoiteracion();
break;
case'Z':
//Pasa a la función que regresa el sistema al zero establecido.
regresamotor(); break;
case'T':
//pasa a la funcion que manda un pulso para la sincronia con el
//sistema de emisión y recepción de pulsos.
pulso();
break;
case'S':
//Pasa a la funcion que configura la velocidad de los motores
for(i=0; i<3; i++) {
while (Serial.available()==0 ) { }
```

```

dato = Serial.read();
M[i] = dato;
}
//Se pasa a la funcion de velocidad de los motores. VelocidadMotor(); break;
} }
}
void movermotor1()
{
// Pone en estado alto el pin 12 para iniciar la alimentación
//del puente h digital
Write(12, HIGH);
digitalWrite(13, HIGH);
//retado para esperar a la electronica de 23 milisegundos
delay(23);
//ciclo for que genera el movimiento del motor 1 por medio de una rutina.
while(digitalRead(3)==LOW)
{
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
digitalWrite(11, LOW);
delay(10);
digitalWrite(8,LOW);
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(11, LOW);
delay(10);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(10, LOW);
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(11, HIGH);
delay(10);
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(10, LOW);
digitalWrite(9, LOW);
digitalWrite(11, HIGH);
delay(10);
}
//Terminada la iteración pone en estado bajo la laimentación.

```

```
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(13, LOW);
//Guarda el número de iteraciones que se lleva hasta el momento.
contador1=contador1+1;
contador3=contador3+1;
//Envia caracter indicando que ha terminado de moverse.
Serial.print('N');
//Limpia el puerto Serial.
Serial.flush(); }
void movermotor2()
{
// Pone en estado alto el pin 13 para iniciar la alimentación del puente h
digitalWrite(13, HIGH);
delay(23);
//Utiliza la función de la librería para mover el motor 2.
motor2.step(angulo);
//Terminada la iteración pone en estado bajo la alimentación.
digitalWrite(13, LOW);
//Guarda en un contador el numero de iteraciones que se lleva hasta el momento
contador2=contador2+1;
//Envia caracter indicando que ha terminado de moverse.
Serial.print('L');
//Limpia puerto serial
Serial.flush(); }
void regresamotor()
{
//Regreso de motor 1
// Pone en estado alto el pin 12 para iniciar la alimentación del puente h
digitalWrite(12, HIGH);
delay(15);
motor1.step(-angulo*contador1);
//Terminada la iteración pone en estado bajo la alimentación.
digitalWrite(12, LOW);
//Limpia comunicación serial
Serial.flush();
//Limpia contador del motor 1
contador1=0;
delay(1000);
//Regreso motor 2
```

```

//Pone en estado alto el pin 13 para iniciar la alimentación del puente h
digitalWrite(13, HIGH);
delay(23);
contador2=contador2+contador3;
motor2.step(-angulo*contador2);
//Terminada la iteración pone en estado bajo la alimentación.
digitalWrite(13, LOW);
//Limpia contador del motor 2
contador2=0;
//Envia caracter indicando que ha terminado de moverse.
Serial.print('R');
//Limpia comunicación serial
Serial.flush();
}
void regresoiteracion()
{
// Pone en estado alto el pin 13 para iniciar la alimentación del puente h
digitalWrite(13, HIGH);
delay(15);
//resta una posición para que le motor regrese a la nueva iteración
contador2=contador2-1;
//mueve motor 2 en sentido contrario.
motor2.step(-angulo*contador2);
//Terminada la iteración pone en estado bajo la alimentación.
digitalWrite(13, LOW);
delay(1000);
//Limpia contador
contador2=0;
//Envia caracter indicando que ha terminado de moverse.
Serial.print('M');
//Limpia el puerto serial
Serial.flush();
}
void GuardarAngulo()
{
//Convierte y guarda ángulo de los datos recibidos
M[0]=M[0]-48;
M[1]=M[1]-48;
M[2]=M[2]-48;

```

```
angulo=100*M[0]+10*M[1]+M[2];
angulo=2*paso;
}
void VelocidadMotor()
{
//Convierte y guarda la velocidad recibida via puerto serie
M[0]=M[0]-48;
M[1]=M[1]-48;
M[2]=M[2]-48;
vel=100*M[0]+10*M[1]+M[2];
motor1.setSpeed(vel);
motor2.setSpeed(vel);
}
void pulso()
{ //Envia pulso por medio del pin 2
digitalWrite(2, HIGH);
delayMicroseconds(100);
digitalWrite(2, LOW);
//Envia caracter indicando que ha ha enviado el pulso.
Serial.print('Y');
}
```

## REFERENCIAS

---

- [1] Benjamin C. Kuo, Sistemas de control automático, , Ed. Prentice Hall, Séptima edición, 1996.
- [2] Robert L. Mott, Diseño de elementos de máquinas, , Ed. Pearson, Cuarta edición, 2006.
- [3] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, Mecánica vectorial para ingenieros, Ed Mc. Graw Hill, Octava edición, 1979.
- [4] O. Fratschner, Elementos de máquinas, Ed. Gustavo Gili, Tercera edición, 1969.
- [5] Joseph Edwar Shigley, John Joseph Vicker, Teoría de máquinas y mecanismos, Ed. Mc Graw Hill, 1996.
- [6] Katsuhiko Ogata, Ingeniería de control moderna, Ed. Prentice Hall, Cuarta edición, 2003.
- [7] Joseph Edwar Shigley, Charles R. Mischke, Diseño en ingeniería mecánica, Sexta edición, XXXX.
- [8] Salvador Seguí Chilet, Fco. J. Gimeno Sales, Fundamentos básicos de electrónica de potencia. Ed. Universidad politécnica de Valencia, XXXX.
- [9] Especificaciones Técnicas Motor a Pasos, <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-311/lang/es>.
- [10] Muhammad H. Rashid, Electrónica de potencia, Ed. Prentice Hall, XXXX.
- [11] Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Ed. Prentice Hall, XXXX.
- [12] Jesus Meneses Alonso, Carolina Alvarez Caldas, Introducción al Solid Edge, Ed. Thomson, XXXX.
- [13] Sham Tickoo, Ed Dreamtech, Solid Edge V19: For Engineers And Designers, XXXX.
- [14] Cartz, Louis, Nondestructive Testing : Radiography, Ultrasonics, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, Eddy Current, ASM Intl. XXXX,
- [15] Krautkramer, Josef and Krautkramer, Herbert, Ultrasonic Testing of Materials, 4th-revised edition, Springer Verlag, November 1990.
- [16] Especificaciones Técnicas del opto-acoplador, <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/2/048xrw12q8wiqfuc09tqwfy5dgwy.pdf>
- [17] Especificaciones Técnicas del puente H, <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/2/052daje928cw7pc0uqs1ipyryppy.pdf>
- [18] Norma Pasos Peinado, Tecnología de los metales y procesos de manufactura, Primera edición, XXXX.

- [19] F.R Morral, E.Jimeno, P.Molera, Metalurgia general tomo II, Editorial Reverte S.A, XXXX,
- [20] Eduardo Gómez de Leon, Ultrasonidos nivel II, Ed. FC, Primera edición, XXXX.
- [21] Especificaciones Técnicas del eliminador, <http://www.steren.com.mx/catalogo/prod.asp?f=7&sf=176&c=674&p=1744&desc=convertidor-de-voltaje-o-eliminador-regulado-de-3-a-12-vcc-2-5-amperes>