



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO Y PROTOTIPO DE UN SISTEMA
MECATRÓNICO BRAZO-PERCUTOR**

AUTOR: ROSALES VIZUETE, JONATHAN PAÚL

DIRECTOR: PROF. DR.-ING. ARCENTALES, ANDRÉS

CODIRECTOR: PROF. DR. -ING. KRAMANN, GUIDO

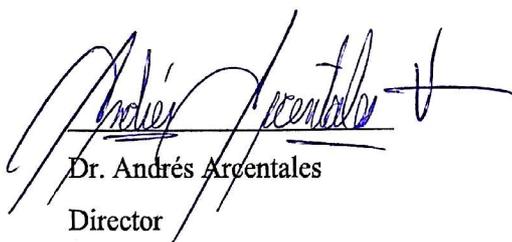
SANGOLQUÍ

2017

CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA****CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO Y PROTOTIPO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO BRAZO-PERCUTOR”** realizado por el señor **JONATHAN PAÚL ROSALES VIZUETE**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **JONATHAN PAÚL ROSALES VIZUETE** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 8 de diciembre de 2016



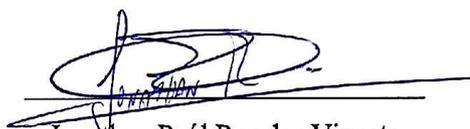
Dr. Andrés Arcentales
Director

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA****CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **JONATHAN PAÚL ROSALES VIZUETE**, con cédula de identidad N° 1713165809 declaro que este trabajo de titulación “**DISEÑO Y PROTOTIPO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO BRAZO-PERCUTOR**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 8 de diciembre de 2016



Jonathan Paúl Rosales Vizuite

C.C. 1713165809

AUTORIZACIÓN



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **JONATHAN PAÚL ROSALES VIZUETE**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“DISEÑO Y PROTOTIPO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO BRAZO-PERCUTOR”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 8 de diciembre de 2016

Una firma manuscrita en tinta azul que parece ser "Jonathan Paúl Rosales Vizúete", escrita sobre una línea horizontal.

Jonathan Paúl Rosales Vizúete

C.C. 1713165809

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, quienes han sido un apoyo incondicional y han estado a mi lado durante toda mi formación prestos a ayudarme en todas las formas posibles, y guiándome en cada paso que he dado.

A mi padre Galo, por ser un ejemplo de constancia, bondad y amor; y por brindarme su mano siempre que la he necesitado.

A mi madre Martha, por enseñarme lo que es la lucha y perseverancia en busca de mis objetivos; y por su cariño y apoyo permanente.

A mis hermanos Andrea y Jonás, por las palabras y gestos de apoyo en momentos difíciles, ayudándome a superarlos y convertirme cada día en una mejor persona.

A mi tía Jenny, por ser como una segunda madre en mi vida y brindarme sus consejos y su apoyo cuando los he necesitado.

AGRADECIMIENTO

A Dios por las bendiciones que pone en mi camino cada día y haberme permitido cumplir metas que no habría imaginado tener.

A mi familia por su apoyo incondicional, su amor y su cariño indispensable para convertirme en el hombre que soy ahora.

A la MSc. Sara Durán y todos quienes conforman la Unidad de Relaciones de Cooperación Interinstitucional – URCI, por ayudar a que este proyecto se pueda materializar, y por todo el apoyo brindado dentro y fuera del país para vivir una experiencia única en mi vida.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” y a todos los docentes de quienes tuve el gusto de aprender, ya que todo el conocimiento y enseñanzas que depositaron en mi desencadenaron en la culminación de una carrera con éxito.

Al Dr. Andrés Arcentales y al Prof. Guido Kramann, quienes me guiaron con ahínco y paciencia en la culminación exitosa de este proyecto tanto en Alemania como en Ecuador.

A la Universidad de Ciencias Aplicadas de Brandemburgo, y a Fr. Heike Wolff, por abrir las puertas para que se realice este proyecto.

ÍNDICE

CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación e Importancia	1
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Alcance del Proyecto	3
1.5. Descripción General del Proyecto	4
1.5.1. Sistema Mecánico	4
1.5.2. Sistema Eléctrico/Electrónico.....	5
1.5.3. Sistema de Control.....	5
1.5.4. Interfaz de Usuario.....	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6

2.1.	Introducción	6
2.2.	Estado del Arte.....	6
2.2.1.	Automatización de Instrumentos Musicales	6
2.2.2.	Composición Musical por Computadora	9
2.3.	Steve Reich y su Composición Musical	10
2.4.	Diseño Asistido por Computadora (CAD)	11
2.4.1.	SolidWorks	12
2.5.	Interacción Humano – Máquina	13
2.5.1.	Microsoft Visual Studio.....	13
2.5.2.	Comunicación Serial.....	14
2.6.	Plataformas Computacionales de Instrumentación y Control	15
2.6.1.	Arduino	15
CAPÍTULO III		17
DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA		17
3.1.	Diseño de la estructura principal	17
3.1.1.	Parámetros de Diseño	18
3.1.2.	Planos y Modelados	19
3.1.3.	Selección de Material.....	23
3.1.4.	Análisis de Elementos Finitos.....	24
3.1.5.	Resultado físico.....	25
3.2.	Estructura de sensores.....	26
CAPÍTULO IV		29
DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA.....		29
4.1.	Componentes del Sistema Electrónico	29
4.1.1.	Encoder Optoelectrónico Incremental	29
4.1.2.	Sensor de Proximidad por Infrarrojos.....	30

4.1.3.	Motor DC.....	32
4.1.4.	Puente H.....	33
4.1.5.	Arduino Genuino Micro.....	33
4.2.	Diseño de circuitos.....	34
4.2.1.	Emisor y receptor Infrarrojos.....	34
4.2.2.	Diseño final del circuito.....	34
CAPÍTULO V		36
DISEÑO DEL SOFTWARE DE INTERACCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN		36
5.1.	Modelamiento del Sistema Percutor	36
5.1.1.	Resorte Torsional.....	36
5.1.2.	Amortiguador Torsional	37
5.1.3.	Cuerpo de Inercia Rotacional	38
5.1.4.	Modelamiento del Motor DC.....	38
5.1.5.	Modelado del percutor	39
5.1.6.	Ecuaciones Dinámicas	40
5.1.7.	Identificación de las Constantes del Motor DC.....	41
5.2.	Detección de Posición del Xilófono	43
5.3.	Adaptación al Comportamiento Humano	55
5.3.1.	Estrategias para adaptar el comportamiento humano	55
5.3.2.	Procesamiento de señal de sonido	56
5.4.	Interacción del Usuario con el Sistema.....	56
5.4.1.	Interfaz Gráfica de Usuario (GUI).....	57
5.4.2.	Interacción con el Usuario por Comunicación Serial	57
5.5.	Predicción del Movimiento del Sistema y Ejecución de Golpe.....	59
CAPÍTULO VI.....		62
RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....		62

6.1.	Resultados Mecánicos.....	62
6.2.	Resultados de Interacción Humano – Máquina	63
6.3.	Resultados del Sistema Conjunto	65
6.4.	Dificultades Confrontadas	66
6.5.	Conclusiones.....	68
6.6.	Trabajos a Futuro	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	70
	ANEXOS.....	72
	Apéndice A: Planos Mecánicos.....	73
	Apéndice B: Código de Arduino para Toma de Datos (SHARP e IR)	84
	Apéndice C: Tabla de Errores para Líneas de Tendencia	86
	Apéndice D: Puntos Medios de las Placas Estimados con el Encoder.....	89
	Apéndice E: Interfaz en Visual C#.....	95
	Pantalla Principal.....	95
	Código:	95
	Pantalla “Play”	96
	Código:	97
	Pantalla “Settings”.....	102
	Código:	103
	Apéndice F: Interfaz Ejemplo en <i>Processing</i>	106
	Pantalla Principal.....	106
	Código	106
	Apéndice G: Código Final del Proyecto	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de Análisis Estático.	25
Tabla 2. Sensores utilizados en la estructura.....	26
Tabla 3. Elementos eléctricos y electrónicos utilizados.....	29
Tabla 4. Mediciones de impedancia y cambio de fase con fuente a 100 KHz.	41
Tabla 5. Posiciones Angulares Objetivo de las Placas.....	54
Tabla 6. <i>Getters</i>	58
Tabla 7. <i>Setters</i> y comandos adicionales.....	59
Tabla 8. Análisis de Datos para Desplazamiento Angular.....	60
Tabla 9. Tonos en Interfaz con Letras de Identificación.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelado computacional del Sistema Mecatrónico Brazo-Percutor.....	4
Figura 2. Pianola automática de marca Welte-Mignon-Steinway.....	7
Figura 3. Instrumentos Musicales Automatizados	8
Figura 4. Proyecto “DJ Robots” de Festo Didactic	8
Figura 5. Músicos y artistas interpretando <i>Drumming</i> . (Fuente: Youtube.com)....	11
Figura 6. Ejemplo de Diseño en programa SolidWorks (fuente: Solidworks.es) ..	13
Figura 7. Ilustración de un Péndulo simple. (Fuente: Wikipedia)	17
Figura 8. Péndulo de Newton. (Fuente: Schulz)	18
Figura 9. Diseño 3D del soporte de motor DC.....	19
Figura 10. Ensamble 3D del xilófono pequeño con las platinas diseñadas.....	20
Figura 11. Primer modelo 3D de la estructura final.	20
Figura 13. Ensamblaje 3D del primer diseño.	21
Figura 14. Modelo 3D del diseño final de la estructura.	22
Figura 17. Modelo 3D del ensamblaje final del diseño.....	22
Figura 18. Simulación de Desplazamiento Angular (Fuente: SolidWorks).....	22
Figura 19. Simulación de Velocidad Angular (Fuente: SolidWorks).....	23
Figura 20. Simulación de Aceleración Angular (Fuente: SolidWorks).	23
Figura 21. Análisis de esfuerzos Von Mises.	24
Figura 22. Análisis de deformaciones.	24
Figura 23. Análisis de Factor de Seguridad.	25
Figura 24. Estructura manufacturada.	26
Figura 27. Ensamblaje principal de estructura de sensores.....	27
Figura 28. Modelo 3D de soporte auxiliar para Encoder de xilófono.....	27
Figura 30. Ensamblaje final de Estructura con sensores.....	28
Figura 31. Encoder Incremental Serie MOL30	30
Figura 32. Principio de funcionamiento de sensor Sharp.....	31
Figura 33. Curva de sensibilidad Sharp GP2Y0A41SK0F.	32
Figura 34. Estructura de un puente H.....	33
Figura 35. Arduino Genuino Micro (Fuente: Arduino.cc).....	33
Figura 36. Diagrama electrónico de Emisor y Receptor IR.	34
Figura 37. Esquema electrónico principal.....	35

Figura 38. Representación resorte torsional.	37
Figura 39. Representación amortiguador torsional.	37
Figura 40. Representación de un cuerpo de inercia rotacional.	38
Figura 41. Modelo de un Motor DC.....	38
Figura 42. Modelo del percutor.....	39
Figura 43. Sistema de inercia torsional elástico con amortiguamiento.....	40
Figura 44. Diagrama de cuerpo libre del Sistema Percutor.....	42
Figura 45. Voltaje sensor Sharp (bits) vs. Tiempo:.....	45
Figura 46. Voltaje sensor Sharp (bits) cuando entra y sale de platina vs tiempo...	46
Figura 47. Dimensiones del Área de Platinas del Xilófono.	47
Figura 48. Voltaje Sharp (bits) y Posición de Platinas vs Tiempo.....	48
Figura 49. Voltaje Sharp (bits) vs Posición de Placas.....	48
Figura 50. Gráficas y Líneas de Tendencia obtenidas con Excel.....	49
Figura 51. Ecuación de Linearización vs Voltaje (bits) sensor Sharp	50
Figura 52. Encoder del xilófono fijo a la estructura.....	52
Figura 53. Posición Angular Encoder (Xilófono) vs Tiempo	52
Figura 54. Velocidad Angular Encoder (Xilófono) vs Tiempo.....	53
Figura 55. Puntos Medios de las Placas (Pulsos).....	54
Figura 56. Análisis de Datos de Gráfica de Posición Angular.....	60
Figura 57. Movimiento oscilante en Simulación SolidWorks	62
Figura 58. Movimiento oscilante Estructura Real.....	63
Figura 59. Interfaz diseñada en <i>Processing3</i>	64
Figura 60. Uso de Interfaz desarrollada en Visual C#	65
Figura 61. Sistema en ejecución tocando el xilófono.....	66
Figura 62: Pantalla Principal de Interfaz en C#	95
Figura 63. Pantalla “Play” de Interfaz en C#.	97
Figura 64. Pantalla “Settings” de Interfaz en C#	103

RESUMEN

El proyecto titulado “Diseño y Prototipo de un Sistema Mecatrónico Brazo – Percutor” propuesto por la Universidad de Ciencias Aplicadas de Brandemburgo, tiene como finalidad el diseñar y fabricar un sistema el cual permita ejecutar un sonido o serie de sonidos de manera periódica. El sistema deberá asemejar el sonido producido por una persona tocando el instrumento. El sistema consiste en un xilófono suspendido en una estructura produciendo un movimiento similar a un péndulo simple. Mediante el uso de diversos sensores y calculando varios parámetros, se obtendrá una ecuación que predecirá la posición del sistema y el momento exacto en el cual deberá tocar el xilófono. La simulación del sonido cuando un humano toca el xilófono se realizará modelando al sistema percutor como como un sistema de inercia torsional elástico amortiguado, con comportamiento similar al de un péndulo torsional, produciendo así un golpe estilo *hit-release*. Como primer punto se aborda el diseño mecánico y estructural del sistema, desarrollando todos los planos y modelados necesarios, y realizando las simulaciones que corroboran el correcto diseño, procediendo a la siguiente etapa, manufactura. El diseño fue realizado en base a los recursos disponibles en el laboratorio, tratando de utilizar la menor cantidad de material posible para optimización de costos. Posteriormente, se realiza el diseño electrónico del sistema. El requerimiento del proyecto fue de usar sensores lo más simples posibles ya que su funcionamiento debe ser en tiempo real debido a la velocidad de oscilación del xilófono. El uso de sensores de mayor coste computacional generaría retrasos en la ejecución. Los componentes utilizados, los circuitos elaborados y sus conexiones finales en conjunto están detalladas en esta sección. Finalmente, el sistema de predicción de posición, el movimiento del sistema percutor, y la interacción con el usuario (a través de interfaces y comunicación serial) son realizados. Adicionalmente, una explicación del análisis entre el golpe humano y el del sistema percutor para alcanzar un comportamiento similar es realizada.

PALABRAS CLAVE:

- XILÓFONO
- INGENIERÍA MECATRÓNICA
- SISTEMA PERCUTOR
- AUTOMATIZACIÓN.

ABSTRACT

The project titled “Concept and Prototype of a Free-Swinging Xylophone-Musical-System played by a Mechatronical Arm-Mallet-System” proposed by the Brandenburg University of Applied Sciences (TH-Brandenburg) aims to design and fabricate a system which lets play a sound or series of sounds in a periodic way. The system should simulate the sound produced by a person playing the instrument. The body consists on a xylophone hanging inside a structure producing a pendulum-like movement. By using several sensors and calculating different parameters, an equation will be obtained which would predict the system’s position and the exact moment it should hit the xylophone. The simulated sound of a human hit will be produced by modelling the mallet system as an elastic-dumped torsional inertial system, which presents a behavior similar to a torsional pendulum, producing a *hit-release* style. First, the mechanical and structural design was boarded, producing all the necessary layouts and 3D models, and running the different simulations that corroborate the right design which leads to the next stage, manufacturing. The design was made with the available resources of the laboratory, trying to use the least amount of materials in order to optimize costs. Later, the electronic design of the system was done. The project requirement was to use the simplest sensors because the system has to perform in real time due to the xylophone’s oscillation speed. The use of more complex sensors would have resulted in delays during execution. The different components used, the circuits that were designed and the final connections in the assembly are detailed in this section. Finally, the position prediction system, the movement of the mallet system, and the user interaction (through interfaces and serial communication) were completed. Additionally, an explanation of the analysis between the human hit and the mallet system hit to achieve a similar behavior was done.

KEY WORDS:

- XYLOPHONE
- MECHATRONICS ENGINEERING
- MALLET SYSTEM
- AUTOMATION.

CAPÍTULO I.

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La Universidad de Ciencias Aplicadas de Brandemburgo fue fundada en Abril de 1992, en la ciudad de Brandenburg an der Havel. Actualmente ocupa las instalaciones del Antiguo Cuartel Militar del distrito de Brandemburgo, y cuenta con un sin número de edificios e instalaciones renovadas. La Universidad ofrece pre-grados y pos-grados en tres disciplinas: Ingeniería, Administración Económica y de Negocios, y Medios y Tecnologías de Información.

El Departamento de Ingeniería de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Brandemburgo se caracteriza por la búsqueda y desarrollo de proyectos innovadores los cuales se basen en las nuevas tecnologías desarrolladas, y que supongan un desafío para sus estudiantes tanto regulares como internacionales, buscando desarrollar prototipos y equipos que representen los conocimientos impartidos y aprendidos, y que representen bases para nuevas tecnologías y soluciones a problemas en el sector empresarial tanto en Alemania como a nivel mundial. Debido a la relación Interinstitucional entre la Empresa Siemens y la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” es que se genera el lazo de cooperación entre las Instituciones de Brandemburgo y de la “ESPE”, y entre diversas conversaciones surge el interés por parte de la institución alemana en estudiantes de las carreras de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica, y emerge la idea del desarrollo de proyectos de fin de carrera por parte de estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Brandemburgo. El presente proyecto ha sido escogido para ser desarrollado por mi persona de entre otros mediante un proceso de selección realizado por parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, realizado el 27 de noviembre de 2015.

1.2. Justificación e Importancia

La búsqueda e investigación de nuevas tecnologías es el objetivo fundamental de la ciencia en la actualidad. El desarrollo de proyectos que conllevan un amplio conocimiento tiene como objetivo generar nuevos conocimientos, información y resultados en las diferentes áreas de investigación. En la era actual, la tendencia

general es de automatizar todo lo que sea posible, y es esta tendencia la que fomenta nuevos estudios y proyectos de investigación que envuelven áreas poco usuales como en este caso, la música y la mecatrónica. La automatización tiene el potencial de aplicarse en un amplio número de actividades, y mientras más simple, mejor.

Por el otro lado, la elaboración de instrumentos musicales ha sido un arte desarrollada desde el inicio de los tiempos, y con éstos también se generó diversas formas de uso. A pesar de los innumerables instrumentos y dinámicas que han sido ingenieras, la imaginación es una herramienta inagotable, y fue gracias a ésta que surgió la idea de elaborar un sistema que incorpore un xilófono de oscilación libre, cuya dinámica propone un acercamiento totalmente diferente para la composición musical.

Así, la Universidad de Ciencias Aplicadas de Brandemburgo ha considerado desarrollar un Prototipo de un Sistema Mecatrónico Brazo-Percutor, con el fin de determinar en este proyecto las capacidades actuales en el campo de la música, e impulsar el desarrollo de futuros dispositivos mejorados en la industria. El proyecto requiere de dos etapas cruciales, la etapa de diseño y la etapa de construcción y desarrollo, ambas etapas abarcan la parte mecánica y la parte de software y control. El proyecto se enfocará al área del acompañamiento musical, situación que lo convierte en un proyecto innovador al insertarse en un área poco usual como lo es la música.

El presente documento presenta el diseño mecatrónico y elaboración del prototipo de un Sistema Mecatrónico Brazo-Percutor compuesto por un xilófono suspendido el cual simula a un péndulo simple, los diferentes análisis realizados, los métodos y enfoques tomados durante la investigación y desarrollo, para lograr tocar un tono o una serie de tonos, trabajando con el movimiento oscilatorio del xilófono suspendido, la etapa de procesamiento del sistema, y lograr un comportamiento en el percutor similar al golpe que efectúa el ser humano al tocar un xilófono (*hit-release*).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar y desarrollar un Sistema Mecatrónico Brazo-Percutor autónomo, programable, semejante al movimiento humano para aplicaciones musicales mediante instrumentación, documentación técnica y algoritmos de control.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar el algoritmo de control para el Sistema Mecatrónico Brazo-Percutor de manera que se ejecute autónomamente para realizar acompañamiento musical en tiempo real.
- Evaluar mediante software de simulación los elementos mecatrónicos del Sistema Brazo-Percutor, para seleccionar aquellos que se integren de mejor manera al Sistema y generen el mejor desempeño.
- Someter a pruebas de ejecución los elementos mecatrónicos más idóneos, para realizar las correcciones debidas de manera que los movimientos producidos sean similares a los realizados por el brazo humano.

1.4. Alcance del Proyecto

El presente proyecto tiene como finalidad elaborar, diseñar y construir un prototipo de un Sistema Mecatrónico en el cual al controlar el brazo percutor, y al estar un xilófono suspendido en el aire moviéndose oscilatoriamente como un péndulo simple, se desarrolle una nueva dinámica de interacción con éste instrumento, intentando simular el golpe que realiza el ser humano al tocar un xilófono.

El sistema pretende permitir al usuario seleccionar los tonos deseados entre otras funciones, y, a través de sensores y actuadores, interactuar con el xilófono y tocar las notas deseadas. Además de su función principal, el sistema deberá permitir un monitoreo en tiempo real de todos sus sensores, cambiar la fuerza de golpe, y modificar parámetros de control por parte del desarrollador.

1.5. Descripción General del Proyecto

El desarrollo del prototipo de Sistema Mecatrónico Brazo-Percutor abarca las diversas etapas necesarias en el desarrollo de un prototipo para un concepto. Se iniciará con el análisis de ideas y conceptos que puedan realizar la actividad deseada, una vez decidido el concepto y analizadas las ventajas y desventajas del mismo se procederá al diseño a detalle del mismo, elaborando los planos de construcción para la manufactura, ensamblajes que se deben realizar, correcciones y cambios pertinentes, para que una vez que el diseño mecánico se encuentre finalizado, se proceda a la elaboración de los circuitos electrónicos y la programación del controlador del sistema con su respectiva interfaz de usuario.

1.5.1. Sistema Mecánico

El sistema mecánico del proyecto se compone de la estructura principal, a la cual se le acopló el resto de sistemas y sub-ensambles como el ensamble del sistema percutor, el ensamble del sistema de sensores, el xilófono suspendido, y el circuito electrónico final con sus componentes.



Figura 1. Modelado computacional del Sistema Mecatrónico Brazo-Percutor

1.5.2. Sistema Eléctrico/Electrónico

El sistema se compone de elementos eléctricos básicos como un Motor DC, una Fuente de Alimentación de 24 V y otra de 5 V.

En cuanto a componentes electrónicos, se utilizó diversos sensores como encoders, sensores infrarrojos, sensores de distancia, shield Puente-H, resistencias, y un microcontrolador Arduino Genuino Micro.

1.5.3. Sistema de Control

El sistema de control se centró en el análisis de las variables de posición y velocidad del xilófono, las dimensiones de la baqueta del percutor, la intensidad de golpe deseada, la velocidad del motor del sistema percutor, la posición de la baqueta, y la información de los sensores, de manera que el sistema percutor se comporte como un péndulo torsional, y el sistema mecatrónico pueda golpear los tonos deseados.

1.5.4. Interfaz de Usuario

La interacción con el usuario se centró en la elaboración de comandos seriales, tanto *getters* como *setters*, mediante los cuales se pueda obtener información en tiempo real del sistema y también efectuar acciones en el sistema (tocar notas, aumentar fuerza, ir a *home*, entre otros). Adicionalmente se trabajó en el diseño de una interfaz gráfica de usuario en Visual C# la cual llegó a un nivel intermedio de desarrollo por decisión de la universidad anfitriona, para pasar a la elaboración de los comandos seriales finales.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

Desde el inicio de los tiempos, la música ha estado presente para el ser humano. Para antiguas civilizaciones, la música se relacionaba principalmente a rituales de apareamiento y al trabajo colectivo; pero en un plano general, la música y el movimiento eran dos señales que diferenciaban vida y muerte. En la llamada arte prehistórica, música y baile eran asociadas con la vida, mientras que quietud y silencio eran elementos que simbolizarían la muerte.

No es sorprendente que con el avance de la ciencia y cultura, nuevos instrumentos musicales hayan sido desarrollados para explorar nuevos sonidos, técnicas y estilos de reproducción musical; y con la aparición de disciplinas como la ingeniería, nuevos enfoques e ideas surgieron, las cuales desencadenaron en el diseño y construcción de instrumentos musicales automáticos.

2.2. Estado del Arte

2.2.1. Automatización de Instrumentos Musicales

El buscar explorar los límites de un arte es innato en las personas, más aún en la música, motivo por el cual muchos productores de instrumentos musicales han materializado sus ideas, alcanzando a producir instrumentos autónomos los cuales no requiriesen de intérpretes humanos. (Heath & Abrams, 2014). Los primeros instrumentos musicales automatizados fueron desarrollados utilizando mecanismos muy inteligentes e ingeniosos para alcanzar los movimientos y secuencias deseadas, y con el desarrollo de la electrónica e informática, los límites de investigación se ampliaron de manera gigantesca.

Los instrumentos mecánicos o automáticos inician su historia varios siglos atrás, pero para hablar de un ejemplo claro y antiguo, se tiene a los carillones, instrumentos fabricados durante la Edad Media, los cuales mediante el uso de barriles y platinas lograban conformar un instrumento auto ejecutante. A medida que la notoriedad de este arte aumentó, fueron apareciendo nuevos artilugios como órganos hidráulicos o neumáticos, cajas musicales, pianolas, violines y violonchelos automáticos, entre otros. Cabe recalcar que la automatización no consistía únicamente en lograr que el

instrumento ejecute los sonidos en secuencia, sino también recrear factores como la dinámica de ejecución y la intensidad de tono de la misma, situación en la que la pianola sale a relucir. (Enciclopedia Encarta, 2008).

La pianola viene a ser la versión automatizada del piano en la cual, mediante el uso de elementos neumáticos y mecánicos, se puede hacer una interpretación automática de diferentes obras que se encuentran perforadas en un rollo de papel. Una ventaja que la pianola presenta es el permitir realizar tanto una ejecución automática, como una ejecución manual (similar al piano). La Figura 2 muestra una pianola automática



Figura 2. Pianola automática de marca Welte-Mignon-Steinway.
(Fuente: KarlKunde Erlaubnis)

En la actualidad la automatización no se limita a un solo instrumento, sino que ha avanzado lo suficiente como para automatizar una orquesta completa mezclada con sonidos electrónicos, obteniendo resultados que nunca se habrían imaginado antes.

Algunos ejemplos de instrumentos musicales automatizados se pueden observar en la Figura 3.



Figura 3. Instrumentos Musicales Automatizados

Yendo un poco más hacia el campo tecnológico y las nuevas tendencias, un claro ejemplo de las investigaciones y proyectos desarrollados en este campo se puede observar por parte de la empresa FESTO Didactic, la cual a través del uso de sistemas neumáticos y manipuladores robóticos desarrolló el proyecto “DJ Robots”, en el cual dos brazos manipuladores mezclan música y se mueven al ritmo de esta. El proyecto se desarrolló hace varios años, buscando atraer a los visitantes de la Olimpiada de 2003 en St. Gallen. La Figura 4 presenta unas capturas del movimiento de los robots en el proyecto.

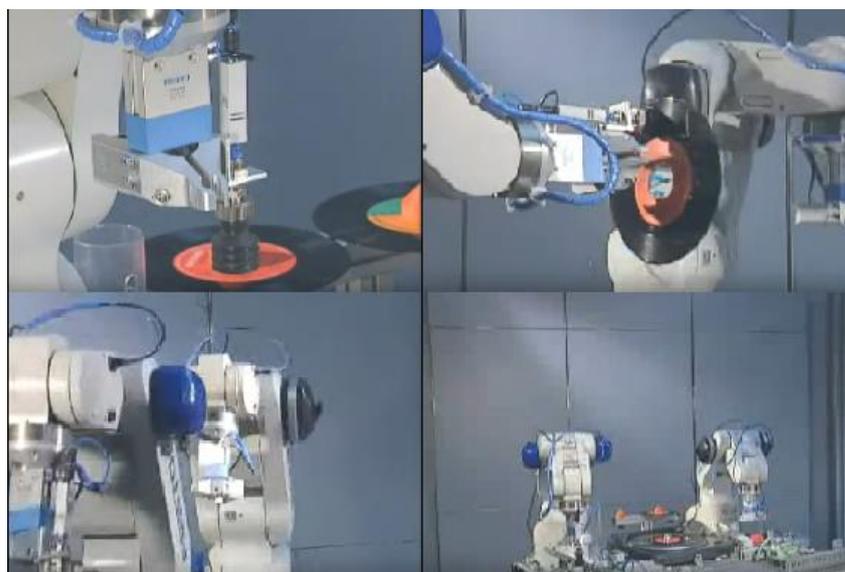


Figura 4. Proyecto “DJ Robots” de Festo Didactic

2.2.2. Composición Musical por Computadora

A pesar de los varios instrumentos musicales automatizados creados, la composición musical es toda un área diferente de investigación y desarrollo. La pregunta “¿Puede una máquina componer música como un humano?” ha estado siempre presente entre músicos y aficionados a la tecnología, dividiéndolos en un grupo a favor y un grupo de escépticos.

Si una persona es consciente de que un programa o computadora produjo una obra que se encuentra escuchando, ésta se predispone a encontrar en la obra aspectos que delaten ese factor más que a analizar su gusto por la obra. Este comportamiento recae en el efecto placebo, yendo de la mano con las ideologías y nociones personales sobre la música y las computadoras. (Agnew, 2011).

Varios intentos de composición por computadora han sido realizados desde los primeros años de la programación, pero los más interesantes y notorios han sucedido en los últimos años con la ayuda de la Inteligencia Artificial (AI), o el uso de algoritmos de composición. Empresas como Google han desarrollado sus propias máquinas e investigaciones en este tema, obteniendo diversos resultados dependiendo del algoritmo o técnica utilizada para la composición. Muchos diferentes músicos han trabajado con estos sistemas tecnológicos para componer nuevas obras, volviendo a la composición un proceso asistido en lugar de autónomo.

Un ejemplo de proyectos en este campo se puede observar en el trabajo realizado por el Grupo de Investigación en Sistemas de Información de la Universidad Nacional de Lanús, Argentina, en el cual se utilizó Algoritmos Genéticos (AAGG) para generar una composición musical mezclando diferentes melodías y armonías. Los resultados obtenidos en su investigación mostraron que la composición por computadora puede ser una herramienta gigantesca para músicos con depresión productiva. La herramienta desarrollada puede utilizarse como juego por parte de los músicos para utilizar diferentes compases y lograr encontrar arreglos más jugosos e inspiradores al iniciar a componer una canción. (Moldaver, Fernández, & Merlino, 2014).

Otro ejemplo viene de la mano de la empresa Sony, cuyas inteligencias artificiales se ponen a prueba en diferentes campos de análisis, y una de éstas ha conseguido componer una canción inspirada en el grupo *The Beatles* a partir de aprender de muchos estilos y de más de 13.000 canciones de grupos pop. La primera composición

musical realizada por Inteligencia Artificial data del año 2014 en el cual se consiguió hacer jazz para la 22ª edición de la European Conference on Artificial Intelligence. Se conoce también que Sony busca llevar al mercado el primer álbum musical compuesto por Inteligencias Artificiales para el año 2017, pero cabe recalcar que solo la composición es realizada por esta tecnología ya que en grandes partes de la producción el factor humano sigue siendo necesario. (Toledano, 2016).

2.3. Steve Reich y su Composición Musical

El compositor Steve Reich junto con sus obras influenció al desarrollo del proyecto en el tipo de música y aplicaciones en las cuales el proyecto podría recaer. La obra *Drumming* es una muestra clara de la combinación de diversos instrumentos de percusión los cuales ejecutan un tono o sonido periódicamente, y a medida que la composición continúa se van añadiendo cada vez más tonos periódicos hasta formar un solo cuerpo o melodía.

Steve Reich se basó en los sonidos y percusiones de la música africana. En el año de 1970, Steve Reich viajó a Ghana, en donde tuvo la oportunidad de estudiar con Gideon Alorworye, el percusionista maestro del Ensamble de Danza de Ghana. A pesar de no haber permanecido por mucho tiempo en el país debido a contraer malaria, Reich obtuvo los conocimientos suficientes para impregnar la marca de los ritmos africanos en sus futuras composiciones. Steve Reich plasmó en sus obras estilos poco convencionales, alejados de las típicas composiciones del arte musical del oeste; y es por esta característica que resalta de entre otros compositores, además de su decisión en 1963, de ser una parte activa de sus obras tocando un instrumento en cada una de ellas. (Ali, 2001)

La técnica de utilizar sonidos repetitivos que Reich observa al ayudar al compositor Terry Riley a materializar su obra *In C* es lo que lo motivó a encontrar una nueva forma de trabajo utilizando la repetición o periodicidad como una técnica musical. Esta nueva técnica influyó en sus obras como compositor durante 7 años, produciendo obras como *Gonna Rain* (1965), *Come Out* (1966), *Melodica* (1966), *Piano Phase* (1967), la ya mencionada *Drumming* (1971), entre otras. En esta última obra existen 4 características musicales en común con la música africana según Momeni:

- El uso del pulso como característica central en la música.
- La periodicidad rítmica de la obra.
- El uso de diferentes periodos pero un pulso común.
- Los patrones entrecruzados.

En base a la información y análisis acerca de estas composiciones y del trabajo realizado por Steve Reich se puede concluir que gran parte de las obras de este autor y de otros compositores utilizan tonos cíclicos combinados, logrando un efecto agradable al ser humano. El proyecto se basó en producir este tipo de sonidos cíclicos y periódicos, buscando asemejarse a la técnica de composición de Reich. La Figura 5 muestra la gran cantidad de instrumentos de percusión que intervienen en la obra *Drumming* compuesta por este autor.



Figura 5. Músicos y artistas interpretando Drumming.
Fuente: Youtube.com)

2.4. Diseño Asistido por Computadora (CAD)

En diversas áreas como ingeniería, arquitectura, diseño, el avance de las herramientas computacionales ha sido grande, logrando optimizar tiempos de diseño y producción a través del uso de diversos softwares especializados para la actividad en ejecución. El Diseño Asistido por Computadora ha logrado que la ingeniería de un

salto abismal en la producción de maquinaria y prototipos ya que permite realizar simulaciones, estimaciones de funcionamiento, y la corrección de errores de una manera más práctica, ahorrando dinero y producciones innecesarias.

En la actualidad, esta herramienta se ha vuelto indispensable en la industria, y es tema de estudio de muchas carreras universitarias debido a su importancia. Existen diversos programas y plataformas las cuales en esencia son similares, pero se especializan en diferentes campos. Como ejemplo se puede mencionar los programas Siemens NX, SolidWorks, SketchUp, y AutoCAD.

En el presente proyecto, el uso del Diseño Asistido por Computador fue indispensable para poder analizar modelados e ideas tentativas, mediante pruebas analizar las ventajas y desventajas de cada diseño, realizar pruebas de funcionamiento, correcciones y mejoras rápidas, y simular su comportamiento final, sin la necesidad de producir cada uno de los conceptos evitando un gasto de tiempo y dinero innecesario.

2.4.1. SolidWorks

Dassault Systèmes SolidWorks Corp. busca producir y facilitar a sus usuarios con herramientas computacionales en el campo 3D para “crear, simular, publicar y administrar los datos”. Los programas que ofertan son fáciles de aprender y utilizar para el usuario, logrando producir cada vez mejores diseños que se produzcan de manera más rápida y de forma más rentable para el usuario. Al ser SolidWorks cada vez más amigable con sus usuarios permite que cada vez más ingenieros, diseñadores y diferentes profesionales con conocimientos tecnológicos puedan enfocarse más en dar vida a sus diseños con las herramientas del diseño 3D. (Dassault Systèmes SolidWorks Corp., 2016).

La empresa fue fundada en Diciembre de 1993 en Waltham, Massachusetts, EE.UU., y posteriormente adquirida por Dassault Systèmes S.A. en el año de 1997. En la actualidad ofrece servicios en diversos campos como: Industrial, médico, científico, consumo, educación, tecnología y transportes, superando los 2 millones de clientes.



Figura 6. Ejemplo de Diseño en programa SolidWorks.
Fuente: Solidworks.es

Las prácticas soluciones que se consiguen al utilizar el diseño CAD en 3D de SolidWorks han permitido que los clientes aceleren el desarrollo de sus productos mientras que sus costos de producción disminuyen. La calidad y fiabilidad del producto aumenta debido a la precisión de los nuevos diseños. Las herramientas disponibles dentro del software permiten al usuario “crear, validar, comunicar y gestionar los diseños del producto y lanzar los productos al mercado rápidamente.” (Dassault Systèmes SolidWorks Corp., 2016).

2.5. Interacción Humano – Máquina

La interacción entre humanos y máquinas envuelve las diversas formas o modalidades mediante las cuales el usuario o humano interactúa con la computadora o máquina. La forma más común de interacción es mediante una interfaz, la cual permite el control y monitoreo del sistema. Existe una infinidad de formas de diseñar estas interfaces, pero con el rápido desarrollo de las computadoras, lo más usual es mediante softwares enfocados a esta actividad. Existen diversas formas de comunicación, los cuales se han ido normando y reglamentando mediante el uso de protocolos para así poder utilizar diferente hardware sin problemas de compatibilidad o imposibilitar la transferencia de información.

2.5.1. Microsoft Visual Studio

Visual Studio es un conjunto completo de herramientas de desarrollo para la generación de aplicaciones web ASP.NET, Servicios Web XML, aplicaciones de escritorio y aplicaciones móviles. Visual Basic, Visual C# y Visual C++ utilizan todos el mismo entorno de desarrollo integrado (IDE), que habilita el uso compartido de herramientas y facilita la creación de soluciones en varios lenguajes. Asimismo, dichos lenguajes utilizan las funciones de .NET Framework, las cuales ofrecen acceso a tecnologías clave para simplificar el desarrollo de aplicaciones web ASP y Servicios Web XML. (Microsoft Corporation, 2016)

La plataforma de Visual Studio permite el desarrollo de interfaces de usuario en diferentes lenguajes de programación y con un sinnúmero de funcionalidades. Es decisión del usuario el lenguaje a utilizar, y la complejidad o facilidad de uso que la interfaz posea. A pesar de no tratarse de un software libre, Microsoft ha puesto a disposición de estudiantes y desarrolladores amateur varios paquetes de diseño los cuales permiten elaborar interfaces para proyectos e investigaciones sin necesidad de una licencia del producto completo.

Una ventaja y desventaja al mismo tiempo es la gran variedad de hardware compatible con los sistemas Windows, pero el continuo desarrollo de nuevas versiones puede ocasionar en ciertos casos problemas de compatibilidad.

Lenguaje de Programación C#

C# es un lenguaje de programación desarrollado y estandarizado por la empresa Microsoft, enfocado hacia la infraestructura de lenguaje común. Este lenguaje es muy utilizado en la Programación Orientada a Objetos, y es parte de los lenguajes más usados dentro del programa Microsoft Visual Studio. Su desarrollo fue como una mejora a los lenguajes C y C++, incorporando elementos de ambos y también mejoras derivadas de otros lenguajes.

2.5.2. Comunicación Serial

La Comunicación Serial es un protocolo muy común de comunicación incorporado en equipos y dispositivos computacionales. Este protocolo es también muy utilizado

para instrumentación, especialmente en actividades de adquisición de datos utilizando dispositivos remotos de muestreo.

El funcionamiento de la comunicación serial se puede explicar de manera muy sencilla. El puerto serial se encarga de enviar y recibir bytes de información, y a pesar de que la transmisión sea un bit a la vez y no como la comunicación en paralelo, mediante este método se puede alcanzar mayores distancias de manera más sencilla. (National Instruments, 2004).

Adicionalmente, el uso de Comunicación Serial en la interacción con las máquinas y dispositivos elimina el problema de incompatibilidad que se presenta muchas veces, ya que para este método no se necesitan drivers ni softwares, tan solo se requiere que los dispositivos a utilizar tengan habilitado este tipo de comunicación.

En el proyecto desarrollado, la comunicación serial fue pieza clave del resultado final ya que se desarrolló un listado de comandos tanto para obtener información como para influir en el sistema, proceso que se realiza en tiempo real y sin inconveniente alguno. La importancia de este factor es la versatilidad de uso, ya que como se explica posteriormente, se probó el funcionamiento con software libre como con software con licencia, confirmando la amplia gama de compatibilidad que el dispositivo posee.

2.6. Plataformas Computacionales de Instrumentación y Control

A parte de todas las ventajas ya mencionadas gracias al avance de la informática y electrónica, falta mencionar la ayuda que han brindado a la automatización en la instrumentación y control de diversas áreas. Con el uso de microcontroladores y microprocesadores cada vez más compactos, rápidos y económicos se puede realizar proyectos complejos con excelentes resultados.

2.6.1. Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto la cual busca desarrollar hardware y software de fácil uso. Las placas de Arduino generalmente cuentan con un microcontrolador el cual ha sido configurado para tener acceso a todas sus entradas y salidas, para con éstas realizar diferentes actividades que involucren señales tanto análogas como digitales. Para facilidad de uso han desarrollado su propio lenguaje de

programación (basado en C), software de desarrollo para programar (IDE) el cual de igual manera es sencillo de usar.

La popularidad que ha ganado Arduino dentro de la electrónica y robótica es debido a la versatilidad y facilidad de uso que presenta. Puede ser utilizado tanto por personas experimentadas en estas áreas como por principiantes curiosos que buscan hacer proyectos DIY (Do It Yourself) siguiendo tutoriales y utilizando diversas bibliotecas disponibles en internet.

El uso de Arduino en las instituciones educativas ha permitido el desarrollo de instrumentos científicos de bajo costo por parte de estudiantes y maestros, instrumentos aplicables en diversas áreas como la física y química, la computación, la robótica, etc. Arquitectos y diseñadores desarrollan proyectos interactivos, músicos y artistas experimentan con nuevos instrumentos y técnicas de reproducción. Y las personas inventoras que gustan de desarrollar proyectos innovadores con tecnología y automatización lo usan ampliamente y sus resultados se pueden observar en grandes ferias y eventos en la actualidad. (Arduino, 2016).

En la actualidad existe un gran número de placas las cuales se adaptan a la gran mayoría de necesidades del mercado, dependiendo si la aplicación necesitará de muchas o pocas entradas y salidas, señales analógicas o digitales, interrupciones, *timers*, entre otras.

El uso de Arduino en el proyecto se decidió en base a la fácil adaptación de esta plataforma con otros elementos electrónicos, ya que permite el uso y la gestión de varios sensores y dispositivos de manera ágil, además de poseer una interacción con el usuario fácil y amigable, donde la codificación del programa principal se centra más en el comportamiento del sistema, en lugar de la configuración del microcontrolador y su puesta en marcha, actividades que ya se encuentran realizadas dentro de Arduino. Adicionalmente cabe recalcar que el requerimiento computacional del sistema se suple de manera suficiente con el microcontrolador, motivo por el cual se vio innecesaria la incorporación de un microprocesador.

CAPÍTULO III. DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA

El presente capítulo explica el proceso que se siguió para realizar los planos, modelados y conceptos de la forma y estructura física que el sistema presentaría, además de los diferentes análisis y simulaciones realizados tanto en papel como en programas computacionales. Todo esto se hizo para asegurar que no existan fallas al momento de proceder a manufacturar y plasmar en la realidad la idea, obteniendo el mejor resultado posible con los recursos disponibles.

3.1. Diseño de la estructura principal

Para el diseño mecánico y estructural se desarrollaron varias versiones hasta obtener la aprobación del modelo final con todas las correcciones y consideraciones del caso, diseño que posteriormente fue enviado a las instalaciones del “Garage” de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Brandemburgo para su construcción. El primer paso del proceso de diseño fue analizar las medidas y dimensiones que el sistema mecatrónico debiera tener para comportarse como un péndulo simple.

Un péndulo simple puede ser físicamente representado como se observa en la Figura 7. La diferencia entre los dos tipos de péndulos que existen es fácil de entender: Si se trata de una masa colgando al final de una polea o cuerda se está hablando de un péndulo simple; mientras que si se tratase de un objeto rígido oscilante sobre un punto estacionario que se no sea su centro de masa se habla de un péndulo físico. (Wynn, 2010, pág. 3).

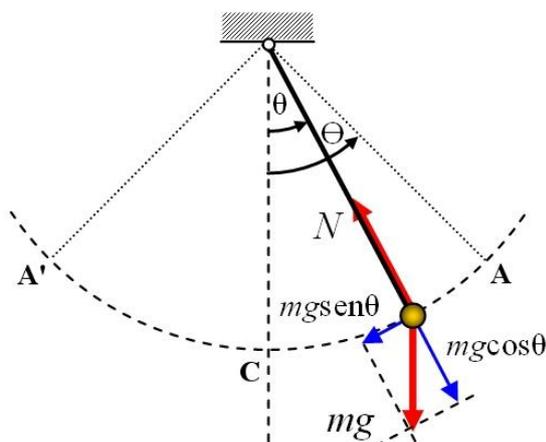


Figura 7. Ilustración de un Péndulo simple.
Fuente: Wikipedia

Considerando las definiciones y tipos de péndulos descritos previamente, el mejor enfoque para el diseño fue de hacerlo comportarse como un péndulo simple, haciendo que el xilófono oscile con respecto a un punto fijo conectado a través de poleas que se pueden considerar de masa despreciable en comparación con el peso del xilófono.

Para simplificar la ecuación diferencial del movimiento de un péndulo, el sistema deberá oscilar en ángulos pequeños y únicamente en una dimensión. Para alcanzar estas consideraciones, el sistema fue modelado similar al “Péndulo de Newton” (Figura 8), el cual usa dos poleas para lograr que la masa oscile únicamente en una dimensión, y el valor de la altura fue calculado considerando las dimensiones físicas que el xilófono posee, limitando el ángulo de oscilación a un máximo valor de 22° .

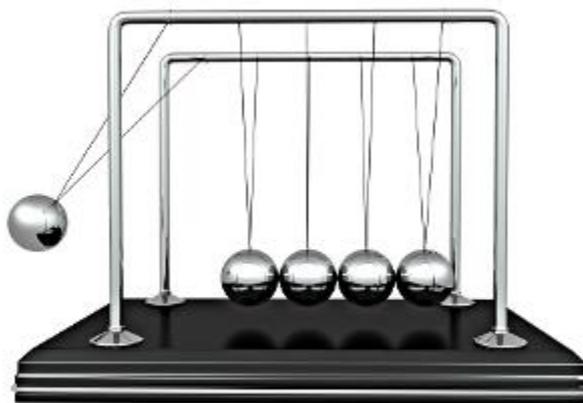


Figura 8. Péndulo de Newton.
Fuente: Schulz

3.1.1. Parámetros de Diseño

La longitud del área de placas del xilófono es de 68 cm, valor que se aproximó a 70 cm, y considerando la simetría del péndulo, la amplitud que se debió alcanzar debió ser de al menos 35 cm (para cubrir ambos lados), y la altura que posee el xilófono también debió ser considerada para las dimensiones finales de la estructura. Siguiendo los requerimientos mencionados, la Ec. 1, que relaciona la aproximación de la longitud de arco a la distancia entre sus vértices, fue la mejor opción para obtener las mejores dimensiones para la estructura.

$$L \cdot \theta \approx d \quad \text{Ec. 1}$$

Donde L es la longitud de la cuerda del péndulo y que se debió determinar, θ es el ángulo del movimiento el cual debió ser menor a 22° y para el proyecto se eligió 16° (mientras más pequeño, mejor), y d es la distancia o amplitud de la oscilación cuyo

valor es de 35 cm (la mitad de la longitud del área de placas). Con estos parámetros establecidos, los siguientes cálculos fueron realizados:

$$L \cdot \theta = d$$

$$L = \frac{d}{\theta} = \frac{35[cm]}{\frac{16\pi}{180}[rad]} = 125,33[cm]$$

Por ende, la altura mínima que debió tener la estructura fue de:

$$H_{min} = L + H_{xil} = 125 + 42 = 167[cm]$$

Para brindar al sistema una zona segura de trabajo, y que a su vez pueda ser modificado y probado con diferentes ángulos de oscilación sin poner sus elementos en riesgo, tres niveles de altura adicionales fueron establecidos con una separación de 15 cm entre cada nivel; y 5 cm adicionales de manera que el xilófono pudiera oscilar sin tocar el suelo, obteniéndose una altura final de:

$$H_{Tot} = 167 + 45 + 5 = 217[cm]$$

Una vez que las dimensiones principales fueron establecidas, varios diseños fueron realizados con la asistencia del software CAD SolidWorks hasta que el diseño final fue aprobado y construido. A continuación se explica los diferentes planos 2D y modelados 3D de algunos diseños realizados.

3.1.2. Planos y Modelados

El primer paso fue modelar el soporte que estaba ya siendo usado para ubicar el motor, y diseñar los elementos de manera que se pueda realizar un primer prototipo del sistema para el xilófono pequeño provisto inicialmente y realizar las pruebas iniciales. Los modelos diseñados se pueden observar en la Figura 9 y Figura 10, y los planos mecánicos en el Apéndice A: MCT-SMBP-001.

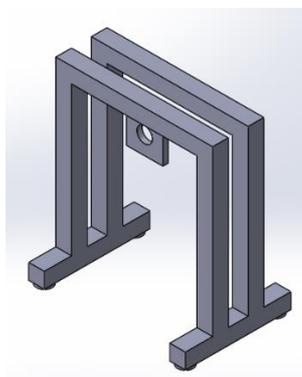


Figura 9. Diseño 3D del soporte de motor DC.

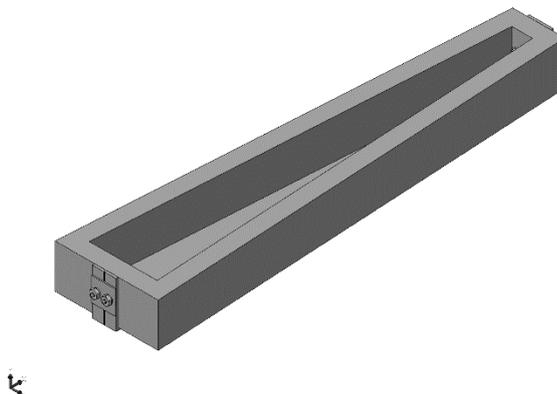


Figura 10. Ensamble 3D del xilófono pequeño con las platinas diseñadas.

Después de analizar el diseño, realizar pruebas del comportamiento del motor, y al considerar el tiempo y la optimización de material y procesos, se decidió que debería procederse a diseñar el prototipo final en lugar de fabricar un prototipo intermedio el cual serviría únicamente para una sola fase de pruebas, en consecuencia, el diseño mostrado en la Figura 11, cuyo plano se muestra en el Apéndice A: MCT-SMBP-002, fue realizado, y en la Figura 12 puede observarse la idea del ensamblaje de la estructura en conjunto con el soporte inicial del motor y el xilófono pequeño.



Figura 11. Primer modelo 3D de la estructura final.



Figura 12. Ensamblaje 3D del primer diseño.

El diseño cumplió todos los requerimientos físicos del proyecto, y después de varios análisis y conversaciones con los tutores, se decidió realizar modificaciones para integrar en la misma estructura el soporte del motor DC con sus sensores, y evitar que fuerzas externas o internas que pudieran generarse debido al movimiento del xilófono grande desestabilicen la estructura y ésta pueda caerse. Con todas estas acotaciones tomadas en cuenta, se obtuvo el diseño final mostrado en la Figura 13 con sus planos en el **Error! Reference source not found.:** MCT-SMBP-003 y MCT-SMBP-004, y el ensamblaje con el soporte del motor y el eje para el sistema de sensores (planos en el Apéndice A: MCT-SMBP-005 y MCT-SMBP-006) como se muestra en la Figura 14.

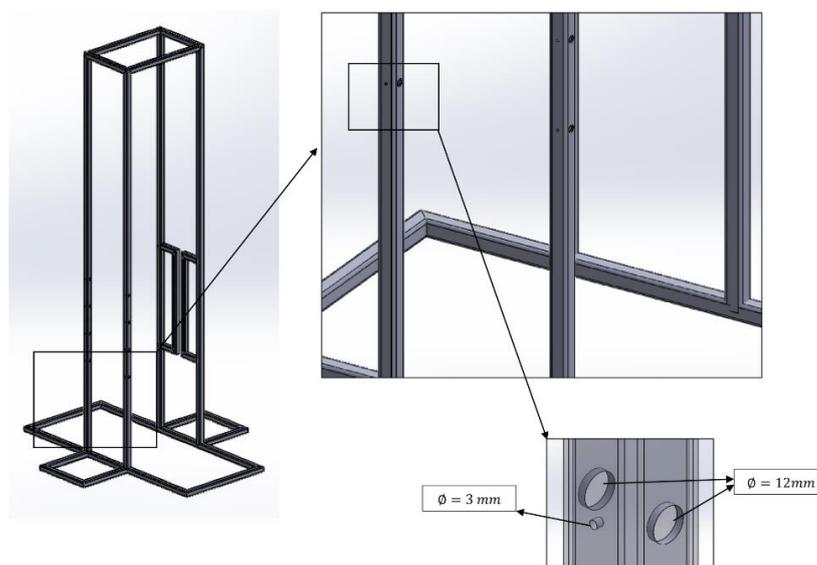


Figura 13. Modelo 3D del diseño final de la estructura.

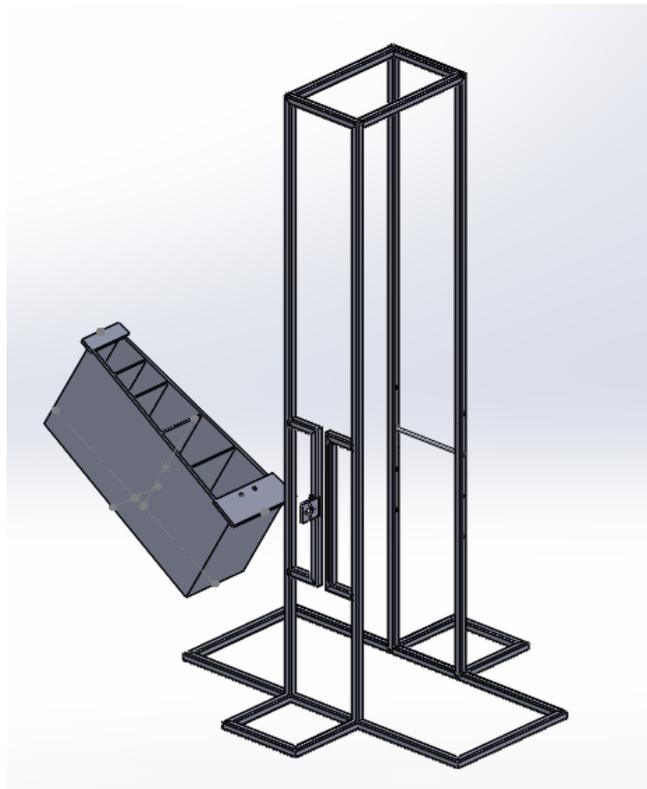


Figura 14. Modelo 3D del ensamblaje final del diseño.

Una vez que se realizó todo el ensamblaje en el software, se efectuó un Estudio de Movimiento para verificar que el diseño escogido se comportaría como se desea. De este análisis se obtuvo las curvas de Desplazamiento Angular (Figura 15), Velocidad Angular (Figura 16) y Aceleración Angular (Figura 17) las cuales muestran que el xilófono efectivamente se movería de manera oscilante como el péndulo y en una sola dimensión, confirmando así que la idea de diseño se ejecutará como se espera.

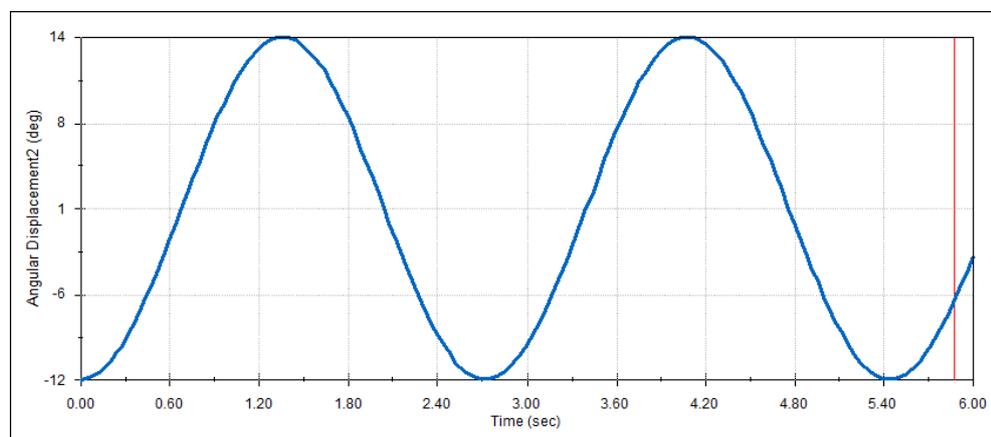


Figura 15. Simulación de Desplazamiento Angular

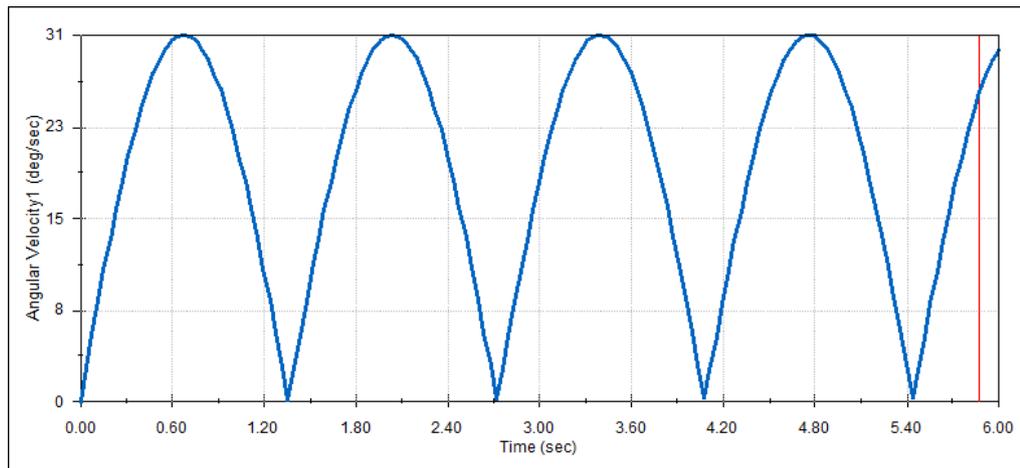


Figura 16. Simulación de Velocidad Angular

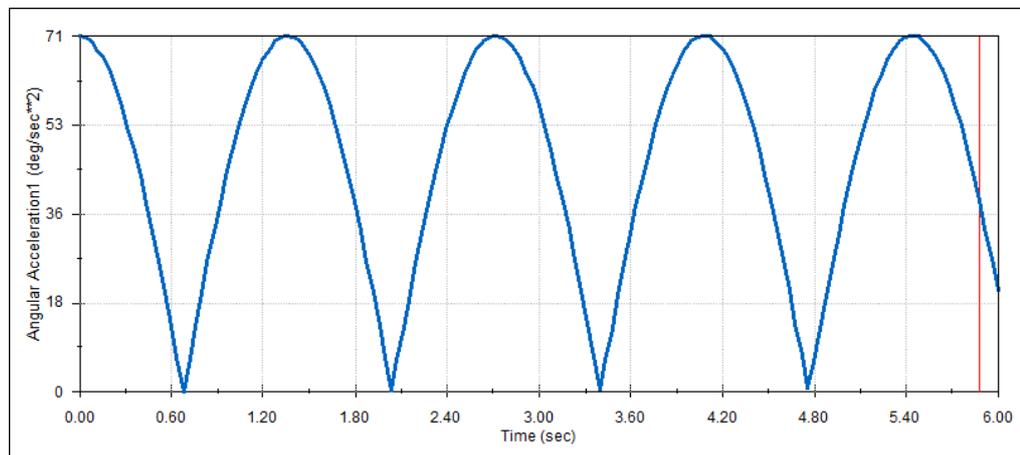


Figura 17. Simulación de Aceleración Angular

3.1.3. Selección de Material

Para la construcción de la estructura se tomó en consideración los materiales y perfiles disponibles en la universidad y se decidió utilizar Acero Inoxidable, obteniendo así los siguientes aspectos y características:

- Carga máxima a soportar: 5.5 Kg.
- Límite de fluencia (Yield Strength) $F_y=172.34$ MPa.
- Módulo de elasticidad (Elastic Modulus) $E=200$ GPa.
- Acabado: Pintura negra anticorrosiva con acabado mate.
- Dimensiones del perfil: 30x30x2 mm.

3.1.4. Análisis de Elementos Finitos

Con estos parámetros de diseño se procedió a realizar un análisis estático de elementos finitos mediante SolidWorks. Se obtuvo resultados de esfuerzos (Von Mises), deformación y de factor de seguridad. Estos resultados se pueden observar a continuación en la Figura 18, Figura 19 y Figura 20.

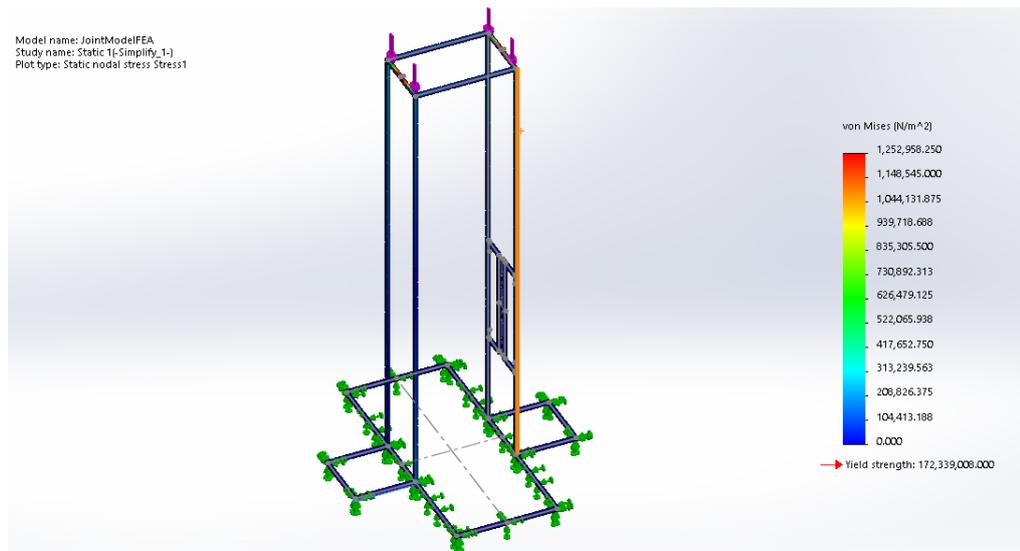


Figura 18. Análisis de esfuerzos Von Mises.

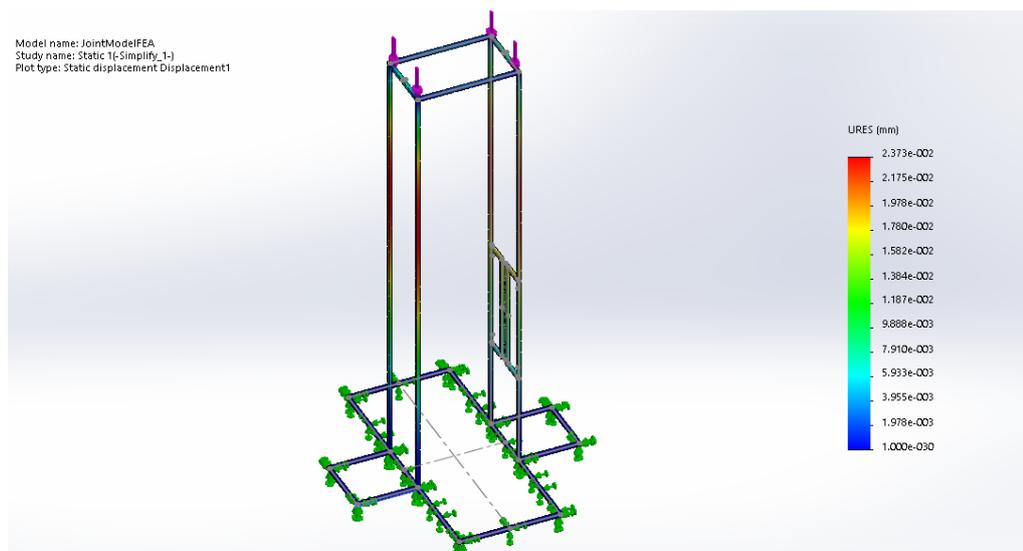


Figura 19. Análisis de deformaciones.

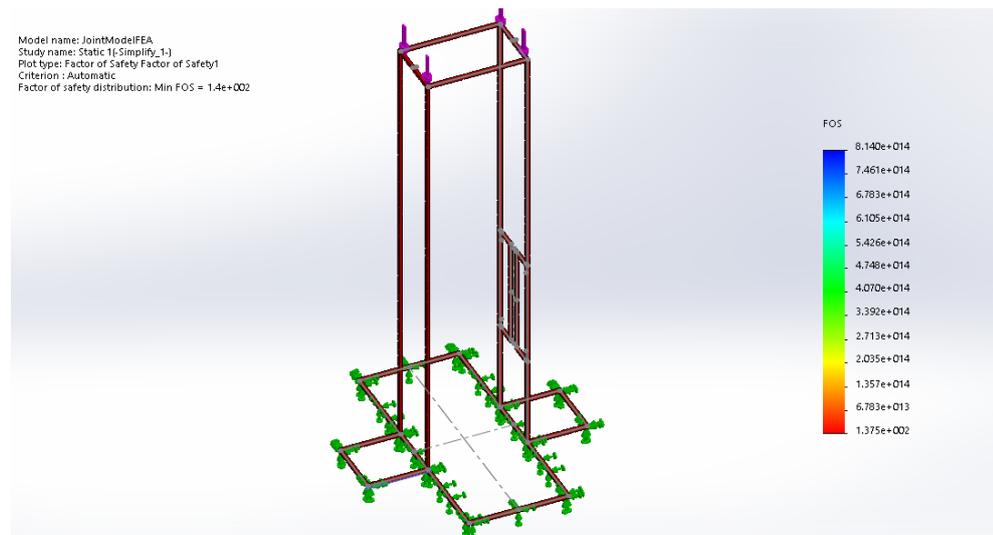


Figura 20. Análisis de Factor de Seguridad.

En base a las simulaciones se obtuvo los siguientes resultados que corroboran que el material y el diseño soportarán la carga. Un resumen de los resultados se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1.
Resultados de Análisis Estático.

Esfuerzo máximo	1.252 MPa
Deformación máxima	0.0237 mm
Factor de Seguridad mínimo	137.5

3.1.5. Resultado físico

Una vez que el diseño final fue aprobado por parte de los tutores, los planos de diseño fueron llevados al área de manufactura (*Garage*) de la Universidad para proceder con la fabricación de la estructura. La estructura manufacturada se puede apreciar en la Figura 7, y a ésta se le procedió a añadir los elementos y sub ensamblajes restantes que se detallan a continuación en el presente documento.



Figura 21. Estructura manufacturada.

3.2. Estructura de sensores

Para poder realizar el monitoreo en tiempo real del sistema se optó por utilizar sensores simples que permitan determinar la posición del xilófono, la ubicación actual de cada nota, la amplitud de la oscilación del sistema, entre otros factores, sin que éstos conlleven un alto tiempo de procesamiento ya que el sistema de sensado debe tener una rápida respuesta para poder predecir por medio del controlador la ubicación y momento idóneo para golpear las notas del xilófono correctamente. Es por estos motivos que se utilizaron los siguientes sensores:

Tabla 2.

Sensores utilizados en la estructura

Diodo Infrarojo Emisor de 940 nm
Sensor Infrarojo Receptor Amplificado K153P
Sensor Infrarojo de Distancia SHARP GP2Y0A41SK0F
Encoder optoelectrónico incremental serie MOL30

Una vez que los elementos detallados en el Apéndice A: MCT-SMBP-007, MCT-SMBP-008 y MCT-SMBP-009 fueron manufacturados, con el uso de los respectivos tornillos, extensores, rodajas y tuercas se ensambló la estructura principal de sensores,

obteniendo como resultado final un ensamblaje consolidado como se puede observar en la Figura 22.

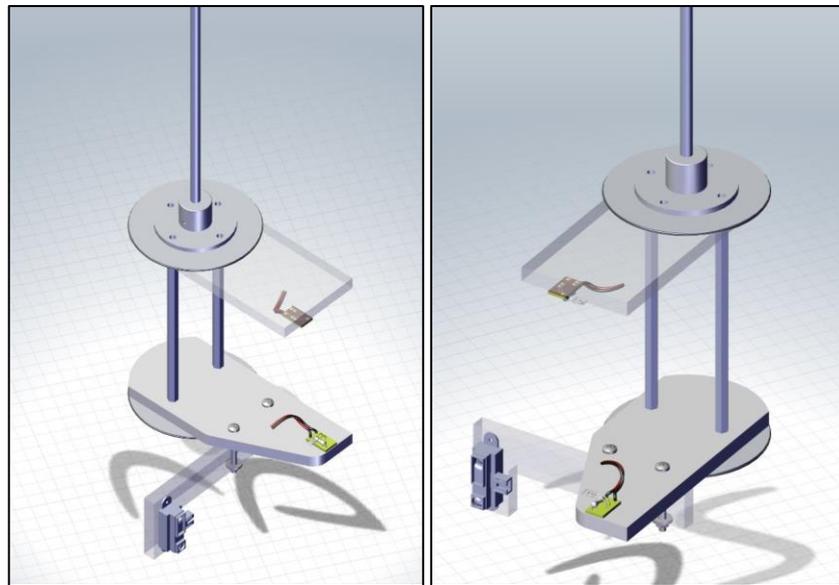


Figura 22. Ensamblaje principal de estructura de sensores.

Posteriormente se vio necesario el añadir una sub estructura simple, la cual soportó al Encoder encargado de medir la posición y velocidad angular del xilófono en tiempo real. Dicha estructura tiene las dimensiones detalladas en el Apéndice A: MCT-SMBP-010, y se puede observar su respectivo modelo 3D en la Figura 23.

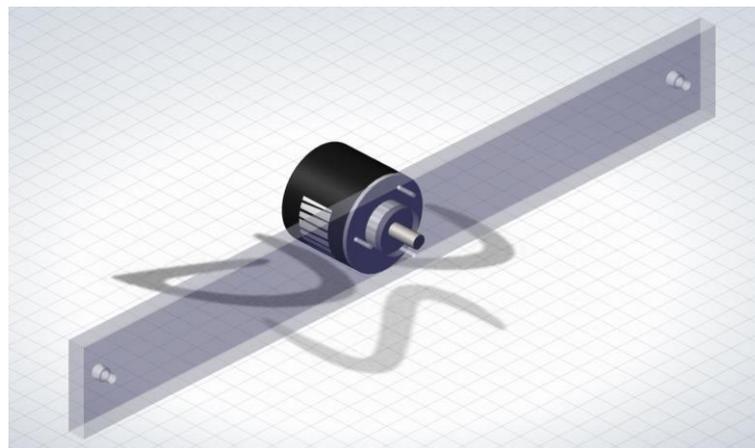


Figura 23. Modelo 3D de soporte auxiliar para Encoder de xilófono.

Una vez que las diferentes sub estructuras estuvieron finalizadas por separado, se las pudo añadir al sistema principal, incluyendo a su vez los sensores y componentes necesarios con sus respectivos cables para la conexión al circuito electrónico, y su apariencia final puede observarse en la Figura 24.

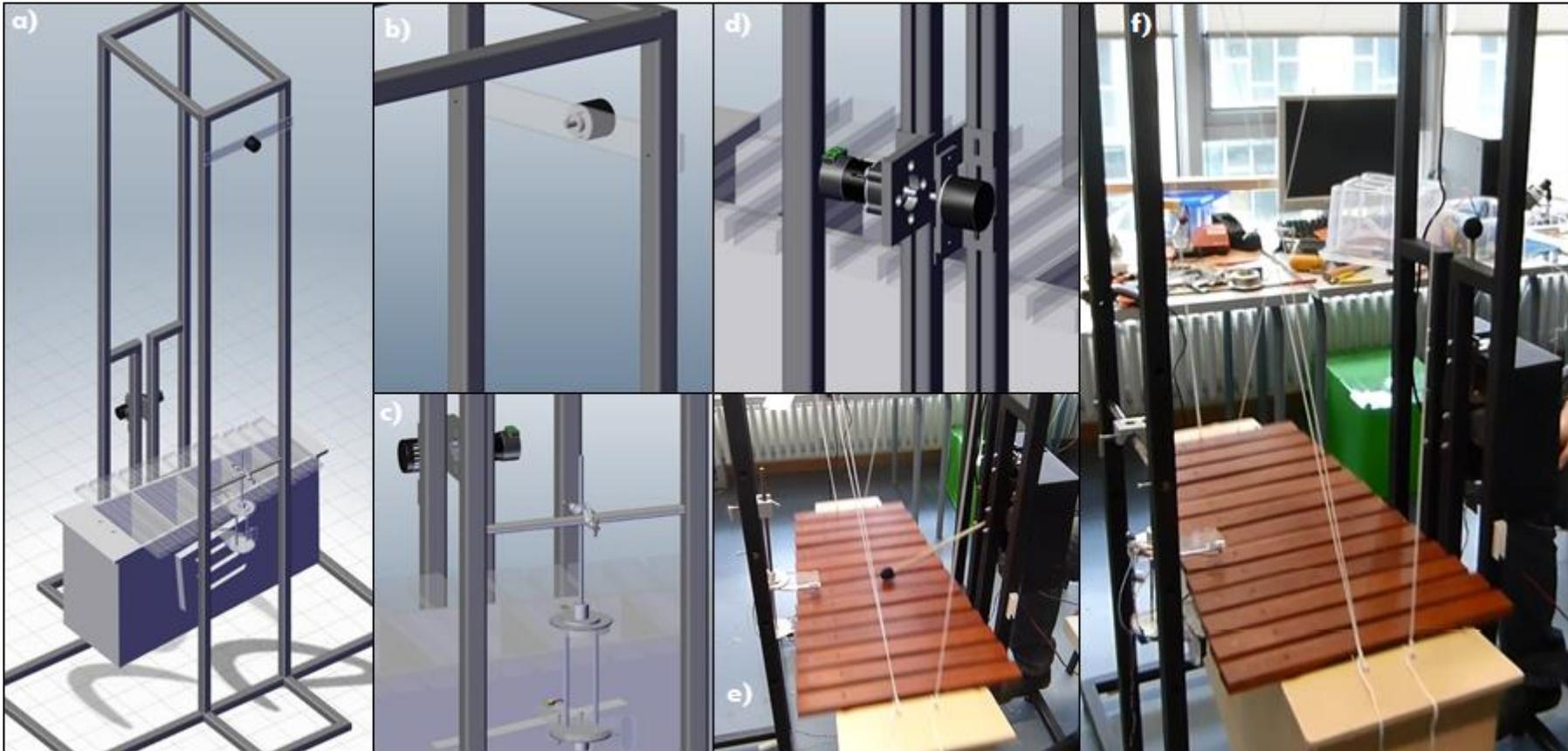


Figura 24. Ensamblaje final de Estructura con sensores. a) Vista Isométrica del Sistema. b) Vista Encoder de xilófono ensamblado. c) Vista Estructura de sensores en ensamblaje. d) Vista Ensamblaje del Sistema Percutor. e) Sistema real tocando el xilófono. f) Sistema real en posición de equilibrio.

CAPÍTULO IV.

DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA

El presente capítulo detalla y explica los diferentes elementos electrónicos utilizados a lo largo del proyecto, para llevar a cabo la construcción y el funcionamiento satisfactorio del sistema final. En esta sección se presenta la lista de materiales utilizados, los circuitos que se diseñaron y se pusieron en ejecución, la explicación del funcionamiento de cada uno de los sensores y microcontrolador utilizados, y se muestra el circuito final.

4.1. Componentes del Sistema Electrónico

Para la construcción del Sistema Mecatrónico Brazo – Percutor se utilizaron los elementos eléctricos y electrónicos detallados en la Tabla 3.

Tabla 3.
Elementos eléctricos y electrónicos utilizados.

Descripción	Cantidad
Encoder optoelectrónico incremental serie MOL30	2
Sensor Infrarrojo de Distancia SHARP GP2Y0A41SK0F	1
Motor DC modelo DOGA-162	1
Puente H modelo RN-MINI	1
Arduino Genuino Micro	1
Transistor NPN	3
Diodo Infrarrojo	2
Fototransistor	2
Resistencias	12
Fuente DC de 24 V.	1
Fuente DC de 5 V.	1
Cables	----

4.1.1. Encoder Optoelectrónico Incremental

En el campo industrial y de producción, los encoders han ganado renombre como sensores eficaces para tareas que requieren de extrema precisión. Los encoders transforman movimientos rotacionales en señales digitales que pueden ser leídas e interpretadas a través de un microcontrolador, obteniendo resoluciones muy altas, y resultados muy precisos. Una gran ventaja es que los encoders funcionan sin desgaste ya que utilizan detección fotoeléctrica o magnética gracias a que disponen de un disco graduado sujeto al eje, o gracias a un soporte magnético móvil.

Los encoders incrementales generan un número de impulsos fijo por revolución, impulsos que indican la distancia angular y lineal recorrida por el sensor. Además, gracias al desplazamiento de fases que existe entre las dos señales del encoder se puede obtener y analizar adicionalmente el sentido de rotación del movimiento, variable que se utilizó en el proyecto. (IFM, 2016).

La serie MOL30 de sensores incrementales se caracteriza por su bajo costo monetario, alta resolución, y amplio tiempo de vida útil. Adicionalmente poseen una estructura principal de aluminio, eje metálico y rodamientos, haciéndolos elementos idóneos para aplicaciones robustas que requieran encoders de gran durabilidad.

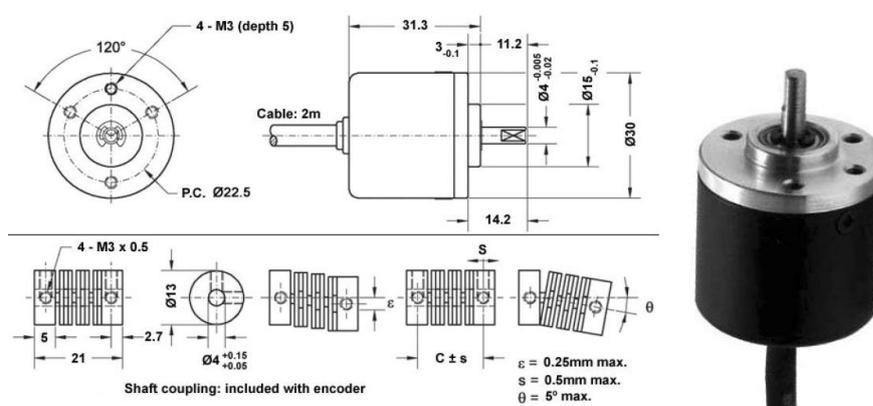


Figura 25. Encoder Incremental Serie MOL30

Fuentes: Hoja de Datos

4.1.2. Sensor de Proximidad por Infrarrojos

La necesidad de medir distancias a través de sensores fue la que dio lugar al uso de la radiación lumínica en el espectro de los infrarrojos a través de un sistema de emisión y recepción. Debido a su facilidad de uso en ambientes de iluminación artificial, y al bajo costo de estos sensores, este sistema de detección es uno de los circuitos de mayor aplicación dentro de la automatización y robótica

El sistema básico funciona al generar una ráfaga de pulsos de alta intensidad con el emisor infrarrojo, ráfaga que se transmite mediante el led que éste posee. El fototransistor receptor se encuentra generalmente contiguo al emisor, de manera que recibe la ráfaga del emisor únicamente cuando ésta se refleja en un objeto en frente del sensor. La señal es amplificada y procesada posteriormente para poder ser utilizada en las diferentes aplicaciones posibles. (Jiménez, 2016).

El sensor Sharp GP2Y0A41SK0F es un sensor de distancia que se desenvuelve en un rango de 4 a 30 cm, produciendo una señal de salida de tipo analógica. El sensor

cuenta con un emisor de luz infrarroja colimada, y de un PSD (Position Sensing Device) que hace la función de receptor. El método utilizado para la detección de posición del sensor es el principio de triangulación de la luz que refleja en un obstáculo. Como se puede observar en la Figura 26, el ángulo de incidencia del haz de luz varía según la distancia a la que el objeto se encuentre, y este haz es captado por una película lineal fotosensible la cual genera un valor analógico en la salida. Como se puede notar, a medida que la distancia incrementa, la variación del ángulo disminuye, por lo cual la precisión del sensor es mayor a cortas distancias, obteniendo una curva de sensibilidad que se muestra en la Figura 27. (Wiki de Robótica, 2016).

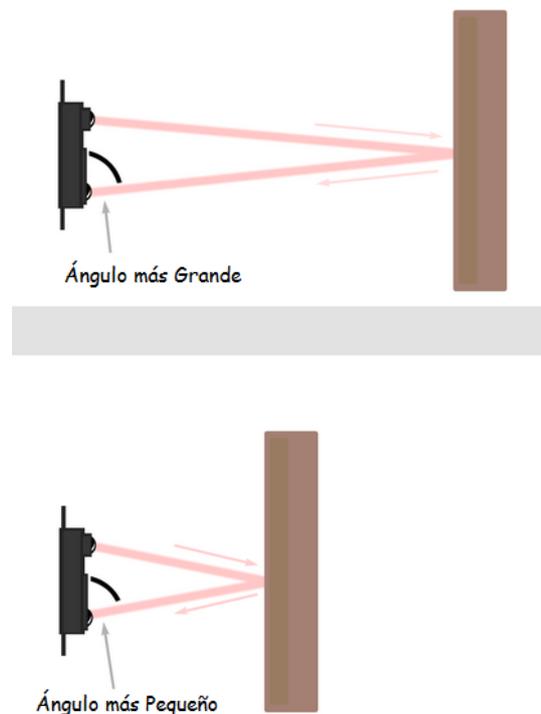


Figura 26. Principio de funcionamiento de sensor Sharp.
Fuente: Wiki Robótica

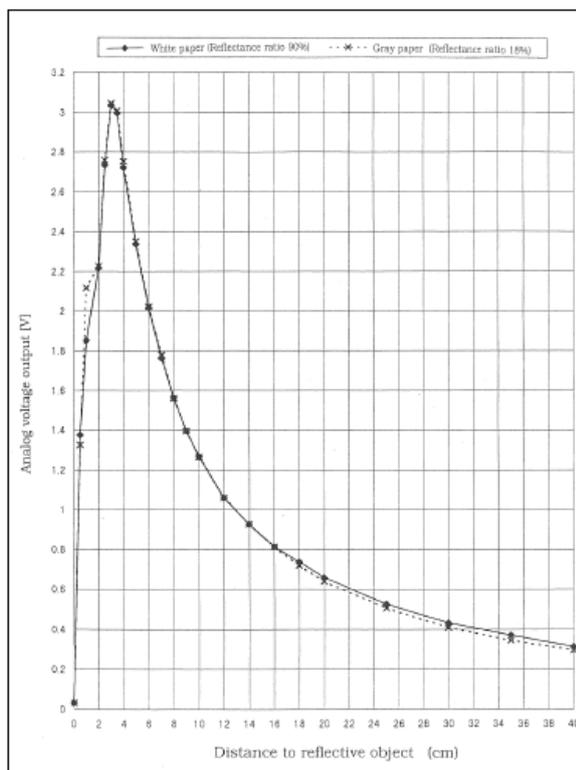


Figura 27. Curva de sensibilidad Sharp GP2Y0A41SK0F.
Fuente: Hoja de Datos

4.1.3. Motor DC

Un motor de corriente continua es un dispositivo que se encarga de utilizar la energía eléctrica provista y producir energía mecánica a través de un movimiento rotatorio de un eje mediante el uso de campos magnéticos. Físicamente se compone de dos partes: El estator el cual da soporte mecánico al dispositivo, además de contener los devanados principales de la máquina; y el rotor, el cual posee devanados y el núcleo, alimentado con corriente eléctrica mediante escobillas. Existen incontables variedades de motores DC dependiendo de la aplicación a la que vaya a ser usado cada uno. Se puede encontrar de diferentes tamaños, velocidades, fuerza y torque, con y sin escobillas, servomotores, y motores de paso. (Wikipedia, 2016)

Para el proyecto se decidió utilizar un motor DOGA tipo 162 el cual puede utilizarse con o sin un sistema de engranajes, y que se encontraba a disposición del laboratorio de mecatrónica de la Universidad. A este motor se lo modeló semejante a un sistema de péndulo torsional, que se detalla más adelante en el documento.

4.1.4. Puente H

Un puente H es un circuito o arreglo electrónico el cual ayuda a que un motor de corriente directa pueda girar en ambos sentidos (avance y retroceso). Recibe su nombre debido a la típica representación gráfica (Figura 28) y se constituye de 4 interruptores, ya sean mecánicos o transistores, los cuales se cierran y abren según el sentido de giro que se desee.

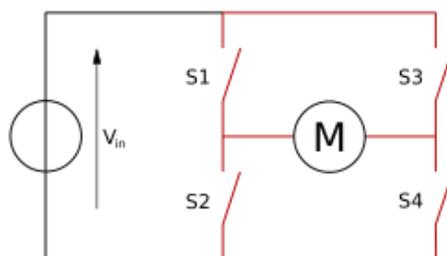


Figura 28. Estructura de un puente H.

Existen en la actualidad diversos módulos o *shields* listos para su uso, como el caso del RN MINI en el proyecto, pero también se los puede construir a partir de componentes discretos. El módulo RN MINI fue igualmente provisto por la universidad y toda su documentación se encuentra en alemán.

4.1.5. Arduino Genuino Micro

El Arduino Micro es el más pequeño de entre las placas Arduino (Figura 29), y se basa en el microcontrolador ATmega32U4. Esta placa posee 20 pines digitales de los cuales 7 pueden usarse como salidas PWM y 12 como entradas analógicas. Posee también un cristal de 16 MHz, puerto micro USB, botón de reinicio, entre otros componentes. Esta placa fue seleccionada por otras ventajas que posee, como comunicación USB por defecto, eliminando la necesidad de un procesador secundario; y el hecho de poseer 5 pines para interrupciones, que fueron clave para el uso de los encoders en el sistema.

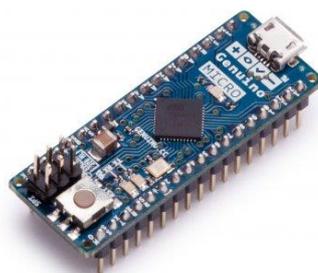


Figura 29. Arduino Genuino Micro
Fuente: Arduino.cc

4.2. Diseño de circuitos

4.2.1. Emisor y receptor Infrarrojos

Se debió realizar circuitos tanto emisor como receptor infrarrojos para poder medir y ubicar las platinas musicales y los espacios que existen entre éstas, de manera que se pueda monitorear el movimiento del xilófono, determinar el comportamiento y ecuaciones que rigen a todo el sistema, para con ello poder calibrar los sensores y ejecutar el código en tiempo real. Este sistema de sensado incorporó un Led Infrarrojo que opera entre 940-950 nm y es encendido durante todo el movimiento del xilófono, y un fototransistor, cuya señal fue amplificada utilizando 2 transistores NPN. El circuito fue probado con diferentes distancias y mostró un comportamiento excelente en diferentes condiciones de trabajo. Su esquema electrónico puede observarse en la Figura 30.

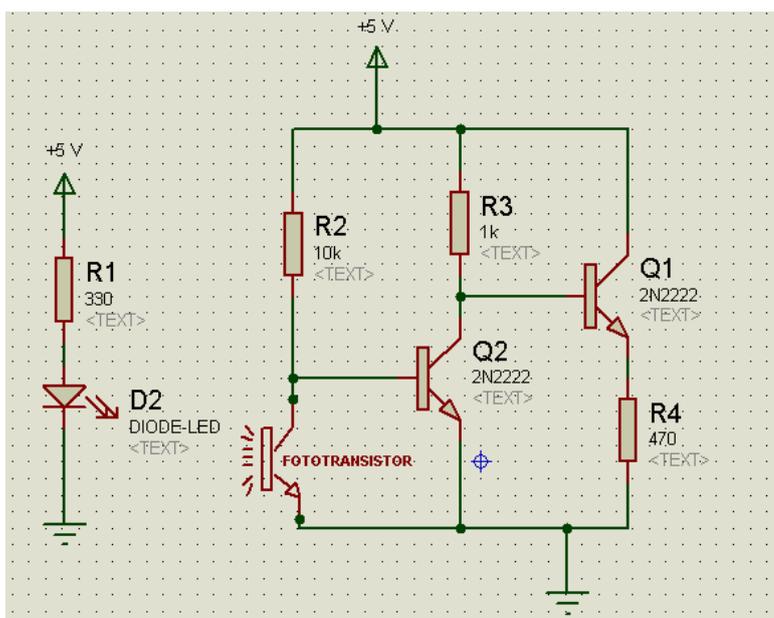
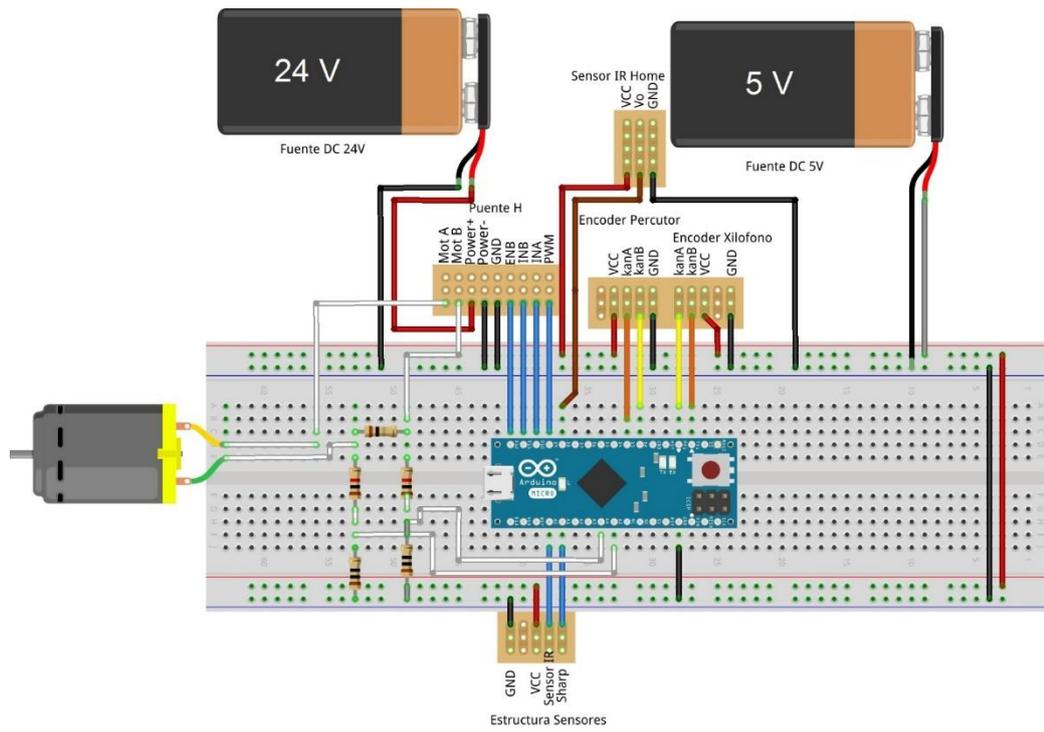


Figura 30. Diagrama electrónico de Emisor y Receptor IR.

4.2.2. Diseño final del circuito

El diseño final del circuito puede observarse a detalle en la Figura 31. Éste esquema muestra todos los componentes mencionados en la Tabla 3 con sus respectivas conexiones con el microcontrolador. El diseño del diagrama fue realizado en el programa de código abierto “Fritzing” a solicitud de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Brandemburgo.



fritzing

Figura 31. Esquema electrónico principal.

CAPÍTULO V.

DISEÑO DEL SOFTWARE DE INTERACCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN

El presente capítulo presenta los diferentes programas, códigos, técnicas, modelamientos e interfaces desarrollados durante el diseño y construcción del Sistema Mecatrónico Brazo - Percutor. Inicialmente se describe y detalla el desarrollo del sistema percutor en el cual el motor DC es modelado como un sistema de péndulo torsional, encontrando los valores de las constantes del motor y relacionándolas con las del péndulo torsional, para encontrar así una ecuación de control del sistema que produzca el movimiento deseado del motor.

Posteriormente se explica el proceso que se siguió para poder determinar la posición y sentido exactos del xilófono en movimiento en tiempo real. En esta parte se explica a detalle inicialmente el uso del sensor de distancia Sharp, el acondicionamiento y refinamiento de la señal del mismo; y posteriormente el uso del encoder incremental el cual pudo resolver los problemas que el sensor Sharp no logró. Finalmente se explica y muestra las interfaces de usuario desarrolladas en diferentes programas, y los diferentes comandos seriales que se programaron para el uso del prototipo.

5.1. Modelamiento del Sistema Percutor

Esta sección explica el modelamiento matemático que se utilizó para asemejar al Motor DC con un sistema de Inercia Torsional elástico con amortiguamiento. Se utilizó este sistema debido a las características de sobreimpulso que posee, lo cual pudo utilizarse en beneficio al proyecto al asemejarse al golpe que realiza el humano, situaciones en las cuales la baqueta o percutor rebota según la fuerza impregnada.

Un sistema de Inercia - resorte – amortiguador torsional es análogo a un sistema Masa – resorte – amortiguador, ya que lo único que difiere entre éstos es el tipo de movimiento. Este trabajo se realizó en colaboración con mi compañero de investigación, Kirolos Abdou, estudiante de la Universidad Alemana en Egipto, trabajo también reflejado en su proyecto de investigación (Abdou, 2016).

5.1.1. Resorte Torsional

Su comportamiento es similar al resorte traslacional, en el cual las fuerzas actuantes se relacionan con su desplazamiento por la extensión o compresión del mismo, de manera que en el resorte torsional, el desplazamiento angular se relaciona con el torque actuante sobre éste. El sistema supone que el resorte torsional no posee masa,

por ende no posee momento de inercia. De igual forma que en el resorte tradicional con las fuerzas, los torques en los extremos del resorte torsional serán de igual magnitud y dirección opuesta. En la Figura 32 se puede observar la representación de un resorte torsional.

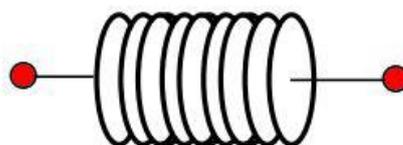


Figura 32. Representación resorte torsional.

Consecuentemente, la relación entre el torque y el desplazamiento angular se representan en la Ec. 2.

$$T = k\varphi \quad \text{Ec. 2}$$

Donde T es el torque actuante en el resorte, φ es la deformación angular, y k es la constante elástica torsional del resorte cuyas unidades son Nm/rad .

5.1.2. Amortiguador Torsional

La finalidad del amortiguador torsional es relacionar el Torque en los extremos con la velocidad angular. Se asume que el sistema no posee masa ni momento de inercia. Al igual que en el resorte torsional, los torques actuantes en los extremos del amortiguador rotacional son de igual magnitud y direcciones opuestas. En la Figura 33 se puede observar la representación de un amortiguador torsional.

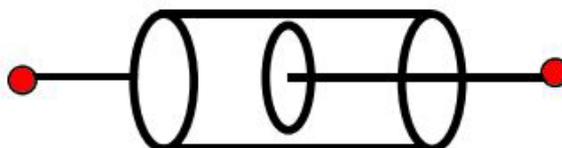


Figura 33. Representación amortiguador torsional.

La Ec. 3 representa al sistema de amortiguación torsional.

$$T = b\dot{\varphi} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde b es el coeficiente de amortiguamiento torsional, cuyas unidades son Nms .

5.1.3. Cuerpo de Inercia Rotacional

La propiedad principal de este elemento es que posee inercia rotacional. Es un sistema análogo a una masa de un sistema traslacional. La rigidez propia de este elemento lo protege de una deformación ocasionada por los torques aplicados. En la Figura 34 se puede observar la representación de este elemento.

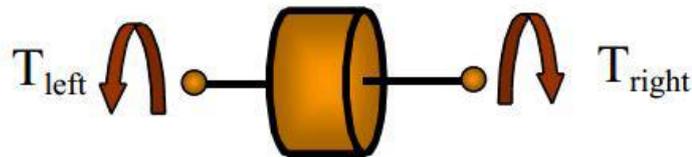


Figura 34. Representación de un cuerpo de inercia rotacional.

La Ec. 4 representa al sistema de cuerpo de inercia rotacional.

$$T_{right} - T_{left} = J\ddot{\phi} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde J es el momento de inercia del cuerpo en rotación.

5.1.4. Modelamiento del Motor DC

Un motor DC es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica, basándose en el hecho de que si un elemento conductor con corriente se ubica en un campo magnético, tendrá la tendencia a moverse debido al torque resultante en éste. Es claro que el torque resultante es directamente proporcional a la corriente de armadura y el campo magnético en el cual el elemento conductor es situado. El circuito equivalente de la armadura y el diagrama de cuerpo libre del rotor se pueden observar en la Figura 35.

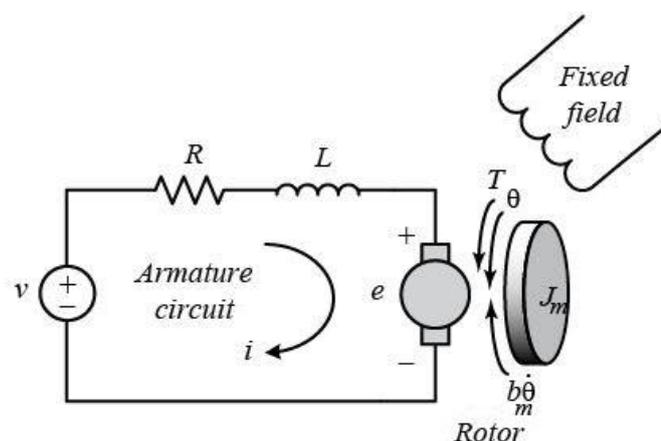


Figura 35. Modelo de un Motor DC.

El motor también presenta un torque generado por la fricción:

$$T_{Fric} = b_m \dot{\theta}$$

Donde b_m es la constante de viscosidad del motor.

Para obtener un motor de armadura controlada, el campo magnético se asume como constante, de manera que el torque del motor es proporcional únicamente a la corriente de armadura i por un factor k_t como se muestra en la ecuación a continuación.

$$T + T_{Fric} = k_t i$$

La fuerza contra-electromotriz e es proporcional a la velocidad angular del eje por un factor constante k_e .

$$e = k_e \dot{\theta}$$

En unidades del SI, el torque del motor y la fuerza contra-electromotriz son iguales, $k_t = k_e$, de manera que se utilizará k_m para representar a ambos elementos, obteniendo:

$$T + T_{Fric} = k_m i$$

$$T = k_m i - b_m \dot{\theta} \quad \text{Ec. 5}$$

$$e = k_m \dot{\theta} \quad \text{Ec. 6}$$

5.1.5. Modelado del percutor

El sistema de la Figura 36 está compuesto por la baqueta fijada al rotor del motor, similar a un péndulo simple, de manera que se debe calcular el centro de masa del sistema completo (d_s) y el momento de inercia (J_s).

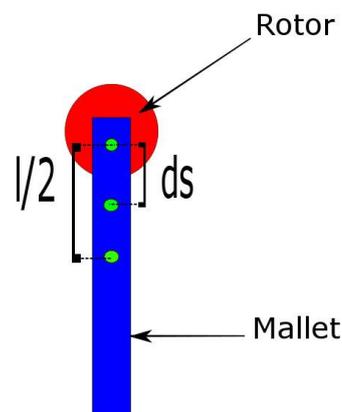


Figura 36. Modelo del percutor.

Dado que el centro de masa de dos masas es igual a:

$$c_m = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2}{m_1 + m_2},$$

El centro de masa del sistema percutor es igual a:

$$d_s = \frac{0+(l/2)m}{m_r+m} \quad \text{Ec. 7}$$

Y el momento de inercia del sistema será:

$$J_s = J_m + m_r d_s^2 + J_{sp} + m \left(\frac{l}{2} - d_s \right)^2 \quad \text{Ec. 8}$$

5.1.6. Ecuaciones Dinámicas

Ecuaciones dinámicas de movimiento de un sistema de Inercia Torsional elástico con amortiguamiento

Considerando el sistema mostrado en la Figura 37, el resorte y amortiguador torsionales están en paralelo de manera que se someten al mismo giro, y un torque externo es aplicado en el nodo 3.

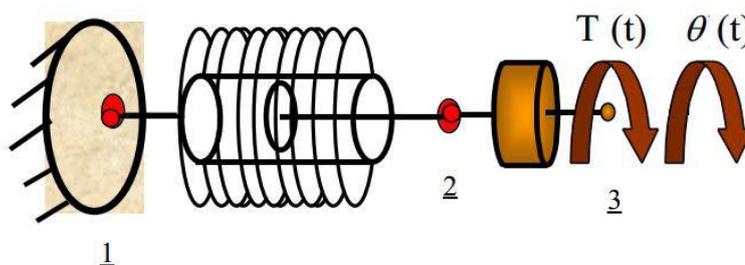


Figura 37. Sistema de inercia torsional elástico con amortiguamiento.

Aplicando la ley de Euler para sistemas rotacionales (El Torque neto en un cuerpo es proporcional a su aceleración angular), se tiene que:

$$\sum T = J\ddot{\phi}$$

Incluyendo Ec. 2, Ec. 3 y Ec. 4 dentro de la ley de Euler se obtiene:

$$T - k\phi - b\dot{\phi} = J\ddot{\phi}$$

$$T = J\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + k\phi \quad \text{Ec. 9}$$

Ecuaciones Dinámicas del Motor DC

Aplicando la ley de Euler y considerando la Ec. 5 se tiene que:

$$k_m i - b_m \dot{\theta} = J_m \ddot{\theta} \quad \text{Ec. 10}$$

Aplicando la Ley de Kirchhoff de Voltaje se tiene:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + k_m \dot{\theta} = V \quad \text{Ec. 11}$$

5.1.7. Identificación de las Constantes del Motor DC

Constantes del datasheet del Motor

El motor que se utilizó en el proyecto es un DOGA de escobillas modelo 162.4102.30.00 el cual presenta las siguientes características:

Voltaje Nominal: $V_n = 24 V$.

Torque Nominal: $T_n = 0.2 Nm$.

Velocidad Nominal: $n_n = 2000 rpm$.

Corriente Nominal: $I_n = 3 A$.

Torque de Arranque: $T_a = 1 Nm$.

Corriente de Arranque: $I_a = 12 A$.

Peso Total: $m = 1.1 kg$.

Para obtener el valor de la inductancia del motor se midió la impedancia con el cambio de fase utilizando una fuente a una frecuencia de 100 KHz. Obsérvese los detalles en la Tabla 4.

Tabla 4.

Mediciones de impedancia y cambio de fase con fuente a 100 KHz.

Z (Ω)	γ (deg)
631	58.6
642	58.3
627.5	59.3

Conociendo que la reactancia

$$X_L = 2\pi fL$$

Y

$$X_L = Z \sin \gamma$$

Se tiene

$$L_i = \frac{Z_i \sin \gamma_i}{2\pi f}$$

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^3 L_i}{3} = 0.0008617543 H.$$

Durante Bloqueo

En estado estable, Ec. 11 se simplifica a $Ri + k_m \dot{\theta} = V$, y dado que $\dot{\theta} = 0$ en bloqueo, se tiene

$$R = \frac{V_n}{I_a} = \frac{24}{12} = 2\Omega$$

En el caso de bloqueo, Ec. 5 se define como

$$T_a + T_{fric} = k_m I_a$$

En vacío (motor sin carga)

El torque en vacío es igual a 0, de manera que

$$T_{fric} = k_m I_o \quad \text{Ec. 12}$$

Donde I_o es la corriente en vacío medida con V_n , y es igual a 0.57 A.

Reemplazando la Ec. 12 en la ecuación de torque del caso de bloqueo se obtiene

$$T_a + k_m I_o = k_m I_a$$

$$k_m = \frac{T_a}{I_a - I_o} = \frac{1}{12 - 0.57} = 0.0879 \text{ Nm/A}$$

A corriente nominal I_n , la velocidad se mantiene constante, $n_n = 2000 \text{ rpm}$ y $\ddot{\theta} = 0$, entonces de la Ec. 10 se puede calcular b_m

$$b_m = \frac{k_m I_n}{n_n} = \frac{0.0879 * 3}{2000 * \frac{2\pi}{60}} = 0.00125907 \text{ Nm/s}$$

Ecuaciones Dinámicas del Sistema Percutor

De la ley de voltaje de Kirchhoff se obtuvo la Ec. 11

$$L \frac{di}{dt} + Ri + k_m \dot{\theta} = V$$

Aplicando la Segunda Ley de Newton para un sistema rotacional:

$$\sum T_{\text{Centro de masa del sistema}} = J_s \alpha$$

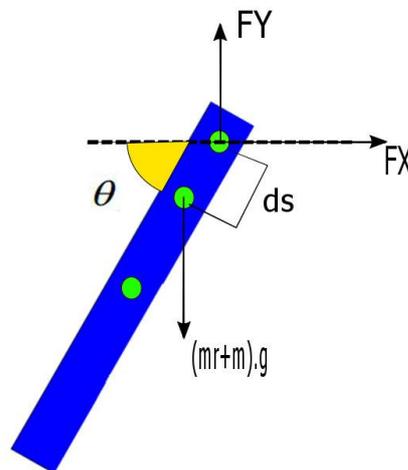


Figura 38. Diagrama de cuerpo libre del Sistema Percutor.

Considerando las fuerzas de peso y reacción en el sistema de la Figura 38, substituyendo Ec. 5 en la Segunda Ley de Newton para un sistema rotacional se tiene

$$J_s \ddot{\theta} = F_Y d_s \cos \theta - F_X d_s \sin \theta + k_m i - b_m \dot{\theta} \quad \text{Ec. 13}$$

Si r es el vector posición del centro de masa del sistema

$$r = -d_s (\cos \theta, \sin \theta)$$

Entonces el vector velocidad \dot{r} es

$$\dot{r} = -d_s \dot{\theta} (-\sin \theta, \cos \theta)$$

Y el vector aceleración \ddot{r} es

$$\ddot{r} = d_s \dot{\theta}^2 (\cos \theta, \sin \theta) - d_s \ddot{\theta} (-\sin \theta, \cos \theta)$$

Aplicando la Ley de Newton

$$\sum F = m \cdot a$$

Y dado que $a = \ddot{r}$, entonces

$$\begin{aligned} (m + m_r) \cdot [d_s \dot{\theta}^2 (\cos \theta, \sin \theta) - d_s \ddot{\theta} (-\sin \theta, \cos \theta)] \\ = F_Y (0,1) + F_X (1,0) + (m + m_r) \cdot g \cdot (0, -1) \end{aligned}$$

Para obtener F_X y F_Y , se igualó las fuerzas en dirección X e Y.

- Fuerzas en Dirección X:

$$(m + m_r) \cdot [d_s \dot{\theta}^2 \cos \theta + d_s \ddot{\theta} \sin \theta] = F_X \quad \text{Ec. 14}$$

- Fuerzas en Dirección Y:

$$(m + m_r) \cdot [d_s \dot{\theta}^2 \sin \theta - d_s \ddot{\theta} \cos \theta] + (m + m_r) \cdot g = F_Y \quad \text{Ec. 15}$$

Reemplazando Ec. 14 y Ec. 15 en Ec. 13 se obtiene:

$$\begin{aligned} J_s \ddot{\theta} = [(m + m_r) \cdot [d_s \dot{\theta}^2 \sin \theta - d_s \ddot{\theta} \cos \theta] + (m + m_r) \cdot g] d_s \cos \theta - \\ (m + m_r) \cdot [d_s \dot{\theta}^2 \cos \theta + d_s \ddot{\theta} \sin \theta] d_s \sin \theta + k_m i - b_m \dot{\theta} \quad \text{Ec. 16} \end{aligned}$$

5.2. Detección de Posición del Xilófono

El primer método que se utilizó para detectar la posición del xilófono en tiempo real fue combinando el sensor de distancia SHARP y el sistema de Infrarrojo. Debido al pequeño tamaño que poseen los huecos entre platinas, fue esencial realizar las

suficientes mediciones del movimiento del xilófono, buscando así no saltar ninguno de los espacios entre placas. Para calcular el intervalo de tiempo que se debe tener entre cada medición, se debió conocer el valor del Periodo (T) de las oscilaciones, que se encuentra dado por la Ec. 17.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad \text{Ec. 17}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1.90}{9.81}} = 2.76 \text{ s.}$$

Conociendo el periodo del movimiento, el tiempo que tomaría el desplazamiento lineal de cada milímetro del área de placas efectiva del xilófono viene dada por:

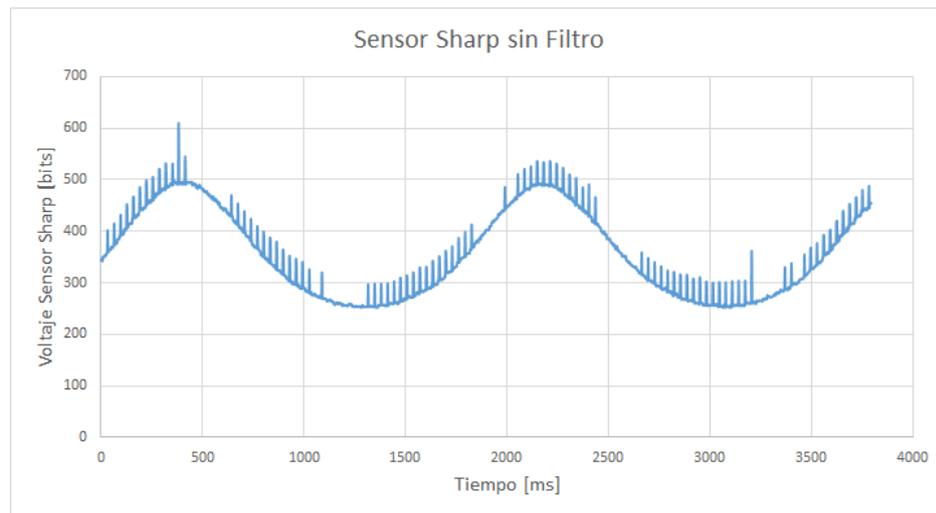
$$t_{mm} = 1[mm] \cdot \frac{T}{2 \cdot L_{Xil}} = 1[mm] \cdot \frac{2765[ms]}{2 \cdot 665[mm]} = 2.08[ms]$$

De esa manera se determinó que para una resolución de 1 mm , se debía tomar una medición cada 2 ms o menos. Con la ayuda de un Arduino Mega 2560, el cual posee mayor memoria local y RAM, es posible almacenar más mediciones que con el Arduino Micro, y se escribió el código mostrado en el Apéndice B para realizar las mediciones y toma de datos, y así poder determinar las ecuaciones correspondientes a la posición del xilófono en tiempo real con el sistema de sensores.

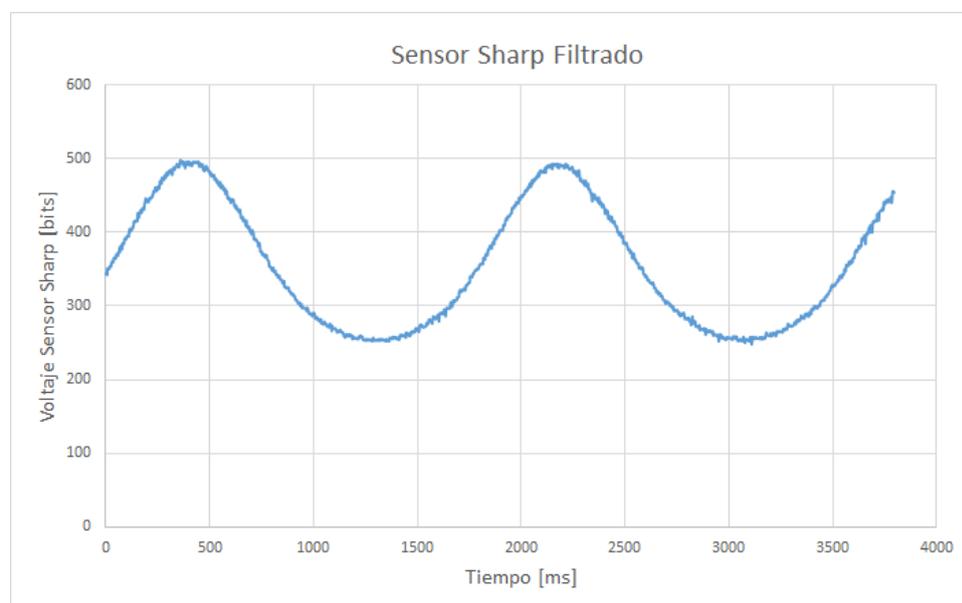
Una dificultad muy grande que se presentó en este punto fue el hecho de que el sensor de distancia SHARP, según la hoja técnica, posee un tiempo de refrescamiento de medidas de 16.5 ms . A pesar de este inconveniente físico, se realizaron dos estrategias de medición diferentes: la primera estrategia consistió en tomar mediciones tanto del sensor SHARP como del sistema IR cada 2 ms ; y la segunda estrategia consistió en tomar la medición del sistema IR cada 2 ms y del sensor SHARP cada 18 ms . Ambas estrategias se ejecutaron varias veces para así obtener datos más precisos, promedios de éstos, y prevenir y eliminar errores. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

La diferencia de respuesta del sensor Sharp con las diferentes frecuencias de muestreo no fue significativa, de manera que se utilizó los datos adquiridos cada 2 ms de ambos sensores, y se obtuvo buenos resultados, que tuvieron que ser filtrados debido a saltos repentinos en los valores del sensor SHARP. La Figura 39 presenta las gráficas de los valores originales obtenidos del sensor SHARP y los valores después

de aplicar una condición de filtro, en función del tiempo. La condición de filtro utilizada fue que si la diferencia entre la lectura actual y la anterior excede 20 unidades (salto erróneo de valores), el valor actual sería igual a la penúltima lectura más la diferencia entre la penúltima y antepenúltima lectura, y si no es mayor a 20 unidades, la lectura actual se mantiene.



a)



b)

Figura 39. Voltaje sensor Sharp (bits) vs. Tiempo: a) Sin Filtro. b) Filtro aplicado.

Como se puede observar, el filtro ayudó a suavizar la curva y obtener mejores valores para trabajar con ellos. El segundo paso fue de segregar los datos del sensor de distancia con los datos del sistema de IR para obtener los valores de voltaje en los instantes en que el sistema entra y sale de una platina. Adicionalmente para obtener un mejor valor de las mediciones, en cada iteración se obtuvo valores promedio de entre las 3 últimas mediciones, condición que se puede apreciar en la Figura 40.

La siguiente parte de este paso fue determinar qué punto del xilófono se encontraba entre los sensores en cada transición. En la Figura 41 se muestra el punto referencia del área de placas que se asumió como origen, y las dimensiones que cada placa o platina y los espacios entre éstas poseen.

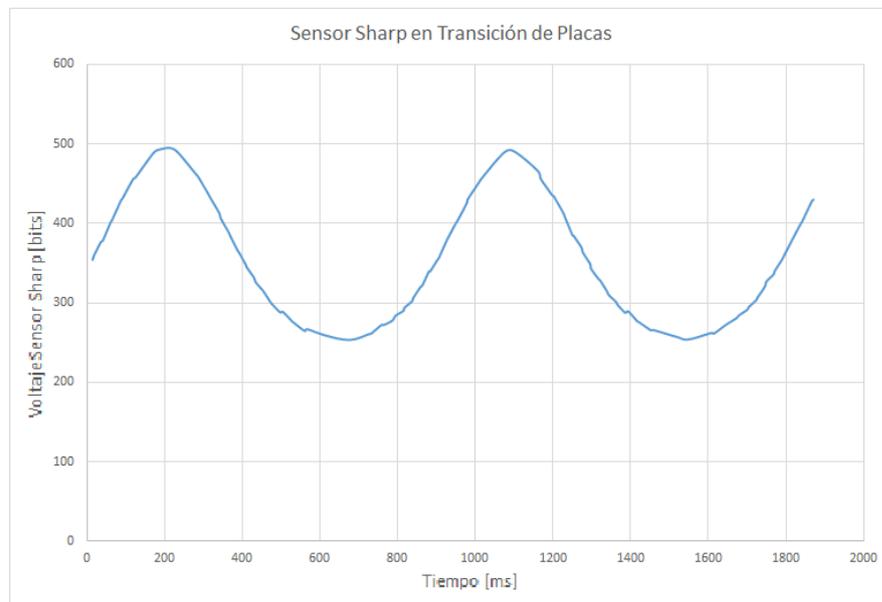


Figura 40. Voltaje sensor Sharp (bits) cuando entra y sale de una platina vs tiempo.

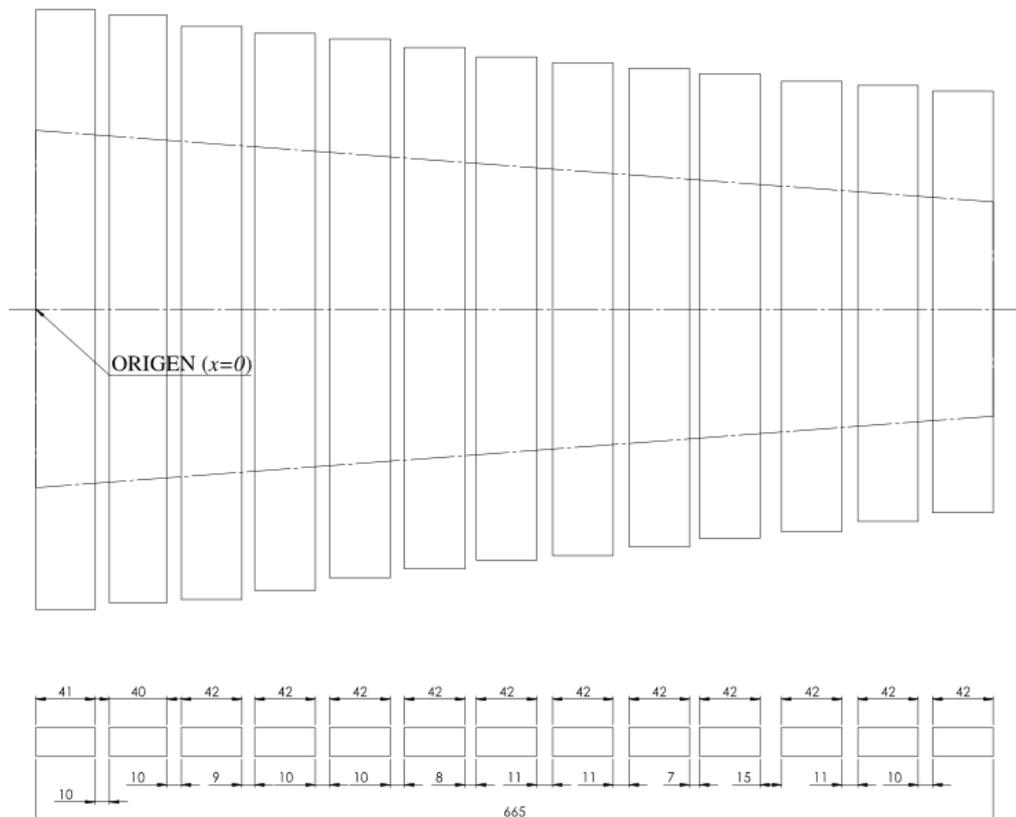


Figura 41. Dimensiones del Área de Platinas del Xilófono.

Los resultados de la interpolación entre todos los datos tomados se puede observar en la Figura 42. La escala del lado izquierdo es para los valores del voltaje del sensor Sharp (bits ADC), y la escala del lado derecho es para el número de placa que se encuentra entre emisor y receptor IR en ese preciso momento, donde 1 es la placa de tono C (placa más grande en la Figura 41), y 13 es la placa de tono A (placa más pequeña en la Figura 41), y todos los puntos medios (ej. 1.5, 3.5, 6.5, etc.) representan los espacios entre las placas.

En la Figura 43 se representó de una manera más específica los voltajes que el sensor Sharp arroja para cada una de las placas, y debido al comportamiento característico de éste sensor como se explicó en la sección 4.1.2, la variación de voltaje entre una y otra placa se vuelve menor a medida que la distancia del xilófono con el sensor aumenta. Tomando en cuenta las minúsculas variaciones de voltaje entre las placas y espacios, la lógica que determine la exacta posición debió ser lo más precisa posible.

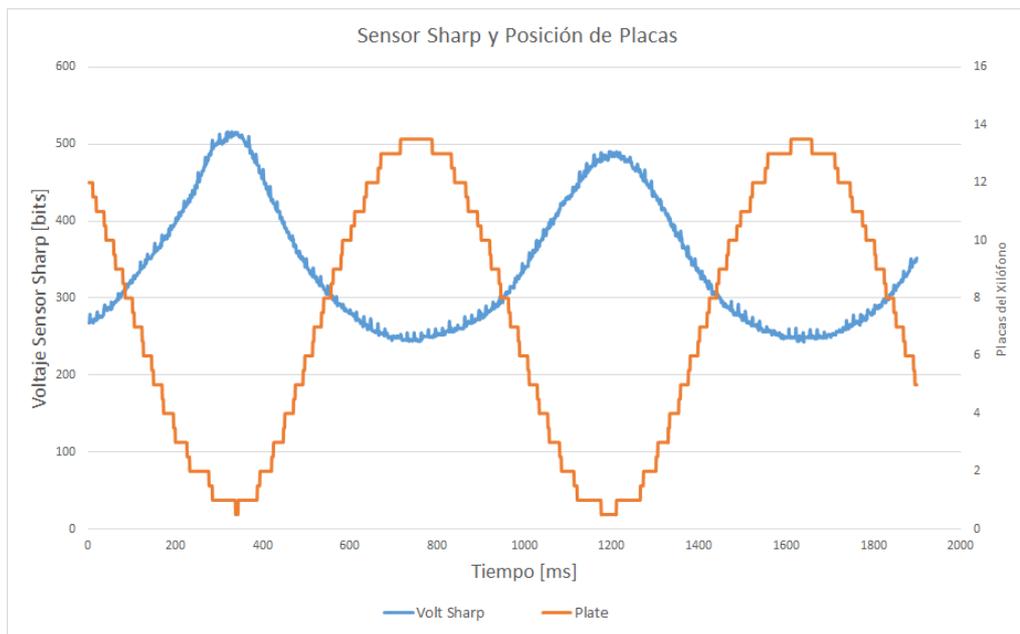


Figura 42. Voltaje Sharp (bits) y Posición de Platinas vs Tiempo

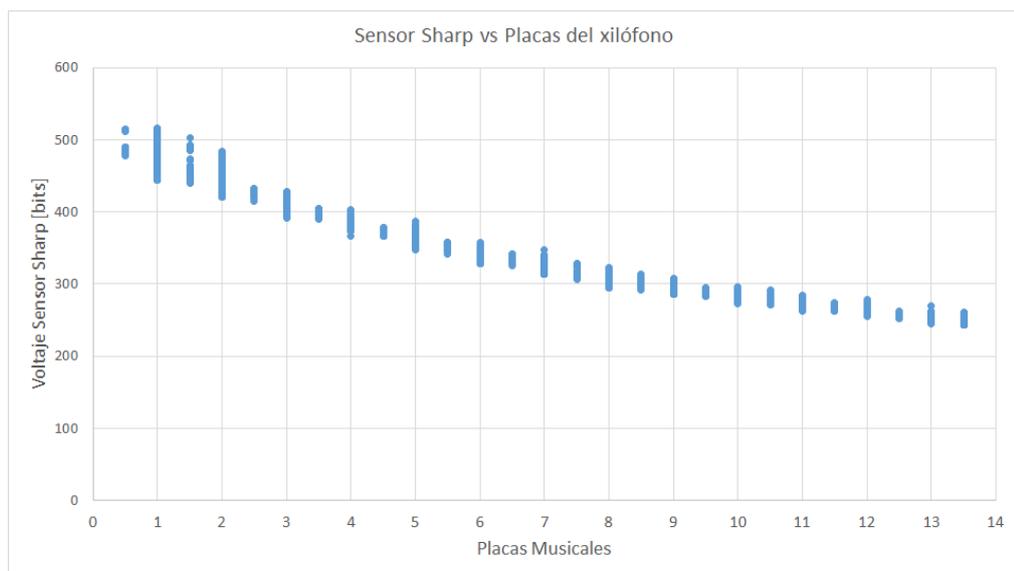
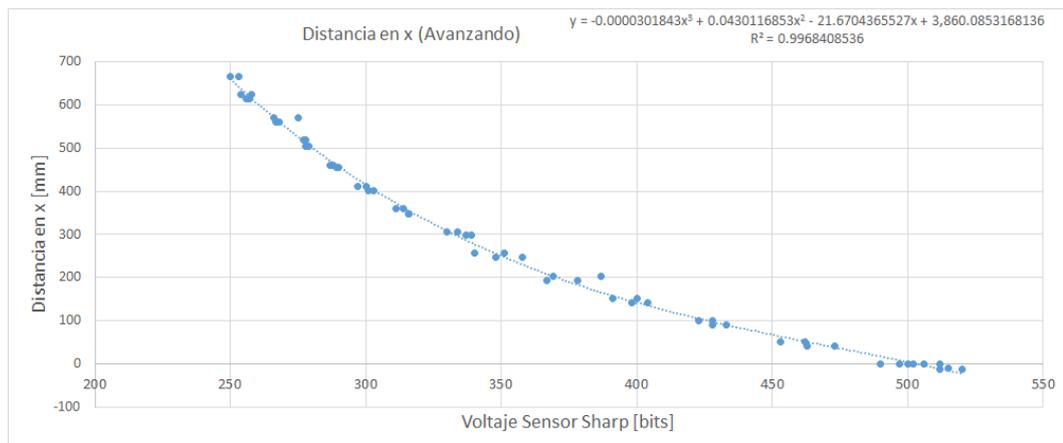
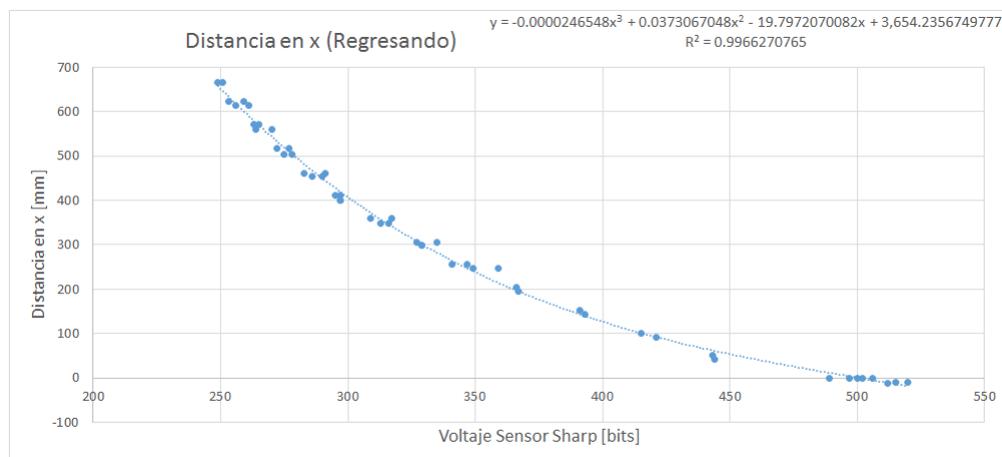


Figura 43. Voltaje Sharp (bits) vs Posición de Placas

Después de interpolar los sensores y determinar los voltajes en cada uno de los puntos de las placas, se encontró una relación de estos voltajes con la posición en x de varias formas. El primer método fue hecho dividiendo los datos entre cuando el xilófono avanzaba y cuando regresaba, y graficar los valores de distancia (desde el origen) en el eje Y vs los valores de Voltaje Sharp (bits) en el eje X como se observa en la Figura 44.



a)



b)

Figura 44. Gráficas y Líneas de Tendencia obtenidas con Excel.
a) Avanzando. b) Regresando.

Una vez graficados los datos, se obtuvo una línea de tendencia para cada caso, mientras avanza (Forward) representado por la Ec. 18, y mientras regresa (Backward) representado por la Ec. 19.

$$y = -0.0000301843x^3 + 0.0430116853x^2 - 21.6704365527x + 3860.0853168136 \quad \text{Ec. 18}$$

$$y = -0.0000246548x^3 + 0.0373067048x^2 - 19.7972070082x + 3654.2356749777 \quad \text{Ec. 19}$$

Tomando en cuenta estas ecuaciones, se obtuvo una tabla de errores que se puede observar en el Apéndice C, lo cual mostró un comportamiento no deseado para el proyecto, ya que la precisión era indispensable. De tal manera, se aplicó otro método para intentar obtener una ecuación más precisa, y a su vez simplificar el procesamiento de información que debiera realizar el microcontrolador, ya que el uso de ecuaciones

de tercer orden requeriría mayor tiempo de procesamiento y recursos, lo cual podría desencadenar en problemas de ejecución del prototipo.

El nuevo método consistió en encontrar una función de linearización que se acople a la salida de voltaje del sensor. Acorde al datasheet del sensor de distancia Sharp, la salida de voltaje del sensor como función del rango de distancia hacia un objeto se aproxima por la Ec. 20, donde V es el Voltaje de Salida, y R es el Rango. Esta ecuación tiene la ventaja de producir una línea recta debido a que la operación de inversión $\frac{1}{x}$ actúa como una función de linearización.

$$V = \frac{1}{R+0.42} \quad \text{Ec. 20}$$

Debido a que la distancia que interesó relacionar en el proyecto no es la distancia del sensor hacia el objeto directamente, la constante de linearización provista por el datasheet no puede usarse, pero se puede calcular. La constante ahora se representará como k como se observa en la Ec. 21. El siguiente paso fue encontrar un valor inicial para k , y con cada una de las distancias a los puntos (R), calcular el valor que tendrían usando la Ec. 21. Una vez que estos valores fueron calculados, era obligatorio graficarlos (Eje Y) vs los valores de voltaje (bits, Eje X) medidos por el microcontrolador. Con la retroalimentación de la gráfica, y desplegando la línea de tendencia y el valor del coeficiente de determinación R^2 , el valor más apropiado para esta constante resultó ser $k = 640$. La gráfica se puede observar en la Figura 45

$$V = \frac{1}{R+k} \quad \text{Ec. 21}$$

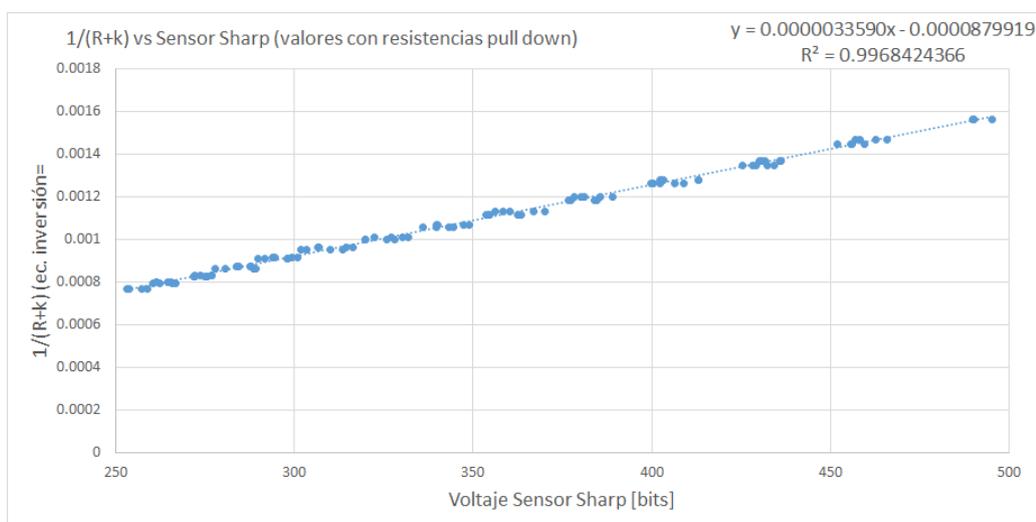


Figura 45. Ecuación de Linearización vs Voltaje (bits) sensor Sharp

El siguiente paso fue encontrar una línea recta que relacione el voltaje a la ecuación de linearización, línea que debió tener como ecuación la forma:

$$y = m \cdot x + b \quad \text{Ec. 22}$$

En esta situación, y es igual a la distancia o rango linearizado, en consecuencia, sustituyendo la función de linearización (Ec. 21) por y y V por x da como resultado la Ec. 23.

$$\frac{1}{R+k} = m \cdot V + b \quad \text{Ec. 23}$$

Reordenando los términos de la ecuación, se representó en la Ec. 24 el Rango (distancia x) como una función del Voltaje (bits):

$$R = \frac{1}{m \cdot V + b} - k \quad \text{Ec. 24}$$

Los valores de los parámetros de la Ec. 22 fueron obtenidos de la línea de tendencia proporcionada por la herramienta de interpolación de MS Excel, consiguiendo la como la ecuación característica para el sistema.

$$R = \frac{1}{3.3590 \times 10^{-6} \cdot V - 8.89919 \times 10^{-5}} - 640$$

$$R = \frac{297708}{V-26} - 640 \text{ [mm]} \quad \text{Ec. 25}$$

Con el uso de este método se pudo obtener mejores resultados, y se puede recomendar utilizarlo para diversas aplicaciones ya que reduce la necesidad de cálculos complejos y el uso de grandes librerías de matemática en programación, evita el uso de gran cantidad de recursos, memoria, tiempo y energía; pero para el proyecto en cuestión, el sensor no fue la mejor opción para el monitoreo de posición debido a la precisión y alta velocidad de respuesta necesaria.

La solución final fue incluir un Encoder Incremental Rotatorio el cual se conectó con el uso de poleas y ligas elásticas al xilófono como se observa en la Figura 46 para así monitorear la posición en tiempo real. La ventaja del uso de este Encoder es que al ser el movimiento transmitido físicamente, lo vuelve más rápido y preciso que el sensor de distancia; pero a su vez requiere una mayor cantidad de entradas en el controlador y el uso de interrupciones en la programación que pudieron ser suplidos gracias a las características físicas del Arduino Micro.

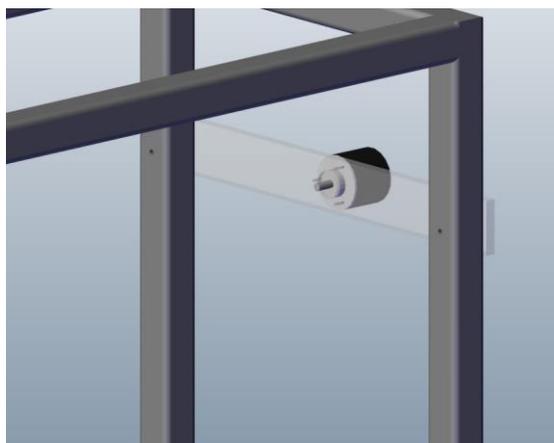


Figura 46. Encoder del xilófono fijo a la estructura

Con el Encoder en posición dentro de la estructura, y luego de haber corroborado el correcto funcionamiento del mismo, su configuración y pines de conexión; la salida de datos de Posición Angular (xilófono) en el tiempo (Figura 47) muestra una curva más precisa y suave, corroborando así la correcta decisión de incluir el Encoder al sistema. Se puede observar que la curva se comporta como se predijo en el Análisis de Movimiento realizado en SolidWorks durante la etapa de diseño. Adicional a la gráfica de Posición Angular se graficó la Velocidad Angular del sistema como se muestra en la Figura 48. A pesar de la baja resolución de la gráfica debido a las mediciones de tiempos por parte del microcontrolador, se puede notar que esta variable se comporta como se esperaba en la simulación de SolidWorks, pero no fue lo suficientemente exacta para utilizarse en los cálculos del sistema.

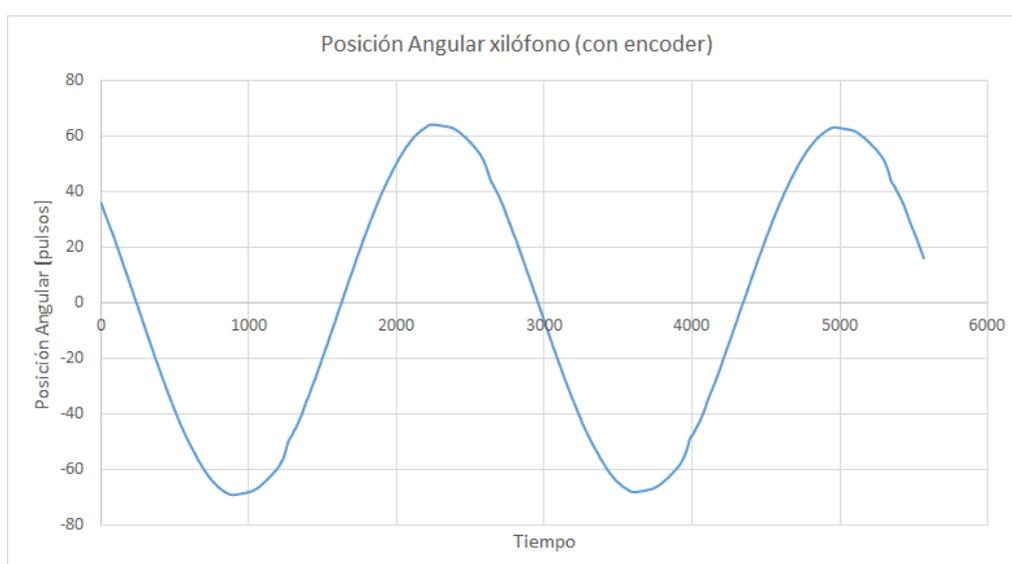


Figura 47. Posición Angular Encoder (Xilófono) vs Tiempo

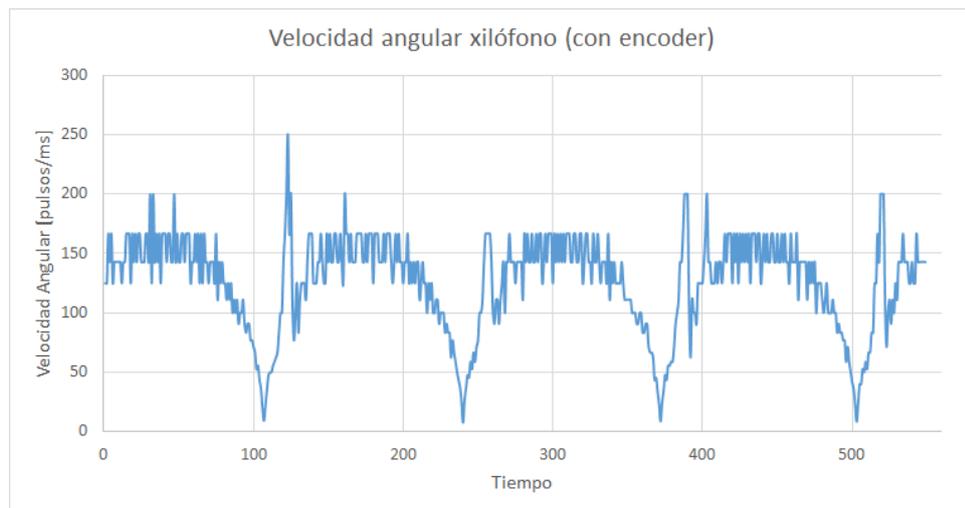


Figura 48. Velocidad Angular Encoder (Xilófono) vs Tiempo

Otra ventaja que se mencionó previamente con respecto al uso del encoder es que permite conocer de manera precisa el sentido de rotación que tiene el movimiento. Esta variable es una de las más importantes para el sistema ya que ayuda a determinar el comportamiento del xilófono en tiempo real, y permite al sistema predecir la posición futura que el mismo tendrá y así saber si ejecutar o no el golpe con el percutor.

El siguiente paso para alcanzar el propósito de la tesis, hacer que el Sistema Mecatrónico-Brazo-Percutor toque un tono repetidamente durante la oscilación libre del xilófono, fue el determinar qué posición angular específica posee cada una de las placas acorde al Encoder. Para lograr este objetivo, el método apropiado fue de sensar al mismo tiempo el Encoder y el sensor IR de las placas y encontrar los puntos medios de cada una de éstas. Una vez que estos puntos fueran encontrados, el sistema sería capaz de saber en qué punto exacto está cada una de las placas, el tiempo que le tomaría a cada una en estar frente al percutor, por ende, el momento en el que el sistema debe enviar la señal al percutor para alcanzar a golpear la placa deseada.

Con los datos obtenidos de 24 diferentes mediciones, los puntos medios de las placas (a excepción de las placas en los extremos del xilófono) fueron estimados como se muestra en el Apéndice D. Estos valores también se despliegan en la Figura 49, donde el Eje Y representa el valor de la Posición Angular (pulsos), y el Eje X representa las placas (1-Placa más Grande (C),...,13-Placa más Pequeña (A)).

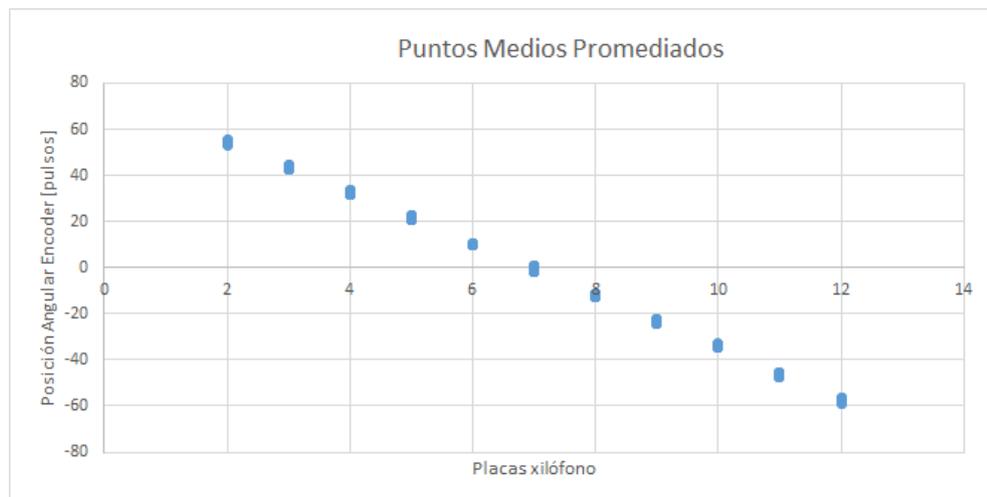


Figura 49. Puntos Medios de las Placas (Pulsos)

Es menester mencionar que la primera y la última placa del xilófono no fueron incluidas en esta gráfica debido a que éstas presentan una limitación física. El percutor puede golpearlas únicamente en un sentido de movimiento a diferencia de las otras placas debido a las poleas que soportan al xilófono, por tal motivo se decidió que la técnica de golpe sería de apuntar al punto de inicio de la tecla en lugar del punto medio únicamente cuando el sentido de movimiento sea el adecuado. Considerando esto, la Tabla 5 muestra las posiciones angulares objetivo para cada placa.

Tabla 5.
Posiciones Angulares Objetivo de las Placas.

Tono Placa	Objetivo Pos Angular (Pulsos)
1 - C	61
2 - D	54
3 - E	43
4 - F	32
5 - G	21
6 - A	10
7 - B	0
8 - C	-12
9 - D	-23
10 - E	-34
11 - F	-46
12 - G	-58
13 - A	-62

5.3. Adaptación al Comportamiento Humano

En esta sección se explicará de manera rápida cómo se adaptó el comportamiento del percutor al comportamiento humano, y los diferentes análisis y procedimientos que se utilizó durante esta etapa. El proceso fue realizado por parte de mi compañero de investigación, Kirolos Abdou, para su proyecto de tesis, proyecto utilizado para el desarrollo de éste. (Abdou, 2016).

5.3.1. Estrategias para adaptar el comportamiento humano

Se utilizó tres técnicas para comparar el comportamiento humano con el comportamiento del percutor:

1. Comparar la fuerza del golpe humano con el del sistema a través de un sensor el cual mida la fuerza de golpe que descarga la baqueta en la placa de madera, lo cual afecta al sonido. Se realizó los siguientes intentos dentro de esta técnica:
 - a. Medir la aceleración de la baqueta a través de un acelerómetro de 3 ejes (MPU 6050), para con esta información obtener el valor de la fuerza que posee la baqueta cuando se golpea. La técnica fue descartada debido a problemas de precisión en el sensor debido a la velocidad de golpe en la etapa inicial de prueba.
 - b. Se encontró una idea más rápida y fácil, crear una celda de carga con espuma de polietileno. Al aplicar una fuerza en la espuma, las partículas de carbono de la misma se comprimen, de manera que su conductividad aumenta y su resistividad disminuye. Lastimosamente este método tampoco tuvo gran éxito ya que la resistencia de la espuma variaba en grandes medidas, sin poder obtener valores fijos.
2. Variar la frecuencia o alguno de los factores dependientes del tiempo del sistema de inercia torsional elástico amortiguado. Después de probar esta idea se pudo notar que al cambiar cualquiera de estos factores, el comportamiento completo del sistema se veía afectado sustancialmente, motivo por el cual se abandonó esta técnica.
3. Comparación de sonidos producidos por el sistema percutor con el producido por el humano. Para esta técnica, se utilizó un micrófono “mPod

sin⁷” con el cual se grabó cada uno de los golpes utilizando fft en scilab, para obtener la amplitud de la frecuencia deseada.

5.3.2. Procesamiento de señal de sonido

Se tomó muestras de diferentes intensidades de golpe, con variaciones de 50 pulsos en un encoder de 1000 pulsos/rev teniendo así variaciones de 4.5°. Cada muestra fue posteriormente cargada en Scilab y analizada en el dominio de la frecuencia, utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT), y filtrando el sonido para obtener los valores máximos de amplitud de cada una. Este método no funcionó completamente ya que ciertas frecuencias filtradas en los golpes producían valores erróneos en el análisis.

Posteriormente se utilizó el software *Loudness Toolbox* provisto por la empresa GENESIS, y desarrollado para Matlab, herramienta que calcula las amplitudes de sonidos de una manera más exacta y favorable. La ventaja de este programa es que posee una función especial que calcula la amplitud del sonido de sonidos tipo impulso acorde al modelo de Boulett, el cual es similar al método de *hit-release* utilizado en este proyecto. Finalmente esta herramienta arrojó datos veraces y coherentes, con los cuales se pudo programar el sistema percutor para asemejarse a los golpes del ser humano.

5.4. Interacción del Usuario con el Sistema

La necesidad de una Interfaz Humano Máquina que sea simple y fácil de utilizar siempre ha sido una parte importante de la ingeniería. Es importante elaborar la interfaz lo más simple y entendible posible ya que ésta determinará el nivel de conocimiento que el operario necesitará tener para utilizarla. Antes de la aparición de componentes electrónicos y el desarrollo de software, redes y nuevas tecnologías, las interfaces solían ser grandes, incómodas, e implicaban en muchos casos un riesgo para el operario debido a conexiones mecánicas y lazos con la maquinaria. Actualmente, con el desarrollo de innumerables cantidades de software dedicados a la programación de interfaces, han aparecido nuevos tipos de interacciones con los sistemas, y con esto, nuevas ideas y aplicaciones para los mismos.

5.4.1. Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)

El primer paso para esta parte del proyecto fue el realizar investigación de fondo, analizar opciones de software para elaborar interfaces, probarlas y determinar la mejor opción u opciones. Después de una investigación inicial, y en base a las competencias aprendidas por parte del autor, se decidió probar los siguientes softwares de programación e intentar diseñar una interfaz base: Visual C++, WinForms, MatLab GUIDE, y Visual C#. Diferentes ejemplos de interfaces fueron desarrolladas para probar las capacidades y herramientas de cada software seleccionado. Gracias a las diferentes pruebas y ejemplos realizados, Visual C# fue seleccionado para realizar pruebas más profundas debido a su mejor desenvolvimiento en comparación con las otras 3 opciones.

El Apéndice E presenta el desarrollo de la interfaz en Visual C#, las pantallas que se diseñaron, los códigos escritos para lograr la Comunicación Serial entre la interfaz y el microcontrolador para enviar y recibir información, etc. Es importante mencionar que la interfaz fue desarrollada y programada en Visual Studio 2010 y que se encuentra anexada en el link web escrito en el mismo Apéndice E.

Después de analizar con los tutores sobre los beneficios e inconvenientes que traería esta interfaz a futuros proyectos, la decisión de detener el desarrollo de la misma fue tomada ya que el programa tendría una interfaz de nivel medio con el sistema, y podría haber inconvenientes de incompatibilidad de softwares, drivers, y demás debido a las licencias y requisitos que ésta pueda conllevar, limitando así el desarrollo de futuras ideas para este prototipo. Finalmente se diseñó una segunda interfaz de usuario más sencilla, la cual a través de comunicación serial interactúa con el prototipo, para enviar y recibir información. Las gráficas de estas interfaces se muestran en la sección de “Resultados de Interacción Humano – Máquina” del siguiente capítulo.

5.4.2. Interacción con el Usuario por Comunicación Serial

Posterior a decidir la suspensión del desarrollo de la Interfaz en Visual C# en una etapa media, la nueva idea a alcanzar fue el elaborar una Lista de Comandos que puedan ser enviados a través de Comunicación Serial e interactuar con el sistema, permitiendo así el uso de una amplia cantidad de software que desempeñen estas

funcionalidades, y cuyo único requisito sería tener Comunicación Serial con el Prototipo. Los comandos fueron clasificados en 2 grupos:

- *Getters*, los cuales permiten al usuario evaluar el estado de los diferentes sensores del sistema tanto como datos en bruto como procesados.
- *Setters*, los cuales realizan una ejecución o cambio en el sistema.

La lista completa de comandos puede observarse a continuación en la Tabla 6 y Tabla 7 en las cuales se explica lo que cada comando realiza, la sintaxis exacta que debe usarse en el puerto serial, y la respuesta que enviará el sistema a cada comando.

Tabla 6.
Getters.

Comando	Funcionalidad
getRenm	Obtiene el valor en bruto del Encoder del Percutor en pulsos, donde una vuelta completa (<i>360 deg</i>) es igual a 2000 pulsos.
getRshr	Obtiene el valor en bruto del sensor de distancia Sharp de 0 a 1023 bits.
getRirs	Obtiene el valor en bruto del sensor Infrarrojo de 0 a 1023 bits.
getRenx	Obtiene el valor en bruto del Encoder del Xilófono en pulsos, donde una vuelta completa (<i>360 deg</i>) equivale a 2000 pulsos.
getRirm	Obtiene el valor en bruto del sensor Infrarrojo del percutor, de 0 a 1023 bits.
getRamp	Obtiene el valor de la amplitud actual de la oscilación en pulsos.
getPton	Obtiene la placa que se encuentra actualmente frente al percutor.
getPenm	Obtiene el valor del Encoder del percutor en grados.
getPxap	Obtiene el valor de la posición actual en x en centímetros.
getPshr	Obtiene el valor del voltaje del sensor de distancia Sharp.
getPirs	Obtiene 0 si hay una placa frente al percutor, o 1 si hay un vacío frente al percutor en ese momento.
getPenx	Obtiene el valor del Encoder del xilófono en grados.
getPirm	Obtiene 0 si el percutor no se encuentra en la posición <i>home</i> , o 1 si sí se encuentra.
getPamp	Obtiene el valor de la amplitud actual de la oscilación en grados.

Tabla 7.
Setters y comandos adicionales

Comando	Funcionalidad
setmal2a:val	Cambia el punto de equilibrio del percutor a <i>val</i> . <i>val</i> debe estar en grados (0 a 360).
setmal2p:val	Cambia el punto de equilibrio del percutor a <i>val</i> . <i>val</i> debe estar en pulsos (0 a 2000).
sethitpf:val	Hace que el sistema toque la placa número <i>val</i> cada periodo mientras el xilófono avanza. <i>val</i> debe ser un número entre 0 (C) y 13 (A).
sethitpb:val	Hace que el sistema toque la placa número <i>val</i> cada periodo mientras el xilófono regresa. <i>val</i> debe ser un número entre 0 (C) y 13 (A).
sethitsd:val	Determina la fuerza de golpe del percutor. <i>val</i> debe ser un número entre 1 y 10, siendo 10 el golpe más fuerte.
hom	Hace que el percutor regrese a su posición <i>home</i> .
hit	Hace que el percutor golpee en el momento que el comando es enviado.
stp	Pone al sistema en modo de <i>Stand-by</i> , deteniendo cualquier otra rutina en ejecución.
ex1	Ejecuta la composición " <i>Ejemplo No. 1</i> " programado en el sistema como muestra de las capacidades del sistema.

5.5. Predicción del Movimiento del Sistema y Ejecución de Golpe

Para alcanzar un Sistema Mecatrónico Controlado, se debió desarrollar un programa el cual sense el estado actual del sistema, y mediante la información que almacena se pueda adelantar al mismo y usar el percutor para golpear el tono deseado. El proceso para realizar esto inició determinando el algoritmo que el sistema debió utilizar para determinar el punto exacto en el cual enviar la señal de golpe al percutor. Mediante la medición de los diferentes intervalos de tiempo que inciden en este proceso con el microcontrolador, se determinó que el tiempo necesario que toma al percutor golpear la placa desde que se envía el comando es de 225 *ms* aproximadamente.

La segunda información que ayudó a realizar la predicción del comportamiento del sistema fue la Gráfica de la Posición Angular del Encoder del Xilófono. En esta gráfica se puede observar una región de la onda sinusoidal en la cual la curva se puede tratar como una línea recta. La Figura 50 muestra este comportamiento característico analizando un semiperiodo de la gráfica experimental obtenida en la Figura 47, y tomando en cuenta esta particularidad, esa zona lineal puede considerarse con una velocidad constante, la cual puede utilizarse para adelantarse al sistema y predecir así el momento en que cada placa va a estar en posición de golpe.

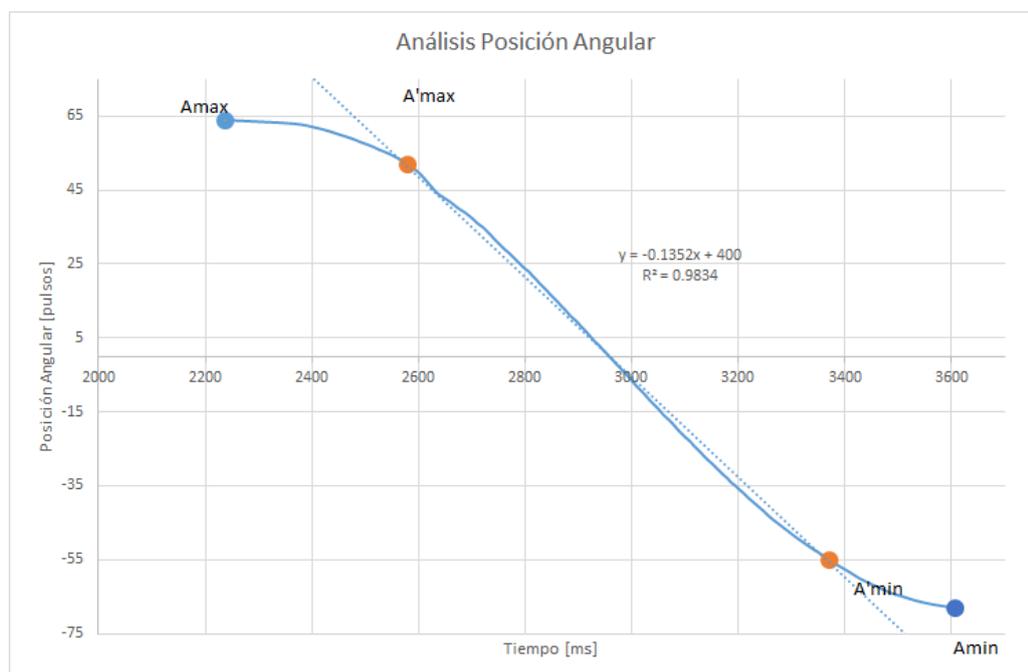


Figura 50. Análisis de Datos de Gráfica de Posición Angular

Con el fin de obtener este algoritmo final, se definieron los siguientes puntos:

- *Amax*: Punto máximo de la curva, presentado como (*Amax*; *Tmax*).
- *Amin*: Punto mínimo de la curva, presentado como (*Amin*; *Tmin*).
- *A'max*: Punto máximo de la zona lineal dentro de la curva, presentado como (*A'max*; *T'max*).
- *A'min*: Punto mínimo de la zona lineal dentro de la curva, presentado como (*A'min*; *T'min*).

Estos puntos clave con sus respectivas coordenadas fueron utilizados en el análisis que viene a continuación. Como preámbulo, la Tabla 8 presenta a detalle la información obtenida del análisis del Desplazamiento Angular, donde intervienen.

Tabla 8.

Análisis de Datos para Desplazamiento Angular

Amax	64	Tmax	2238
Amin	-67	Tmin	3721
A'max	52	T'max	2580
A'min	-55	T'min	3371
Dist	0.09	Dist'	0.14
Amp	131	ΔTime	1483
Amp'	107	ΔTime'	791
% Amp'	81.68	% ΔTime'	53.34

Donde:

- $Dist$ es la distancia entre A_{max} y A_{min} .
- $Dist'$ es la distancia entre A'_{max} y A'_{min} .
- Amp es la Amplitud total de la curva.
- Amp' es la Amplitud total de la zona lineal de la curva.
- $\Delta Time$ es la cantidad de milisegundos que hay entre A_{max} y A_{min} .
- $\Delta Time'$ es la cantidad de milisegundos que hay entre A'_{max} y A'_{min} .
- $\%Amp'$ es el porcentaje que tiene Amp' con respecto a Amp .
- $\% \Delta Time'$ es el porcentaje que tiene $\Delta Time'$ con respecto a $\Delta Time$.

Una vez obtenida toda la información necesaria, el algoritmo debe realizar los siguientes pasos:

1. Sensar el sentido de movimiento del sistema.
2. Cuando detecte que el sistema ha alcanzado un punto máximo o mínimo de la amplitud de cada semiperiodo, actualizar los valores de A_{max} , A_{min} , T_{max} y T_{min} .
3. Finalmente con los valores actualizados, calcular la pendiente de la curva usando la Ec. 26, y multiplicar este valor por el tiempo que el percutor necesita la señal previa de golpe.

$$m = \frac{0.85 \cdot (A_{max} - A_{min})}{0.5 \cdot (T_{max} - T_{min})} \quad \text{Ec. 26}$$

Los valores que multiplican el numerador y denominador de la Ec. 26 son aproximaciones a $\%Amp'$ y $\%Time'$ obtenidas después de pruebas de funcionamiento, y obteniendo los valores que mejor se adaptan al movimiento real en el cual intervienen factores externos imposibles de calcular teóricamente. Como se puede observar, la diferencia entre los valores finales no difiere en gran cantidad con los originales que se usó como base. Finalmente este algoritmo funcional fue implementado, probado en conjunto con las demás funciones, y aprobado para su adición al Código Final. Una vez que el algoritmo fue añadido, se ejecutó las pruebas finales, se determinó los mejores puntos objetivos de las placas, las placas que no podrían tocarse, la cantidad de placas que pueden tocarse por periodo y semiperiodo, y las sugerencias para futuros trabajos e investigaciones con este proyecto.

CAPÍTULO VI.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Este capítulo resume de manera clara y concisa los resultados obtenidos una vez finalizadas las actividades en cada uno de los capítulos previos. Se ha clasificado los resultados entre: Mecánicos (diseño, manufactura, funcionalidad, comportamiento), Interacción Humano – Máquina (interfaces, comandos, programas), Sistema Conjunto (resultados finales, ejecución completa, alcance final del proyecto), y Complicaciones Confrontadas (problemas e inconvenientes que se presentaron, forma de superarlos, límites del sistema). Posterior a estos resultados se presenta las Conclusiones (análisis final del proyecto), y los Trabajos a Futuro (ideas y recomendaciones para el sistema en proyectos a futuro).

6.1. Resultados Mecánicos

El diseño realizado para el prototipo pudo satisfacer los requerimientos planteados, alcanzando un movimiento oscilante tipo péndulo por parte del xilófono, sin colisiones con la estructura, y manteniéndose dentro del rango angular solicitado como se observa en la Figura 51 y Figura 52.

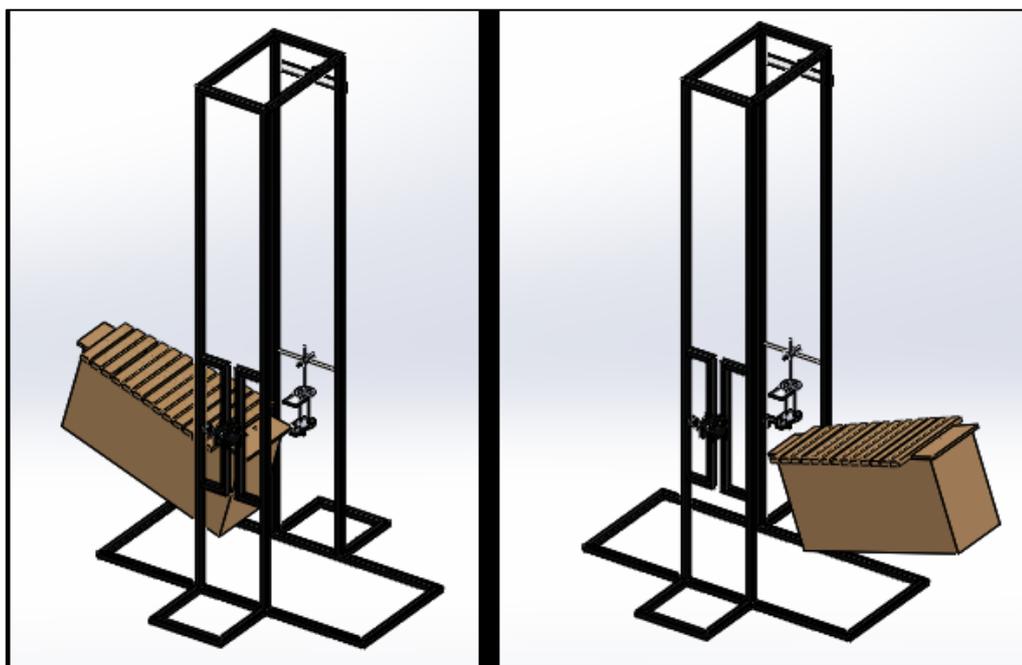


Figura 51. Movimiento oscilante en Simulación SolidWorks

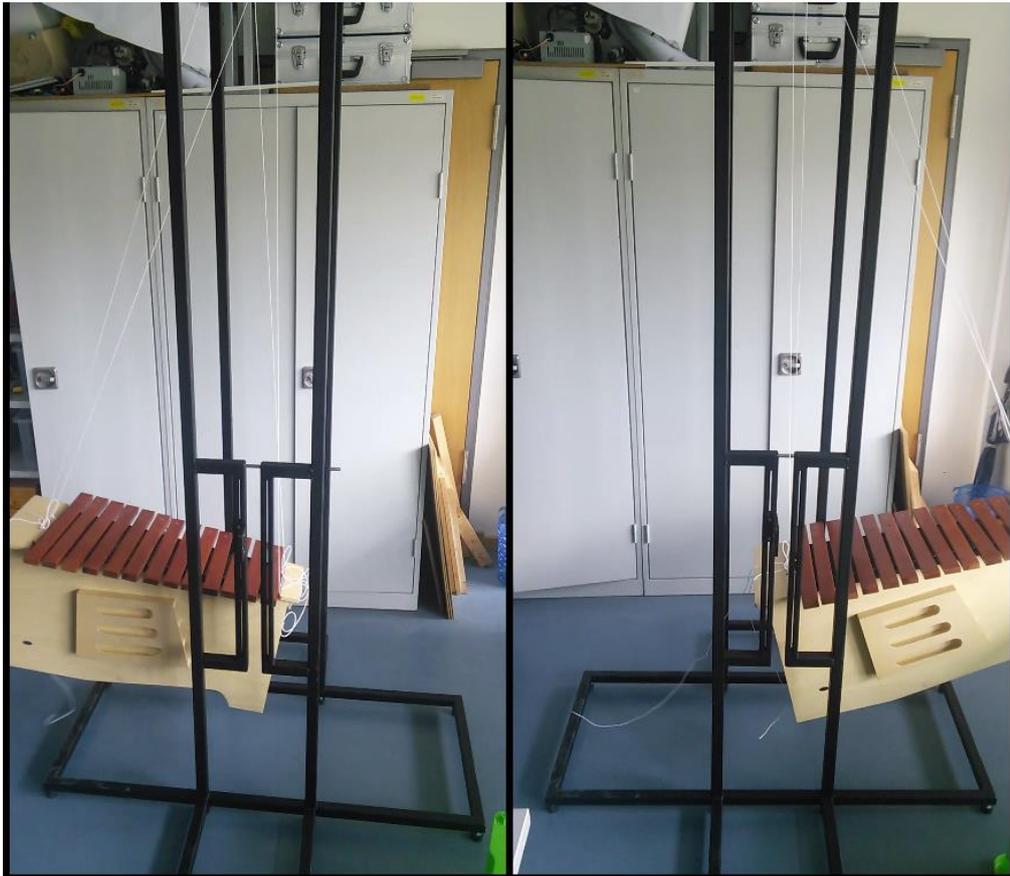


Figura 52. Movimiento oscilante Estructura Real.

Gracias a estos resultados se puede ratificar la importancia que tiene el diseño mecánico en máquinas y prototipos como éste. Cabe recalcar que una gran ventaja que el Diseño Asistido por Computador (CAD) brinda es la facilidad de cambios y correcciones durante el inicio del proyecto, y la factibilidad de probar ideas sin tener que fabricarlas, ya que permite realizar experimentos y simulaciones que pronostiquen de manera muy cercana a la realidad el comportamiento que tendrá, obteniendo al final un mejor diseño y prototipo. Acentuando lo ya mencionado, este proyecto no es una excepción de los beneficios que el Diseño por Computadora trae, beneficios que permiten al proyecto funcionar perfectamente.

6.2. Resultados de Interacción Humano – Máquina

La interacción entre el sistema y el usuario fue conseguido con muy buenos resultados. Los diferentes comandos que fueron desarrollados (ver sección 5.4.2) fueron probados y optimizados para alcanzar el mejor desempeño posible en el sistema, logrando con ello interactuar con una gran cantidad de diversos dispositivos,

elementos y hardware en general, los cuales puedan realizar comunicación Serial o acoplarse a un sistema más complejo que pueda hacerlo. Cada comando se refiere a una función específica dentro del programa, de manera que, si se requiriese, las funciones pueden estar sujetas a modificaciones para futuras investigaciones sin afectar a todas.

Como parte de los resultados se puede indicar que la cantidad de funciones generadas es satisfactoria para obtener toda la información posible del sistema e interactuar con éste. Todos estos comandos y funciones pueden ser llamados desde cualquier Dispositivo Serial, únicamente se debe enviar el comando como un *String* al prototipo. Adicionalmente, se desarrolló una interfaz ejemplo en el software *Processing3* la cual se muestra en el Apéndice F y en la Figura 53.

Esta interfaz es un ejemplo de la versatilidad que posee el prototipo para funcionar con diversos softwares, además de que ratifica el funcionamiento de los comandos, y puede tomarse como referencia para el desarrollo de nuevos proyectos. De igual manera, la interfaz programada en Visual C# que se encuentra disponible en el link web del proyecto puede utilizarse para continuar su desarrollo, o como base para otros trabajos.

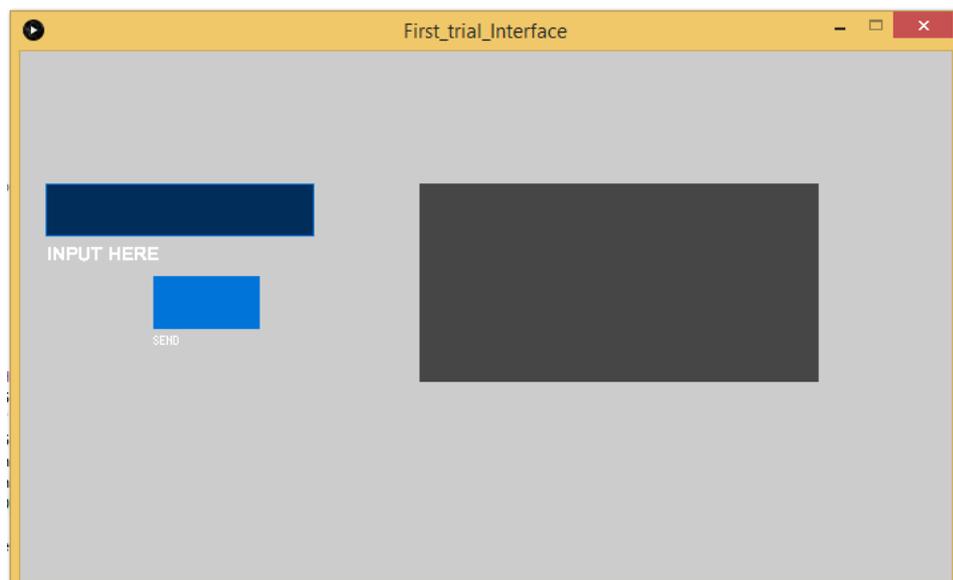


Figura 53. Interfaz diseñada en *Processing3*.

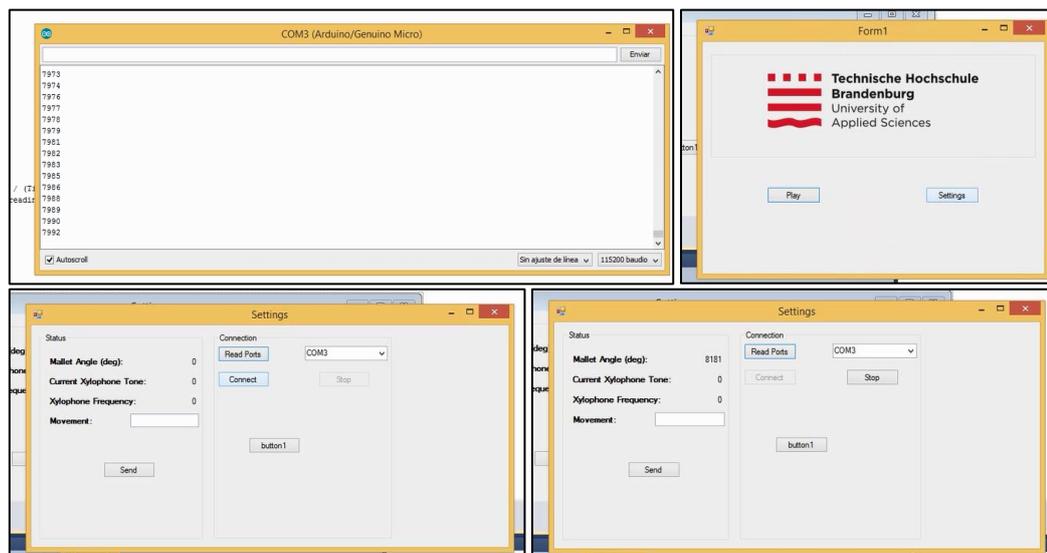


Figura 54. Uso de Interfaz desarrollada en Visual C#

6.3. Resultados del Sistema Conjunto

Al hablar de los resultados del sistema, el principal objetivo de la propuesta de tesis, que fue “Tocar repetidamente un tono en una marimba/xilófono”, fue alcanzado logrando no solo tocar el mismo tono repetidamente, sino el ser posible programar y tocar una secuencia de tonos diversos. El principal obstáculo para el sistema fue el de realizar complejas interacciones entre diferentes sensores y actuadores con el uso de un solo microcontrolador el cual es usado generalmente para aplicaciones más simples, sin caer en fallas de funcionalidad o desempeño, alcanzando la placa deseada sin ningún problema.

Se hizo pruebas intentando tocar dos diferentes placas en el mismo semiperiodo, objetivo que se logró alcanzar exitosamente durante un determinado tiempo. Debido al sobrepulso que posee el percutor con su comportamiento, y a problemas de sobrecalentamiento en el Puente-H del motor debido al constante cambio de sentido de giro, el sistema fallaba una o dos de las placas objetivo y el Puente-H dejaba de funcionar súbitamente. Este fenómeno se volvió a suscitar cuando se hicieron pruebas intentando tocar una placa cada semiperiodo de oscilación. Debido a esas razones, la decisión final fue que el sistema toque únicamente una placa en cada periodo de oscilación, golpe que puede hacerse tanto en el avance como en el regreso del xilófono. La evidencia de las pruebas realizadas y del fenómeno ocurrido se puede observar en el mismo link web provisto en este proyecto.

Finalmente el sistema fue capaz de ejecutar todos los comandos programados mediante interacción con Comunicación Serial de manera satisfactoria, con lo cual se puede indicar que este proyecto fue culminado con éxito. El código final se encuentra desplegado en el Apéndice G. La Figura 55 presenta un conjunto de imágenes durante la ejecución del sistema musical.

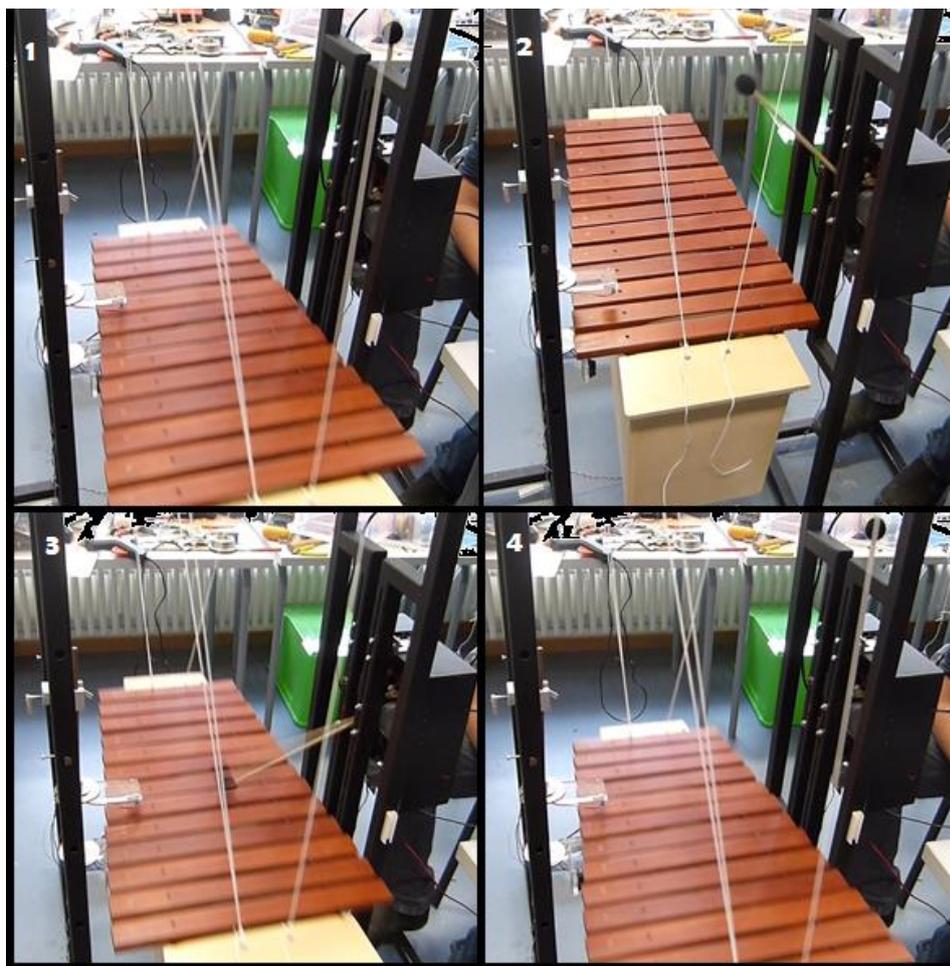


Figura 55. Sistema en ejecución tocando el xilófono.

6.4. Dificultades Confrontadas

Durante el desarrollo de este proyecto, algunos obstáculos se presentaron poco a poco, de los cuales algunos fueron difíciles de superar, tomando tiempo extra para pensar y analizar soluciones, pero al final se los supo superar con los recursos disponibles, salvo aquellos que debido a altísimos costos y limitaciones de mayor nivel no pudieron solucionarse al 100% y se los pasó a considerar como limitantes del sistema.

El obstáculo principal enfrentado en el desarrollo de este proyecto viene a ser el monitoreo en tiempo real de la posición del xilófono. La geometría del xilófono desde una vista superior puede relacionarse con un trapecioide isósceles, y el movimiento oscilante establecido como un péndulo hizo del monitoreo un desafío. Como se menciona en los capítulos anteriores, la primera idea fue el utilizar un sensor de distancia en combinación con un sensor infrarrojo para así medir la variación de distancia del lado del xilófono mientras oscila e interpolar estas mediciones con la información obtenida del sensor infrarrojo.

Inicialmente este método se mostró como idóneo para cumplir esta meta, no obstante a medida que se fue construyendo la estructura de sensores, inconvenientes no considerados fueron tomando forma y debió superárselos. Por ejemplo, la diferencia de longitud de las placas y la variación de altura que generaban debido al movimiento oscilante provocó que la distancia de separación entre el emisor y receptor infrarrojo sea mayor a la considerada en los cálculos iniciales, requiriendo así una amplificación mayor a la estimada, además que las platinas que soportan a estos sensores debieron modificarse físicamente para evitar colisiones con el xilófono durante el movimiento del mismo y al mismo tiempo ubicar a los sensores en puntos clave para así no saltar ninguna placa ni vacío, elementos clave del monitoreo de posición del xilófono.

La solución concluyó con una forma geométrica muy particular para la platina inferior de la estructura de sensores, la cual no afectó al sistema principal y aportó al sistema a lograr su objetivo. Una vez afrontado este inconveniente, el sensor de distancia Sharp no trabajó como se esperaba, ya que los datos obtenidos presentaban variaciones no deseadas debido a la resolución y velocidad de respuesta. Se intentó solucionar a través de filtros y técnicas que limpiasen y mejorasen la señal y así obtener mejores valores, pero siempre existe un límite y para el presente proyecto ese límite no era suficientemente bueno y se debió buscar otra alternativa de solución.

La alternativa y solución final para resolver este problema fue añadir el Encoder Incremental al xilófono, el cual se desempeñó de una manera más precisa, alcanzando así a cumplir los objetivos del proyecto. Cabe indicar que el sistema de sensores tanto infrarrojo como de distancia se mantuvieron como parte del sistema, conectados y activos como instrumentos de sensado para futuros trabajos y proyectos que pudiesen requerirlos.

El segundo problema principal que se suscitó fue el hecho de que en ciertos momentos, el Puente-H presentaba un comportamiento inusual y erróneo en el cual dejaba de funcionar durante la ejecución normal del sistema. Se reemplazó el Puente-H por otro del mismo modelo, pero el problema se continuó suscitando. Después de diversas pruebas y mediciones se determinó que el *Mosfet* del Puente-H se sobrecalentaba y dejaba de funcionar hasta volver a una temperatura adecuada. Se consideró diversas ideas como amortiguamiento del percutor para el sobreimpulso, reducir la complejidad del sistema, cambios de código, entre otras; las cuales fueron puestas a prueba para eliminar esta situación.

Para el final del proyecto, el problema se solucionó logrando ejecutar un tono por periodo, y se sugirió el cambio del Puente-H actual por uno más robusto y con mejores características de desempeño, para poder tocar sin inconveniente hasta dos tonos por semiperiodo, actividad que se probó mediante código y funcionó hasta que se presentaba el problema del Puente-H. También se sugirió el probar otro algoritmo de control del percutor que no tenga tanto sobreimpulso como el actual (péndulo torsional), movimientos que parecen ser causantes del problema.

6.5. Conclusiones

Se diseñó y construyó un Sistema Mecatrónico Brazo – Percutor, capaz de ejecutar una serie de notas musicales de manera autónoma, para la Universidad de Ciencias Aplicadas de Brandemburgo (TH-Brandenburg).

El Sistema alcanza a tocar una nota por periodo de oscilación, nota que puede variar en tonalidad y fuerza de golpe, logrando imitar un golpe realizado por el ser humano gracias a pruebas y análisis realizados a ambos movimientos y golpes.

Se definió y programó el algoritmo de control para el sistema percutor y el sistema de predicción de posición con éxito, logrando que el sistema los ejecute en conjunto y en tiempo real.

Se superó cada uno de los problemas que surgieron durante la elaboración del proyecto, y se presentó tentativas de solución para aquellos problemas más grandes que no pudieron solucionarse por completo debido al costo monetario de la solución o por requerir una cantidad de tiempo mayor al disponible.

6.6. Trabajos a Futuro

Se consideraron y discutieron con los tutores diversas ideas para trabajos e investigaciones futuras, concluyendo que puede abordarse dos diferentes rumbos. Podría investigarse hacia el área de desarrollo interno del sistema, mediante el diseño de interfaces más grandes y complejas, que puedan facilitar el uso para el público en general. En esta área se puede probar la gran diversidad que existe en programas de diseño de Interfaces Gráficas, ya que el único requisito es que realice comunicación serial (función incorporada en casi todos los programas). También se puede profundizar en el desarrollo de actividades más complejas como composición musical autónoma o semiautónoma, llegando a adentrarse mucho más en la convergencia de las áreas de automatización y música. Se puede investigar el uso de técnicas y ecuaciones de composición musical, las cuales han sido desarrolladas por músicos y matemáticos, y aplicarlas al proyecto para crear nuevas obras y alcances.

De igual manera se podría continuar en torno al área de desarrollo físico o estructural del sistema, añadiendo nuevos sensores y efectores finales para volverlo así más complejo. Aquí se puede inclusive hablar de sensores complejos que interactúen con los actuales, un ejemplo es el Kinect de Microsoft, los cuales pueden producir una nueva dinámica en el sistema, generando nuevas posibles aplicaciones que puedan desencadenar en el desarrollo de un nuevo instrumento musical automatizado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdou, K. S. (Julio de 2016). Concept and Prototype of a Mechatronical Arm-Mallet-System. Brandenburg an der Havel, Alemania.
- Agnew, S. (Noviembre de 2011). Musical Composition: Man Or Machine? *Rutgers Dialogues Journal*.
- Ali, M. (18 de Mayo de 2001). *African Polyrythmics and Steve Reich's Drumming: Separate but Related Worlds*. Obtenido de Ali Momeni: http://alimomeni.net/files/documents/momeni_Reich-African-Polyrhythms.pdf
- Arduino. (Noviembre de 2016). *What is Arduino?* Obtenido de Arduino Genuino: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Dassault Systèmes SolidWorks Corp. (28 de Noviembre de 2016). *SolidWorks*. Obtenido de Dassault Systemes: http://www.solidworks.es/sw/183_ESN_HTML.htm
- Enciclopedia Encarta. (2008). *Instrumentos Automáticos*. Obtenido de Enciclopedia Microsoft® Encarta® Online: <http://es.encarta.msn.com>
- Heath, J., & Abrams, A. (Enero de 2014). *Automated Musical Instruments*. Obtenido de Dark Roasted Blend: <http://www.darkroastedblend.com/2014/01/automated-musical-instruments.html>
- IFM. (Noviembre de 2016). *Encoders - Descripción del sistema*. Obtenido de IFM: http://www.ifm.com/ifmmx/web/pinfo015_010_040.htm
- Jiménez, J. L. (Noviembre de 2016). *Detector de Proximidad por Infrarrojo*. Obtenido de Unicrom: <http://unicrom.com/detector-de-proximidad-por-infrarrojo/>
- Microsoft Corporation. (Noviembre de 2016). *Introducción a Visual Studio*. Obtenido de Microsoft Developer Network: <https://msdn.microsoft.com/es-es/library/fx6bk1f4%28v=vs.100%29.aspx?f=255&MSPPErr=-2147217396>
- Moldaver, E., Fernández, E., & Merlino, H. (2014). Composición Musical a Través del Uso de Algoritmos Genéticos. *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software*, págs. 149-156.

- National Instruments. (2 de Enero de 2004). *Comunicación Serial: Conceptos Generales*. Obtenido de National Instruments: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/039001258CEF8FB686256E0F005888D1>
- Rosales, J. P. (Agosto de 2016). Concept and Prototype of a Free-Swinging Xylophone-Musical-System played by a Mechatronical Arm-Mallet-System. Brandenburg an der Havel, Alemania.
- Schulz, C. (Abril de 2016). *How Newton's Cradels Work*. Obtenido de Science, how stuff works: <http://science.howstuffworks.com/innovation/inventions/newtons-cradle.htm>
- Toledano, B. (26 de Septiembre de 2016). *Una inteligencia artificial escribe una canción inspirada en The Beatles*. Obtenido de El Mundo: <http://www.elmundo.es/tecnologia/2016/09/26/57e93953e5fdea42278b4658.html>
- Wiki de Robótica. (Noviembre de 2016). *Sensor de infrarrojos*. Obtenido de Wiki de Robótica: <http://wiki.robotica.webs.upv.es/wiki-de-robotica/sensores/sensores-proximidad/sensor-infrarrojos/>
- Wikipedia. (Noviembre de 2016). *Motor de corriente continua*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_corriente_continua
- Wikipedia. (Abril de 2016). *Pendulum*. Obtenido de Wikipedia, The Free Encyclopedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pendulum>
- Wynn, J. (2010). Motion of a Pendulum. *Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two*, 3, 3. doi:<http://dx.doi.org/10.5038/2326-3652.3.1.21>

ANEXOS