

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN



Avances de Tesis 1
Dinámica Caótica de un Péndulo-Robot

Alumno: Jorge Arturo Mijares Tobias

Asesor: Dr. Fernando Reyes Cortés

Asesor: Dr. Sergio Vergara Limón

22 de abril de 2010

Capítulo 4

Diseño, construcción y puesta en marcha del péndulo-robot

La plataforma experimental del péndulo-robot será una herramienta para la investigación científica y tecnológica, que permitirá experimentar con los diversos controladores y en particular para este trabajo exhibir el fenómeno de caos de forma real y no solo en simulación. Para la realización de esta planta se utilizó el software de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por las siglas en inglés) que también cuenta con Ingeniería Asistida por Computadora (CAE, por las siglas en inglés) llamado SolidWorks[©]. La plataforma se diseñó a partir de los componentes con los que se cuenta actualmente en el Laboratorio de Robótica y Automatización, estos componentes son:

- Motor de Transmisión Directa modelo: DM1015B.
- Driver DM-Series

4.1. Diseño del Péndulo

El diseño del péndulo, que es la parte principal del sistema, fue basado en diseños de péndulos ya existentes en el Laboratorio de Robótica y Automatización los cuales se encuentran montados en el mismo modelo de motor. Para ver el desempeño de este diseño se realizó el modelo en solidworks[©] y se sometió a un estudio de esfuerzos. El diseño del péndulo es mostrado en la siguiente figura:

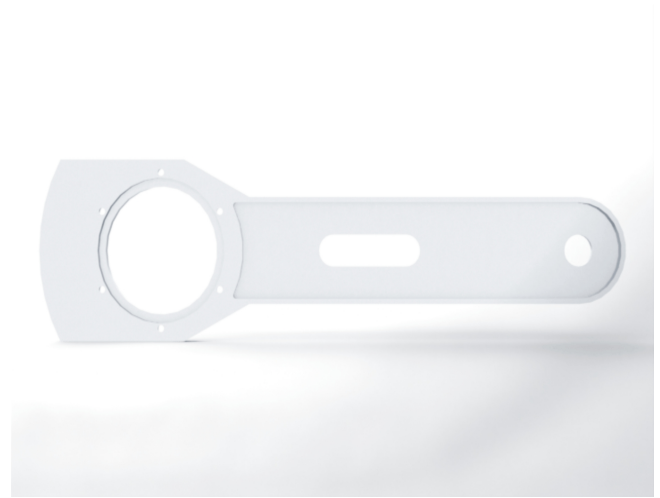
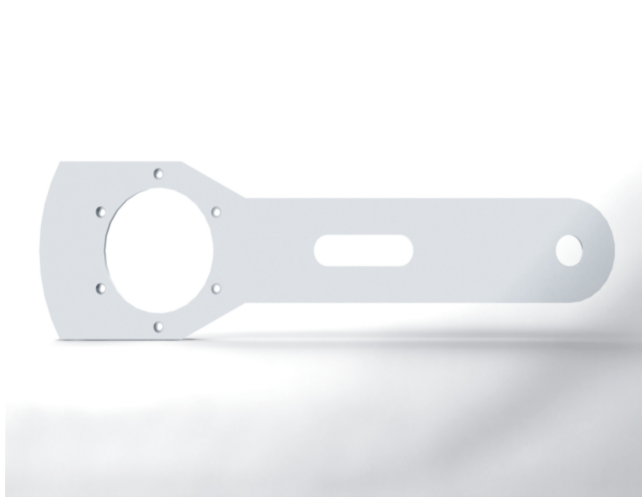


Figura 4.1: Vista frontal del diseño del péndulo. Figura 4.2: Vista posterior del diseño del péndulo.

Los estudios de fuerza utilizando software nos ayudan a crear diseños más eficientes y de manera más rápida ya que no es necesario fabricarlo para después realizar las pruebas en él, sino que solamente es necesario modificarlo digitalmente y realizar un estudio utilizando mallas, anteriormente estos estudios se realizaban seleccionando un punto de la pieza y ahí se realizaba el análisis por elemento finito, pero eso nos limitaba a desconocer el esfuerzo que se presentaba en todo el resto de la pieza, el análisis de malla por medio de computadoras nos permite visualizar el esfuerzo en toda la pieza y de esta manera si desconocemos algún defecto en el diseño podremos observarlo fácilmente.

En este estudio se utilizó el análisis por Von-Mises que es el recomendado para materiales dúctiles como lo es el aluminio, la aleación de aluminio es 6061 ya que esta es la que nos proporciona el proveedor.

La carga fue basada en los datos del motor que se va a utilizar, ya que la carga máxima del motor es de 15Nm el par aplicado tiene su equivalencia en la distancia del efector final del péndulo que es de $.45\text{m}$ por lo tanto la carga aplicada es de 33.33N . También se consideró la fuerza de gravedad y la posición en la cual el péndulo se encuentra con la mayor energía potencial. La sujeción se ubicó en el lugar donde se va a ensamblar el motor al péndulo.

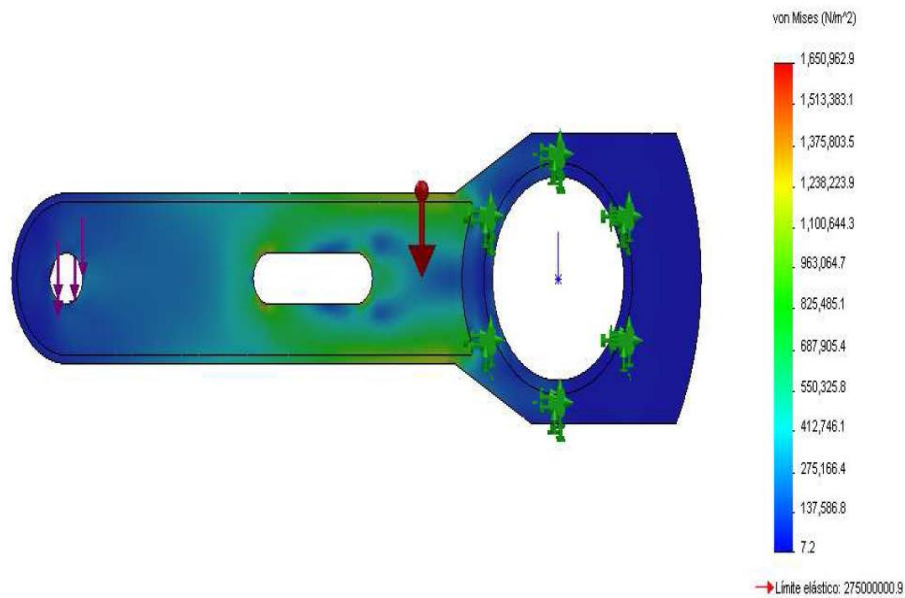


Figura 4.3: Estudio de tensiones del Diseño.

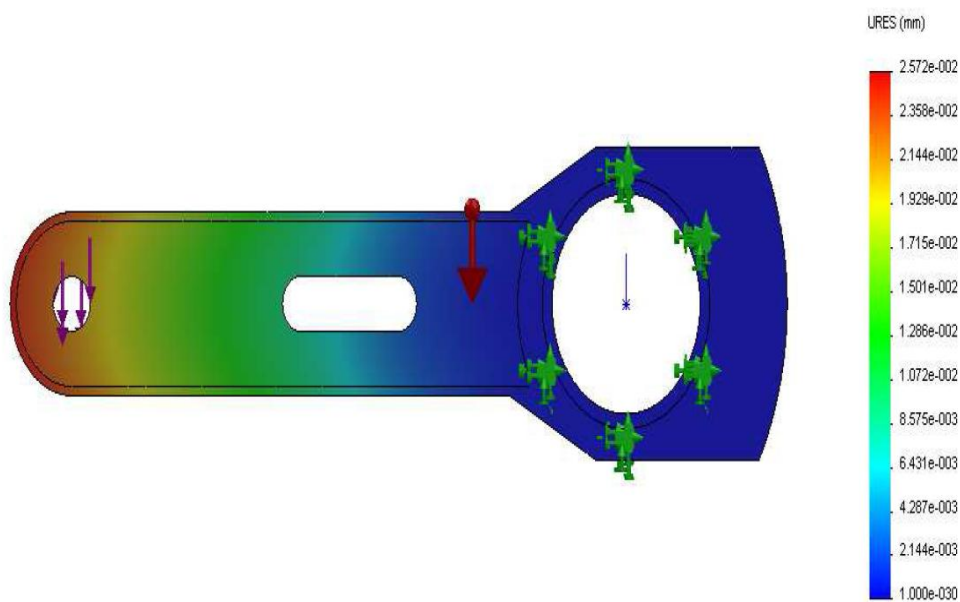


Figura 4.4: Estudio de deformación del Diseño.

El estudio de la figura 4.3 nos muestra que el diseño propuesto cumple con los requisitos necesarios ya que en la simulación del software se pudo ver que las cargas a las que estará sometido el diseño no superan su límite elástico y contamos con un factor de seguridad de 166

cuando el mínimo recomendado es de 4. La figura 4.4 nos muestra que el desplazamiento por la deformación debido a las cargas aplicadas será de $.02572mm$ lo cual para el trabajo que va a desempeñar no nos afecta.

4.1.1. Modelo de la plataforma experimental.

Ahora que el diseño del péndulo ha sido analizado se procedió a realizar el modelo tridimensional de toda la planta el cual el modelo final de la plataforma es el siguiente:



Figura 4.5: Modelo final de la planta experimental.

Las piezas que se modelaron para la realización de la planta experimental sin incluir el péndulo ya mostrado anteriormente fueron las siguientes:

- Motor de transmisión directa, estator y rotor:

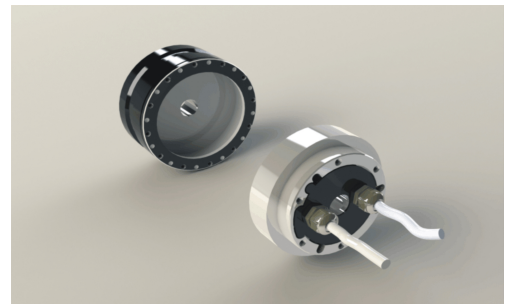
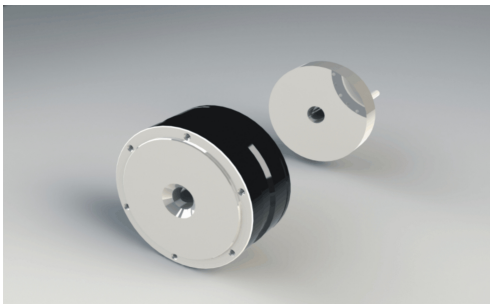


Figura 4.6: Vista Frontal del Estator y del Rotor. Figura 4.7: Vista Posterior del Estator y del Rotor.

- Soporte. Este ensamble cuenta con 4 piezas en total, la placa de soporte del motor, dos escuadras para dar firmeza al ensamble y una placa base para ensamblar con la base de la planta experimental.



Figura 4.8: Ensamble del soporte.

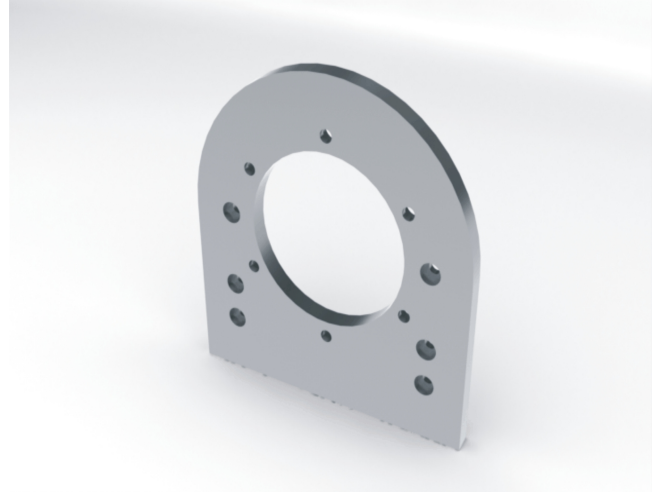


Figura 4.9: Placa del soporte del motor.

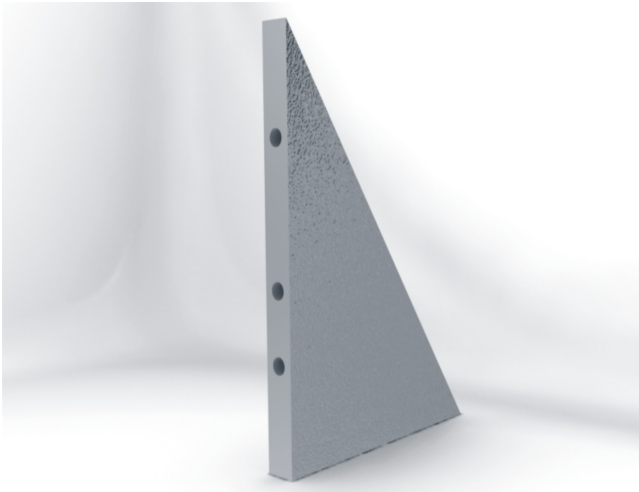


Figura 4.10: Escuadras del soporte.

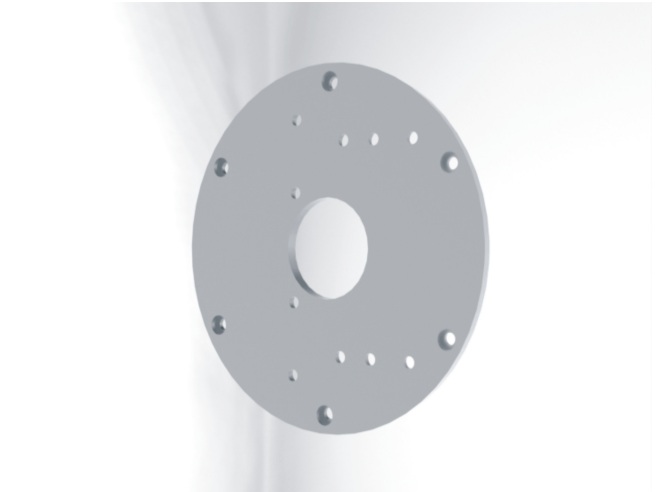


Figura 4.11: Placa base del soporte.

- Base. Este ensamble cuenta con 3 piezas que son una placa para ensamblar el soporte del motor, un tubo que sirve de pedestal y una placa para ensamblar toda la planta.

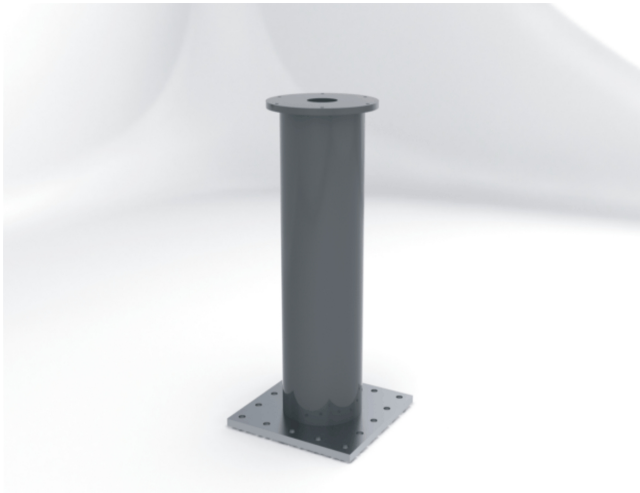


Figura 4.12: Ensamble de la base.



Figura 4.13: Placa superior de la base.



Figura 4.14: Tubo de la base.

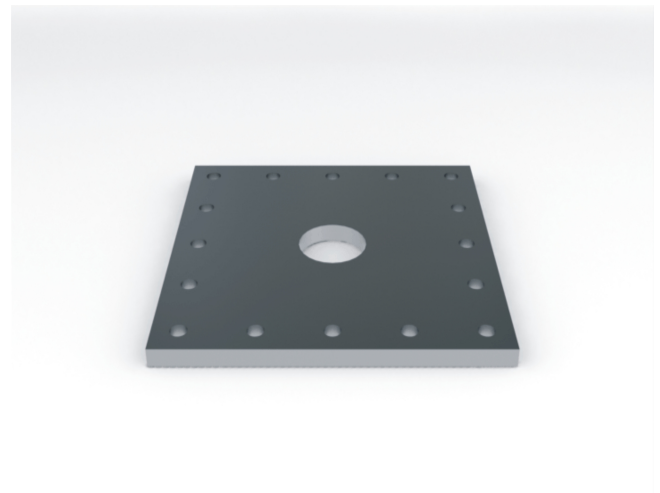


Figura 4.15: Placa inferior de la base.

Durante la realización de este modelo se pudieron evitar muchos errores de diseño como la posición de las cajas de los tornillos, tamaño de las piezas y otros más, también se mejoraron los diseños para su facilidad de fabricación y reducción de costos. Las hojas de dibujo para maquinado de estas piezas se encuentran en el Anexo A (A) de este reporte.

4.2. Fabricación del Péndulo Robot

El proceso de fabricación es el conjunto de operaciones necesarias para modificar las características de las materias primas. Dichas características pueden ser de naturaleza muy variada tales como la forma, la densidad, la resistencia, el tamaño o la estética.

Para la obtención de un determinado producto serán necesarias multitud de operaciones individuales de modo que, dependiendo de la escala de observación, puede denominarse proceso tanto al conjunto de operaciones desde la extracción de los recursos naturales necesarios hasta la venta del producto como a las realizadas en un puesto de trabajo con una determinada máquina-herramienta.

Para el proceso de fabricación del péndulo-robot se realizaron las siguientes actividades:

- Diseño de la planta: El diseño nos sirvió para seleccionar las máquinas y herramientas que se utilizaron, además los archivos de diseño fueron utilizados para el control numérico.
- Las piezas se maquinaron por medio de un taller externo, el material utilizado para las piezas fue cortado a la medida en máquinas como el torno y fresadora manuales, para posteriormente ser introducidas en el CNC.
- En el CNC el material se coloca y se le realiza una rectificación para que en caso de que el material se encuentre en mal estado, no se presente en esas condiciones una vez que la pieza es terminada, por ejemplo, la placa en la que se maquinó el péndulo se compró cóncava pero una vez que se le realizó el careado a la placa, ya no presentaba deformación. En la siguiente imagen podemos ver la colocación del material en el CNC y se le está ubicando el cero pieza para empezar la fabricación del péndulo.



Figura 4.16: Ubicación del cero pieza en el material.

- La estructura de la base consta de 3 partes, dos placas y un tubo, para unirlos se tuvieron

que soldar estas 3 piezas en un negocio de soldados especiales en el cual sueldan el aluminio utilizando Argón.

- Cuando las piezas fueron entregadas no estaban pulidas y eran visibles las marcas de maquinado, para esto se utilizó lija de agua de grosor 80, 160, 400, 600, 1000 y un líquido pulidor, esto para poder darle a las piezas un buen terminado y eliminar todo rasgo de golpes o manchas. Para la base fue necesario esmerilar para rebajar el cordón del soldado y posteriormente lijar.



Figura 4.17: Foto del péndulo sin el proceso de pulido.



Figura 4.18: Foto del péndulo ya pulido

- El ensamblado de las piezas se realizó utilizando tornillos M6 DIN 912 con largos de 15 mm para ensamblar el motor con el péndulo y la placa de soporte, 30 mm para la placa de soporte con la placa base, 20 mm para ensamblar las escuadras y 20 mm para el ensamble del soporte del motor con la base.

Cuando todo el proceso de fabricación fue terminado se propuso la idea de montar la planta sobre una celda que contara con el equipo de cómputo, driver y la planta experimental, esto con el fin de facilitar el uso de la planta y hacer más accesible el transporte de la misma.

4.3. Puesta en marcha del péndulo-robot

Con puesta en marcha nos referimos al proceso de hacer que la parte mecánica ya terminada se acople a la parte electrónica y de sistemas computacionales, de forma que se complementen para formar un robot. Para lograr esto se tiene que pasar por un proceso de diseño electrónico, que en nuestro caso se optó por utilizar equipo de instrumentación del Laboratorio de Robótica y Automatización, ya que el diseño de una electrónica nueva no era una opción adecuada, esto debido a que ya se contaba con el equipo suficiente para lograr este objetivo.

El driver utilizado para el control del motor fue el Dynaserv G3 de la compañía Parker Automation[®] mostrado en la imagen 4.19, por medio de este driver el motor se comunica con un sistema de control, el driver se encarga de recibir las señales del encoder y mandarlas al sistema de control y recibir el par aplicado por medio de una señal analógica y convertirlo a Nm por medio de la alimentación del motor. Este driver está especializado en controlar el tipo de motor que se está utilizando en la planta.



Figura 4.19: Driver Dynaserv G3 de la compañía Parker Automation[®].

El sistema de control se realiza por medio de una computadora con una tarjeta de interfaz MFIO-3A de la compañía Precision MicroDynamics[®] mostrada en la figura 4.20, esta es una tarjeta de interfaz de PC para control de movimiento, se realizó una aplicación en la plataforma MS-DOS desde la cual se comunica con la tarjeta de interfaz para adquirir las señales del encoder y enviar el torque aplicado al motor, la tarjeta de interfaz se encarga de comunicar estos datos con el driver por medio de un conector Honda que se adaptó para utilizar con la tarjeta MFIO-3A.

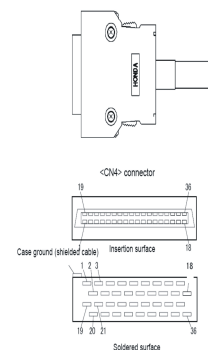
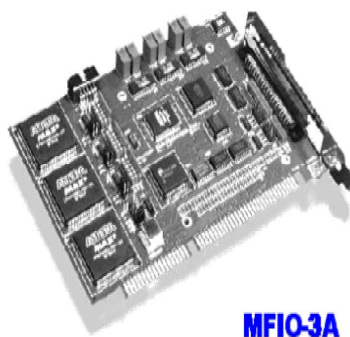


Figura 4.20: Tarjeta de interfaz de PC para control de movimiento MFIO-3A de la compañía Precision MicroDynamics[®].

Figura 4.21: Conector Honda adaptado para la tarjeta de Interfaz MFIO-3A.

El cable Honda que fue adaptado para la tarjeta MFIO-3A mostrado en la figura 4.21, fue soldado en el Laboratorio de Robótica y Automatización utilizando la siguiente tabla 4.1 como referencia para comunicar las señales y datos entre el driver y la interfaz:

MFIO-3A		Dynaserv G3	
PIN	Definición	PIN	Definición
5 A	DAC3	35	Analog command input +
6 A	AGND	36	Analog command input -
15 A	PA0	20	ServoIn
1 B	5V	1	Interface PowerSupply +
2 B	GND	2	Interface PowerSupply -
23 B	A1	9	A ⁺
24 B	A1*	10	A ⁻
25 B	B1	11	B ⁺
26 B	B1*	12	B ⁻

Cuadro 4.1: Tabla de pines para conectar por medio del cable Honda al driver y la MFIO-3A.

Posteriormente se tiene que realizar una conexión entre el pin 6A y 13A que son la tierra analógica y la tierra digital de la tarjeta MFIO-3A. Una vez concretadas todas las conexiones necesarias para el péndulo robot este ya se encuentra listo para trabajar, sólo es necesario el diseño del controlador por medio de la GUI de BORLAND C++[®] y posteriormente generar y ejecutar la aplicación. El siguiente diagrama nos muestra todas las conexiones de la instrumentación que fue explicada anteriormente:

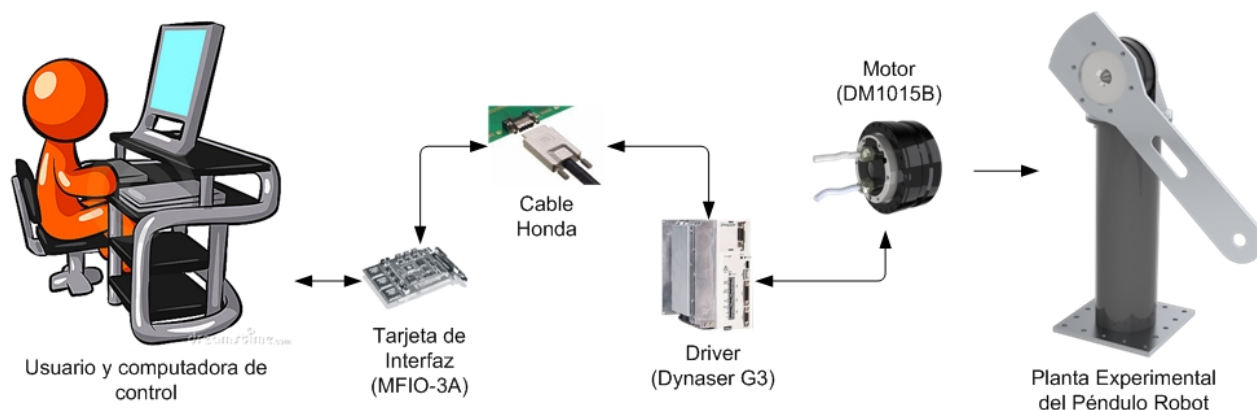


Figura 4.22: Diagrama de conexiones entre la computadora que realiza el control y su interfaz para el péndulo-robot

El software utilizado para controlar el robot, como ya fue mencionado, fue el BORLAND C++[®] por medio de éste se programa todo lo necesario para interpretar las señales del encoder

y transformarlas en variables, después por medio de un algoritmo de control estas variables son procesadas y devuelven un torque el cuál es acoplado por la tarjeta de interfaz hacia el driver. Este software tampoco fue diseñado en este trabajo, se realizó una copia del programa que se utilizaba en otro robot el cual contaba con la misma tarjeta de interfaz, el diseño del algoritmo de control ya depende del usuario.

En la siguiente imagen se muestra la etapa final de la puesta en marcha donde finalmente todas las conexiones fueron realizadas y la computadora se encuentra controlando al péndulo-robot a 90°:

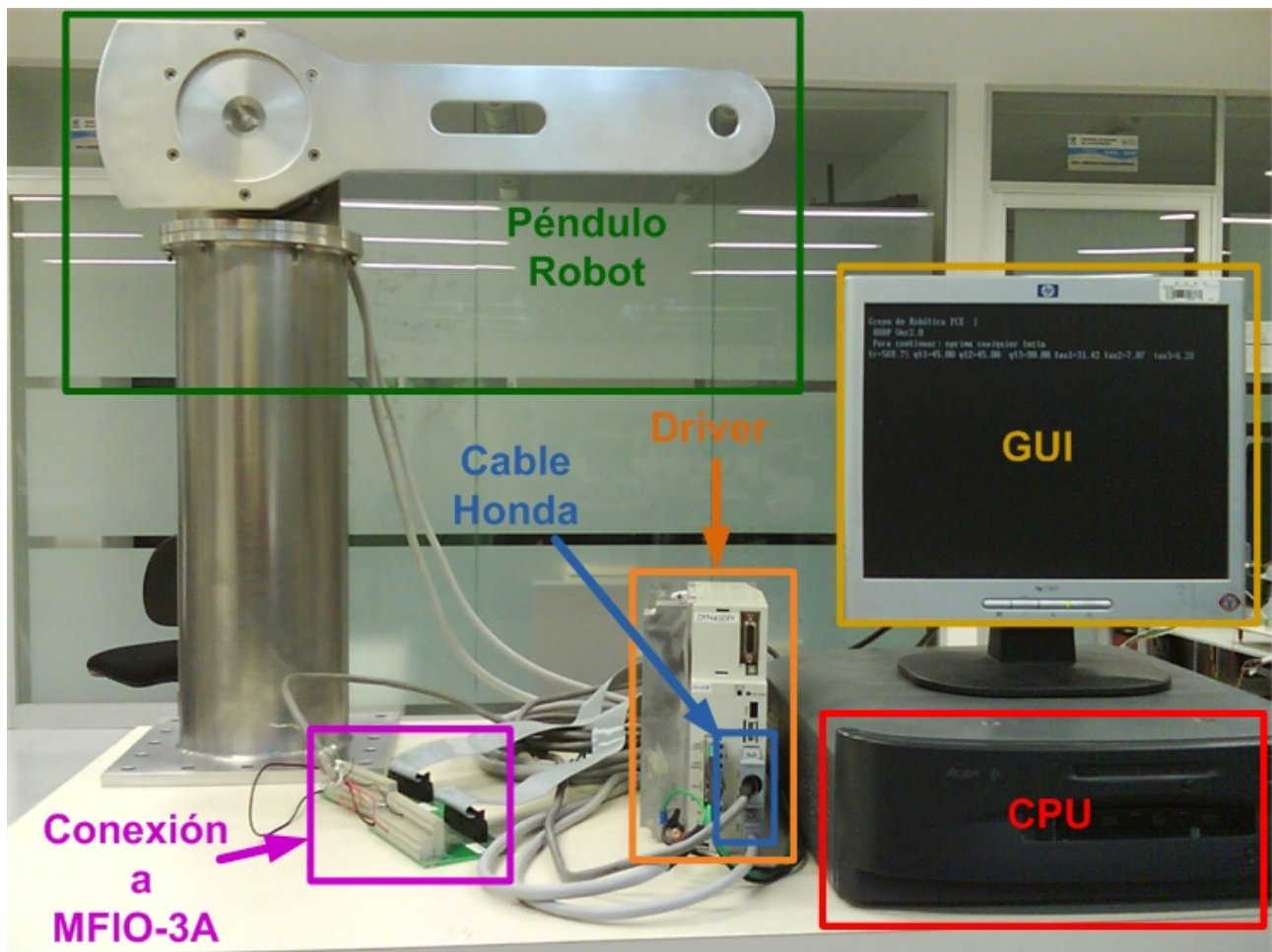


Figura 4.23: Fotografía de la planta experimental en funcionamiento.

El desempeño de la planta experimental es bueno y cumple con las expectativas esperadas en el diseño, ahora es necesario trabajar con el robot un tiempo para corroborar su buen funcionamiento, también es necesario fijar la base del robot a una estructura estable y con área de seguridad para evitar que alguien pueda resultar herido por los movimientos del robot.

4.4. Identificación paramétrica

En esta sección se aborda la identificación de parámetros del péndulo, los parámetros de un robot son aquellas características físicas como masa, fricción, longitud, etcétera, estos parámetros son indispensables para tratar de predecir el comportamiento de cualquier sistema, sin embargo, hay veces que es muy complicado medirlos.

Para lograr esta tarea se emplearon 2 métodos, para el primero, físicamente por medio de herramientas de medición se obtuvieron la masa y el centro de masa y en el segundo método utilizando el software de diseño SolidWorks, en el cual fue diseñado y exportado el péndulo para su maquinado en CNC. Finalmente se realiza una tabla comparativa de los parámetros obtenidos por los diferentes métodos.

4.4.1. Parametrización por medición

Para obtener los parámetros físicos de masa y centro de masa se utilizó una báscula de precisión digital en la cual se colocó solamente el péndulo sin las demás partes del ensamble, posteriormente para obtener el centro de masa se utilizó un objeto rectangular de 10 x 3 x 2 cm el cual se niveló perfectamente y se colocó como base para el péndulo posicionándolo en diferentes ubicaciones hasta que el péndulo se encontró perfectamente nivelado, posteriormente utilizando una cinta métrica se realizó la medición desde el centro de giro del péndulo hasta el punto donde se niveló el péndulo. Los datos obtenidos de esta parametrización se muestran en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor	Unidad
Masa	1.190	<i>Kg.</i>
Centro de Masa	12.5 – 13.0	<i>cm.</i>

Cuadro 4.2: Parámetros obtenidos por medición

4.4.2. Parámetros del software

EL software SolidWorks ofrece al usuario la información sobre diferentes parámetros de la pieza que se está diseñando, esta información se ubica en la sección de Calcular->Propiedades físicas, también se pueden monitorear estas propiedades añadiendo un sensor en la opción de Calcular->Sensor. Para que el software calcule la masa de la pieza es necesario agregar el material ya sea agregando un material editado por el usuario o seleccionando uno de la librería de materiales. En nuestro caso seleccionamos de la librería el material aluminio 6061-T6 (SS), esto debido a que fue el material con el que contaba el proveedor y con el que se maquinó la pieza. La siguiente tabla nos muestra los parámetros calculados por el software:

Parámetro	Valor	Unidad
Masa	1.119	<i>Kg.</i>
Centro de Masa	12.475	<i>cm.</i>

Cuadro 4.3: Parámetros del software de diseño

4.4.3. Comparativa de parámetros

En esta sección se presenta la siguiente tabla que nos muestra la comparativa de parámetros encontrados por medición y los calculados por el software de diseño:

Parámetro	Valor por medición	Valor por software	Unidad
Masa	1.190	1.119	<i>Kg.</i>
Centro de Masa	12.5 – 13.0	12.475	<i>cm.</i>

Cuadro 4.4: Comparativa de parámetros por medición física vs software de diseño

Aquí podemos ver que el software nos entrega valores muy cercanos a los parámetros reales, y esta variación puede ser debido a que en el proceso de maquinado se desbasto un mm más en la placa del péndulo, además el material asignado en el software tiene las propiedades que debe de cumplir el aluminio, sin embargo los fabricantes nunca entregan un aluminio con esas propiedades, sino que se aproximan pero no las igualan.

El parámetro de la inercia del rotor es tomado de las hojas de especificación del fabricante, la inercia del rotor tiene un valor de $0.012Kg\,m^2$.

4.4.4. Identificación de parámetros de fricción

Se realizó una identificación algo simple aplicando un torque al péndulo, posteriormente se introducen los datos a MatLab y utilizando el modelo dinámico se busca reproducir el torque variando los parámetros de fricción. Para esto se introducen los parámetros de masa, distancia al centro de masa, gravedad e Inercia del Rotor, los cuales ya fueron calculados anteriormente.

El torque aplicado al péndulo es el siguiente:

$$\tau = 2.5 * \sin(6.8 * t + 0.8 * \text{random}) + \sin(7.8 * t + 0.25 * \text{random})$$

Los resultados de esta identificación son mostrados en la siguiente gráfica donde mostramos el torque aplicado real vs el torque simulado.

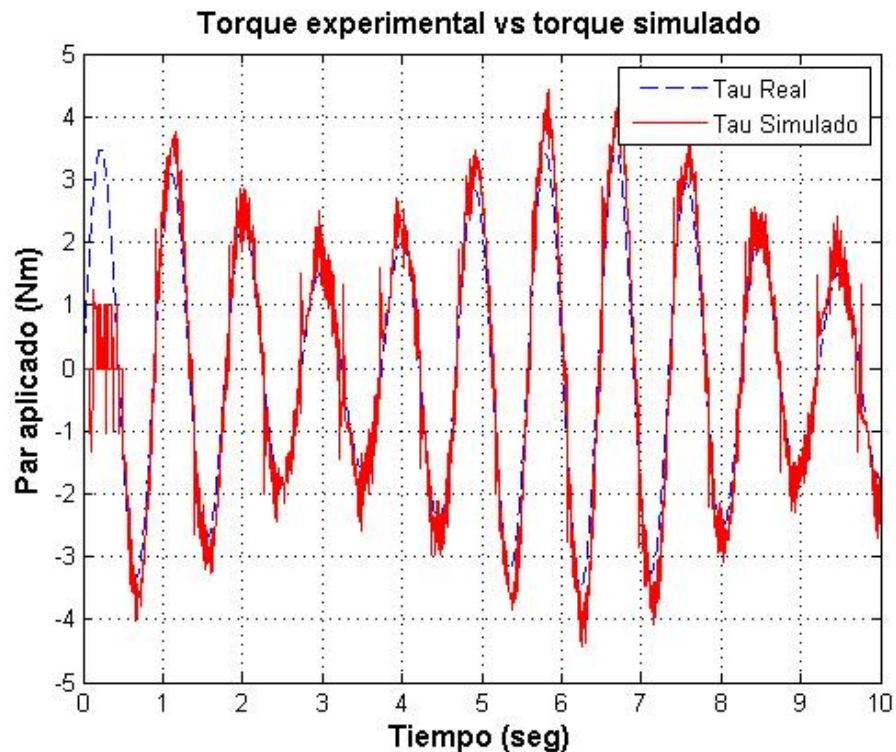


Figura 4.24: Identificación paramétrica utilizando una comparativa de torques.

Como podemos ver los torques se aproximan mucho, sin embargo si nosotros aplicamos un torque diferente se cambian los parámetros de fricción, ahora veremos una tabla donde mostramos finalmente los parámetros del robot:

Parámetro	Valor	Unidad
Masa (m)	1.190	$Kg.$
Distancia al Centro de Masa (lc)	12.5 – 13.0	$cm.$
Inercia del Rotor (I_r)	0.012	Kgm^2
Fricción Viscosa (b)	0.4	$Nmseg$
Fricción de Coulomb (fc)	1.0	$Nm4$

Cuadro 4.5: Parámetros del software de diseño

Usando estos parámetros nosotros podemos hacer estudios de la planta o utilizarlos para nuestro simulador y de esta forma poder realizar aproximaciones más exactas, sin embargo hay que considerar que el motor es relativamente nuevo por lo que sus parámetros de fricción variarían conforme al tiempo, es por eso que será necesario realizar una identificación de fricción más a fondo posteriormente.

4.5. Mesa de trabajo para el prototipo

Para que la planta física se trabaje adecuadamente el péndulo-robot debe de estar sujeto a una superficie sólida que evite las vibraciones y desequilibrio del robot, para este fin se ideó la construcción de una mesa de trabajo en la que se pudiera transportar el péndulo-robot junto con todos los accesorios necesarios como son la computadora y sus periféricos, el driver, fuente de poder y conectores de la MFIO3A.

Para el diseño de la mesa se consideró la comodidad del usuario así como su seguridad, de forma que el robot se encuentra a una distancia prudente del usuario. La mesa contará con ruedas para que se pueda transportar a las aulas de clases y poder experimentar durante la clase, sin la necesidad de que los alumnos acudan al laboratorio.

El diseño de la mesa de trabajo es mostrado en las siguientes imágenes, en las cuales se pueden observar todos los componentes mencionados anteriormente:



Figura 4.25: Mesa de trabajo desde una perspectiva lateral.

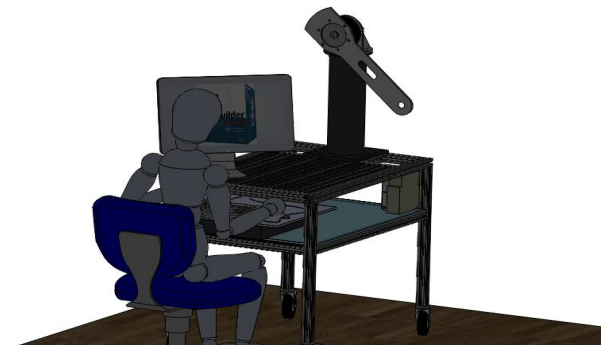


Figura 4.26: Mesa de trabajo desde una perspectiva general.

El proceso de fabricación de esta mesa se llevará a cabo en el taller de prototipos mecatrónicos de la facultad de ciencias de la electrónica.

Capítulo 5

Simulador gráfico del péndulo robot

“La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos - para el funcionamiento del sistema.” [19]

Los simuladores son una herramienta importante en la actualidad, ya que nos permiten predecir un comportamiento aproximado de los sistemas dinámicos, a través de ellos se puede reducir el tiempo de investigación y evitar accidentes cuando los sistemas presentan algún peligro para el ser humano. En este trabajo se realizó un simulador de un péndulo con el objetivo de ser una herramienta para el estudio del control. Este simulador fue elaborado en la plataforma .net y es una aplicación de escritorio WPF (Windows Presentation Foundation) que es una nueva tecnología de presentación web. La ventaja de utilizar este tipo de aplicación es que puede ser publicada fácilmente como una aplicación web o una aplicación de escritorio.

El simulador presenta una interfaz que permite al usuario visualizar el péndulo en un modelo tridimensional y también las gráficas de resultados de la simulación, Se le pueden introducir diferentes parámetros de control, de la simulación y propiedades físicas del péndulo. Una de las características más importantes de este simulador es que cuenta con un analizador léxico sintáctico que permite introducir controladores y posición deseada en forma de ecuaciones matemáticas y se puede hacer uso de funciones trigonométricas y operadores matemáticos más comunes.

Además el simulador cuenta con una interfaz gráfica que permite la interacción del usuario con el péndulo por medio del mouse y otras funciones, se realizó una optimización de los tiempos del procesamiento de datos utilizando llamadas por referencia, se logró una optimización del método para graficar utilizando un muestreo de los resultados, el movimiento del péndulo se puede visualizar en el tiempo definido por el usuario y se estructuró el programa de tal manera que un futuro programador lo pueda mejorar y hacer uso del código de una manera rápida y sencilla.

Para comprobar el funcionamiento del simulador se realiza una comparación de los resultados generados por el simulador y por un software de simulación llamado SIMNON[©]. Posteriormente

se realiza una comparación con la planta real para ver qué tan cercano es la predicción del comportamiento del péndulo-robot.

5.1. Integración con Runge-Kutta 4

El modelo dinámico obtenido para este sistema es una ecuación diferencial, utilizaremos un método numérico que nos permitirá aproximar la solución de esta ecuación este método es Runge-Kutta 4 el cual tiene un error de truncamiento de orden superior a otros métodos [20]. Lo primero que se realiza antes de aplicar el método de Runge-Kutta 4 es obtener las variables de estado de sistema que son q, \dot{q} , por lo tanto tenemos que:

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \frac{\tau - ml_c g \sin(q) - b\dot{q} - f_c \text{sign}(\dot{q})}{[ml_c^2 + I_r]} \end{bmatrix}. \quad (5.1)$$

Después se integran estas ecuaciones utilizando los 4 pasos del método de Runge-Kutta 4 y el paso de integración (dh), estos pasos son los siguientes:

■ Primer paso

$$\begin{aligned} K_1 &= \dot{q}, \\ L_1 &= \frac{\tau - ml_c g \sin(q) - b\dot{q} - f_c \text{sign}(\dot{q})}{[ml_c^2 + I_r]}, \\ q &= q + \frac{1}{2}K_1 dh, \\ \dot{q} &= \dot{q} + \frac{1}{2}L_1 dh. \end{aligned}$$

■ Segundo paso

$$\begin{aligned} K_2 &= \dot{q}, \\ L_2 &= \frac{\tau - ml_c g \sin(q) - b\dot{q} - f_c \text{sign}(\dot{q})}{[ml_c^2 + I_r]}, \\ q &= q + \frac{1}{2}K_2 dh, \\ \dot{q} &= \dot{q} + \frac{1}{2}L_2 dh. \end{aligned}$$

■ Tercer paso

$$\begin{aligned} K_3 &= \dot{q}, \\ L_3 &= \frac{\tau - ml_c g \sin(q) - b\dot{q} - f_c \text{sign}(\dot{q})}{[ml_c^2 + I_r]}, \\ q &= q + K_3 dh, \\ \dot{q} &= \dot{q} + L_3 dh. \end{aligned}$$

■ Cuarto paso

$$\begin{aligned}
 K_4 &= \dot{q}, \\
 L_4 &= \frac{\tau - ml_c g \sin(q) - b\dot{q} - f_c \operatorname{sign}(\dot{q})}{[ml_c^2 + I_r]}, \\
 q &= q + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)dh, \\
 \dot{q} &= \dot{q} + \frac{1}{6}(L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4)dh.
 \end{aligned}$$

Estas ecuaciones se resuelven en cada paso de integración para obtener una solución aproximada de la ecuación diferencial. Las condiciones iniciales, el tiempo de integración y el paso de integración son definidos por el usuario por medio de la interfaz gráfica.

5.2. Interfaz Gráfica de Usuario



Figura 5.1: Interfaz Gráfica del Simulador del Péndulo.

La IGU del simulador está dividida principalmente en 3 bloques, en el primer bloque se muestra los parámetros de la simulación, las cuales también se encuentran divididas en tres secciones dependiendo de su uso, las variables son las siguientes:

■ Propiedades del Péndulo

Propiedades del Péndulo		
Masa	1.119	Kg
Distancia lc	0.124	m
Gravedad	9.81	$\frac{m}{seg^2}$
Inercia del Rotor	0.012	Kgm^2
Fricción Viscosa	0.0175	Nm-seg
F. de Coulomb	0.1	Nm

Figura 5.2: Primera sección del bloque de parámetros.

- Masa: Es la masa del péndulo está dada en Kg .
- Distancia lc: Es la distancia del centro de giro al centro de masa del péndulo está dada en m .
- Gravedad: Es la constante gravitatoria está dada en $\frac{m}{seg^2}$
- Inercia del Rotor: Es el momento de inercia del rotor está dado en Kgm^2 .
- Fricción Viscosa: Es la constante de fricción viscosa presente en el sistema está dada en $Nm - seg$.
- Fricción de Coulomb: Es la constante de fricción de Coulomb presente en el sistema está dada en Nm

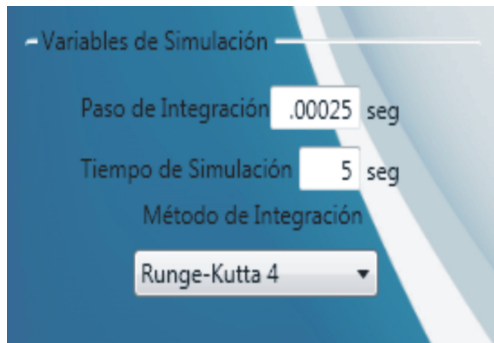
■ Variables de Control

Variables de Control		
Kp	5	$\frac{Nm}{rad}$
Kv	0.05	$\frac{Nmseg}{rad}$
Posición Deseada	.785	rad
Posición Inicial	0	rad
Velocidad Inicial	0	$\frac{rad}{seg}$
Tipo	PDgrav	

Figura 5.3: Segunda sección del bloque de parámetros.

- Kp: Se refiere a la ganancia proporcional del controlador.
- Kv: Es la constante de ganancia derivativa del controlador.
- Posición Deseada: Es la posición en la que se quiere ubicar al péndulo está dada en grados. Se utiliza el analizador léxico-sintáctico para escribir la posición deseada.
- Posición Inicial: Es la condición inicial de posición del péndulo está dada en grados.
- Velocidad Inicial: Es la condición inicial de velocidad del péndulo está dada en $\frac{rad}{seg}$.
- Controlador: Es la estructura del controlador que genera el par aplicado. Se utiliza el analizador léxico-sintáctico para escribir el control.

■ Variables de Simulación



- Paso de Integración: Se refiere al paso de integración utilizado en el método numérico de integración.
- Tiempo de Simulación: Es la duración en segundos de la simulación.
- Método de Integración: Se incluyó solamente el método de Runge-Kutta 4.

Figura 5.4: Tercera sección del bloque de parámetros.

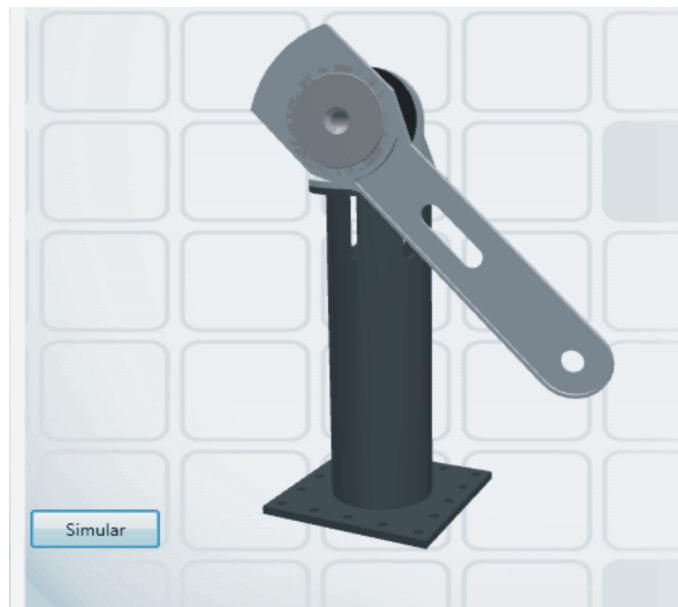


Figura 5.5: Bloque de Simulación.

En la figura anterior se muestra el segundo bloque donde se encuentra un modelo tridimensional de la planta donde se puede visualizar el movimiento del péndulo, también se encuentra el botón para ejecutar la simulación.



Figura 5.6: Bloque de Gráficas.

La figura anterior muestra el último bloque donde se presentan los resultados de la simulación en tres gráficas, estas son:

- Error de posición angular (grados) contra el tiempo (seg.).
- Posición angular (grados) contra el tiempo (seg.).
- Torque aplicado (Nm) contra el tiempo (seg.)

En este bloque también se encuentra un botón para guardar los resultados de la simulación en archivos de texto, estos archivos se guardan en el mismo directorio donde se ejecuta el programa. Los resultados que se guardan son: Posición angular, Error de posición angular, Velocidad angular, Torque aplicado, Tiempo.

5.3. Funcionamiento y estructura del simulador

El simulador además de su función de integrar el modelo dinámico del péndulo cuenta con otras funciones como son la del analizador léxico-sintáctico, movimiento del modelo tridimensional, graficado de los resultados y otras funciones más, para lograr esto se tuvo que considerar el tiempo de procesamiento de datos, se utilizaron diversas técnicas para cada una de estas funciones con el fin de optimizar estos tiempos de procesamiento y de esta manera no afectar a la funcionalidad principal que es la de simulación.

Para lograr el analizador sintáctico se utilizó una librería que nos permite escribir una estructura matemática con las funciones y operadores más utilizados en las estructuras de control.

Esta mejora, amplía de gran manera la capacidad del simulador, al incluir la estructura de control diseñada por el propio usuario, este puede predecir en cierto grado el comportamiento de su controlador en la planta real, también es posible poder trabajar con control de movimiento ya que la posición deseada puede ser también una expresión matemática. La librería del analizador sintáctico funciona de la siguiente manera:

1. Se realiza un vector de literales donde se almacena el valor numérico asignado por el usuario mediante la interfaz.
2. Se asigna a una variable donde se almacena el resultado de la estructura matemática, dada por el usuario, que se va a analizar junto con el vector de literales que se utilizan en esa estructura.

Para optimizar el tiempo de procesamiento se utilizaron llamadas por referencia en las funciones, de forma que cuando el vector de resultados generado es muy grande no se realicen copias sino que simplemente se utilice el mismo vector, también para optimizar el tiempo de graficado solo se grafican 400 puntos por gráfica o menos, esto se realiza utilizando un muestreo en los datos a graficar y este muestreo depende del tamaño del vector.

El movimiento del péndulo se realiza por medio de un temporizador y este se realiza después del cálculo de los datos, y el acelerador gráfico se encarga de las complejas operaciones de mostrar el péndulo en su nueva ubicación de forma que no importa la velocidad de la computadora donde se ejecute el simulador siempre moverá el péndulo en el tiempo que el usuario asigne. El programa fue codificado en el lenguaje c# y XAML el algoritmo de su funcionamiento básico es el siguiente:

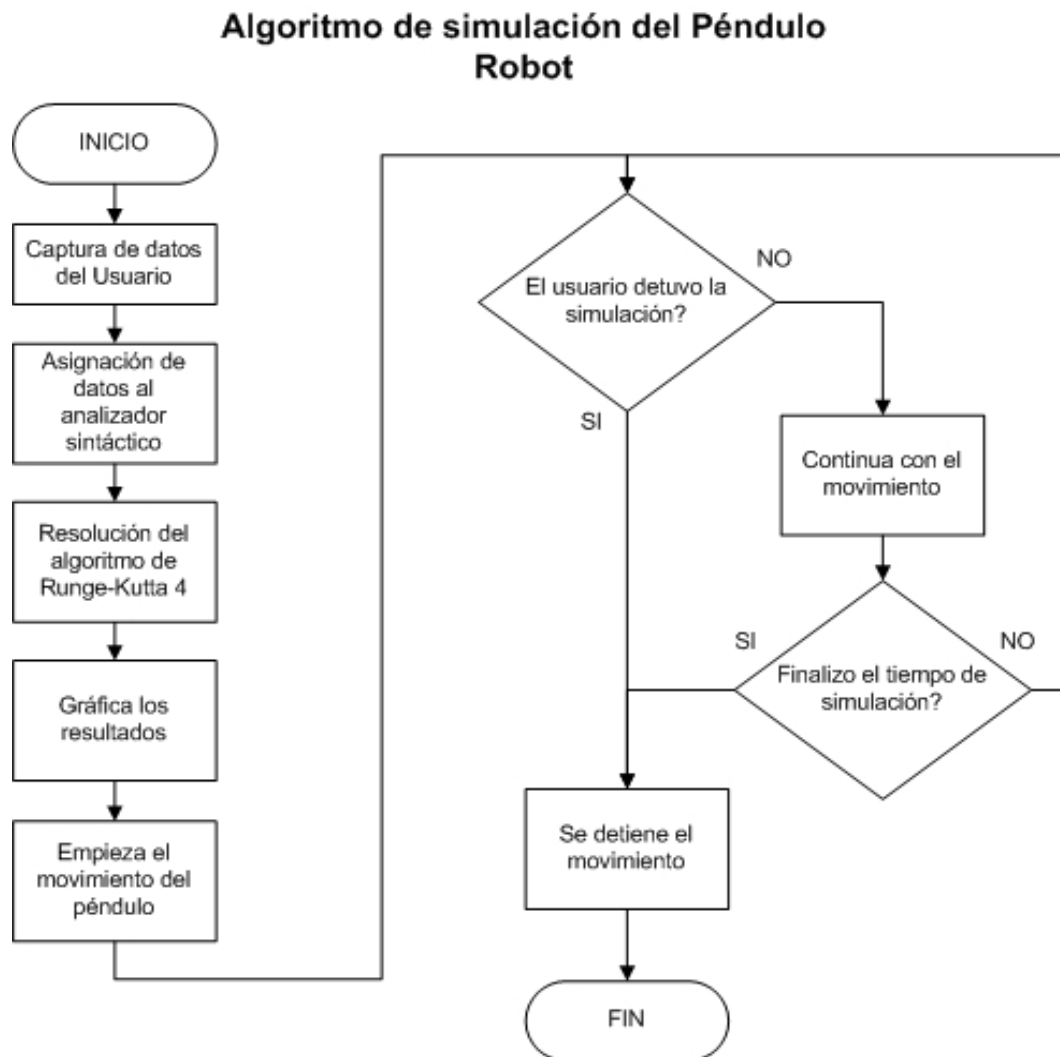


Figura 5.7: Algoritmo del programa de simulación del péndulo robot.

La mejora en la interfaz de usuario fue que todos los elementos visuales del simulador cuentan con animación y también se realizó una depuración de errores para evitar que el usuario escribiera letras en campos donde sólo se admiten valores numéricos o que se dejaran campos vacíos y estos generaran problemas en el código.

En este algoritmo se muestra el proceso realizado en el simulador cuando el botón de simular es activado, el pseudocódigo se encuentra en el Anexo B (B) de este trabajo.

5.4. Comparación de Simuladores

Para comprobar el correcto funcionamiento de este simulador utilizaremos para comparar un simulador conocido llamado SIMNON[©]. Los parámetros que utilizaron para simular son los mismos en los simuladores.

Los resultados de nuestro simulador se exportaron en un archivo de texto, al igual que los datos que nos dio el software SIMNON[©], se utilizó un software intermedio para graficar los resultados de ambos software.

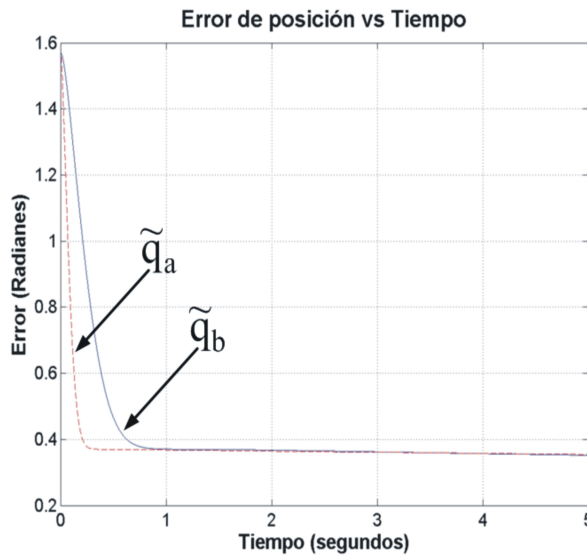


Figura 5.8: Comparación de Gráficas \tilde{q}_a y \tilde{q}_b vs tiempo.

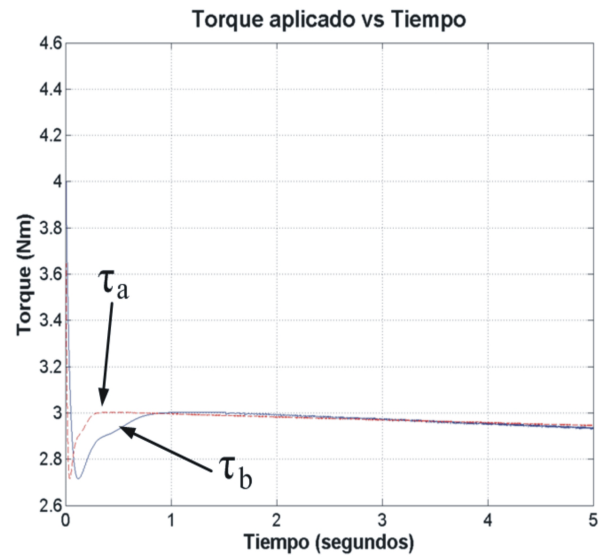


Figura 5.9: Comparación de Gráficas τ_a y τ_b vs tiempo.

La figura 5.8 muestran los resultados de error de posición donde \tilde{q}_a son los resultados del error de posición que nos dio en nuestro simulador y \tilde{q}_b son los resultados del error de posición del software SIMNON[©]. En la figura podemos ver que en el transitorio si difieren los simuladores, pero en el parte estacionaria los dos simuladores se aproximan mucho. La figura 5.9 nos muestra el par aplicado de ambos simuladores donde τ_a es el par aplicado de nuestro simulador y τ_b es el par aplicado por el software SIMNON[©]. También en esta figura podemos observar que en el torque aplicado en ambos simuladores presentan un transitorio similar y una buena aproximación en el estacionario.

5.5. Comparativa Simulador vs Planta Real

Para poder validar el funcionamiento de este simulador se presentan una comparativa entre el simulador y el péndulo-robot real, en donde se realizó control de posición al péndulo-robot en $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$.

Las pruebas se realizaron en el péndulo-robot construido en este trabajo el cual cuenta con motor de transmisión directa de 15 Nm , para la interfaz de control se utiliza una tarjeta MFIO-3A la cuál es una tarjeta de interface de computadora para control de movimiento de la compañía Precisión MicroDynamics. Los datos del eslabón fueron tomados de la sección de identificación paramétrica de este trabajo:

Descripción	Notación	Valor	Unidades
Longitud eslabón	l	0.63	m
Distancia al centro de masa	l_c	0.126	m
Masa eslabón	m	1.190	Kg
Inercia del rotor	I_r	0.012	Kgm^2
Aceleración de la gravedad	g	9.81	m/s^2
Coefficiente de fricción viscosa	b	0.2581	$Nm - seg$
Fricción de Coulomb	f_c	0.55	Nm

Cuadro 5.1: Tabla de Parámetros.

El controlador utilizado fue el siguiente:

$$\tau = k_p \tanh(q_t) - k_v \tanh(\dot{q}) + mgl_c \sin(q), \quad (5.2)$$

donde k_p es la ganancia proporcional, k_v es la ganancia derivativa, q_t el error de posición, q es la posición del péndulo, m es la masa, g la gravedad del péndulo y l_c es la distancia del centro de masa al centro de giro. Este controlador fue propuesto por el Dr. Fernando Reyes([21]).

Las gráficas siguientes nos muestran la comparativa de resultados para el control de posición a 45° , 90° y 135° :

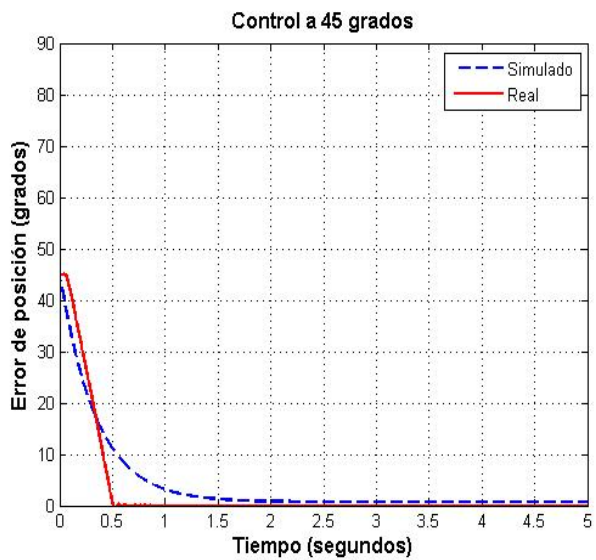


Figura 5.10: Control de posición a 45° del simulador contra el péndulo real.

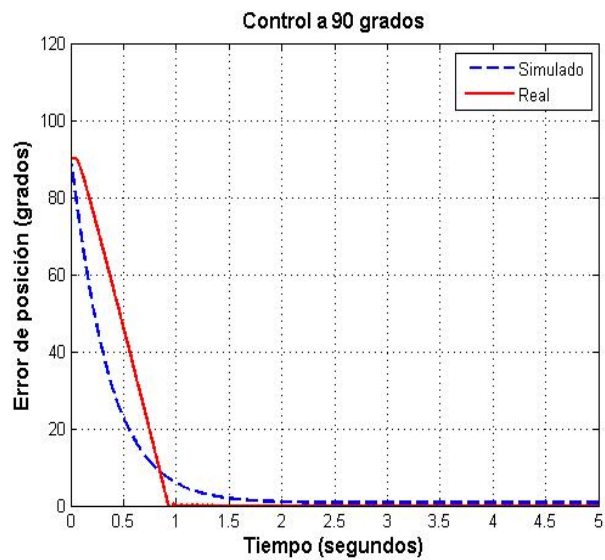


Figura 5.11: Control de posición a 90° del simulador contra el péndulo real.

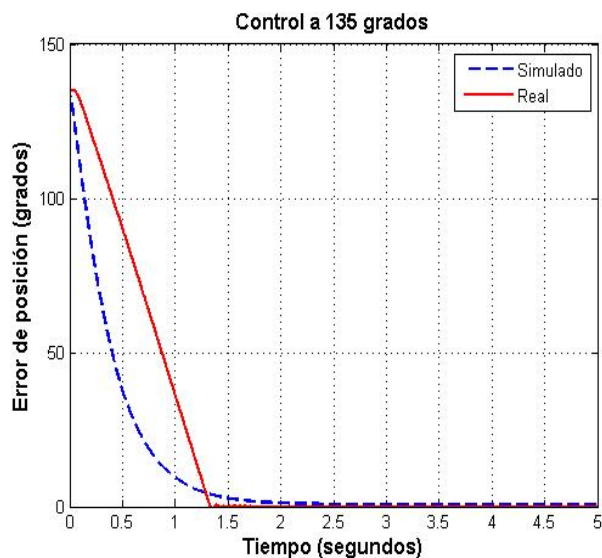


Figura 5.12: Control de posición a 135° del simulador contra el péndulo real.

Como se puede observar en las gráficas el simulador presenta una gran semejanza con el péndulo real, pero hay que considerar que existen dinámicas que no se han modelado adecuadamente como son la fricción y el desgaste del motor, esto nos genera una diferencia en los resultados, además el método de integración utilizado, Runge Kutta 4, no es el más óptimo que existe, sin

embargo el objetivo del simulador es evaluar controladores y mostrar otros fenómenos como es en nuestro caso la dinámica caótica.

5.6. Ventajas y Desventajas del Simulador

Este simulador presenta como aporte una nueva metodología para el desarrollo de simuladores en la materia de control, y esto es principalmente por que se desarrolló en un ambiente WPF (Windows Presentation Foundation). Pero también presenta ciertas desventajas en comparación de otros software de simulación.

■ Ventajas:

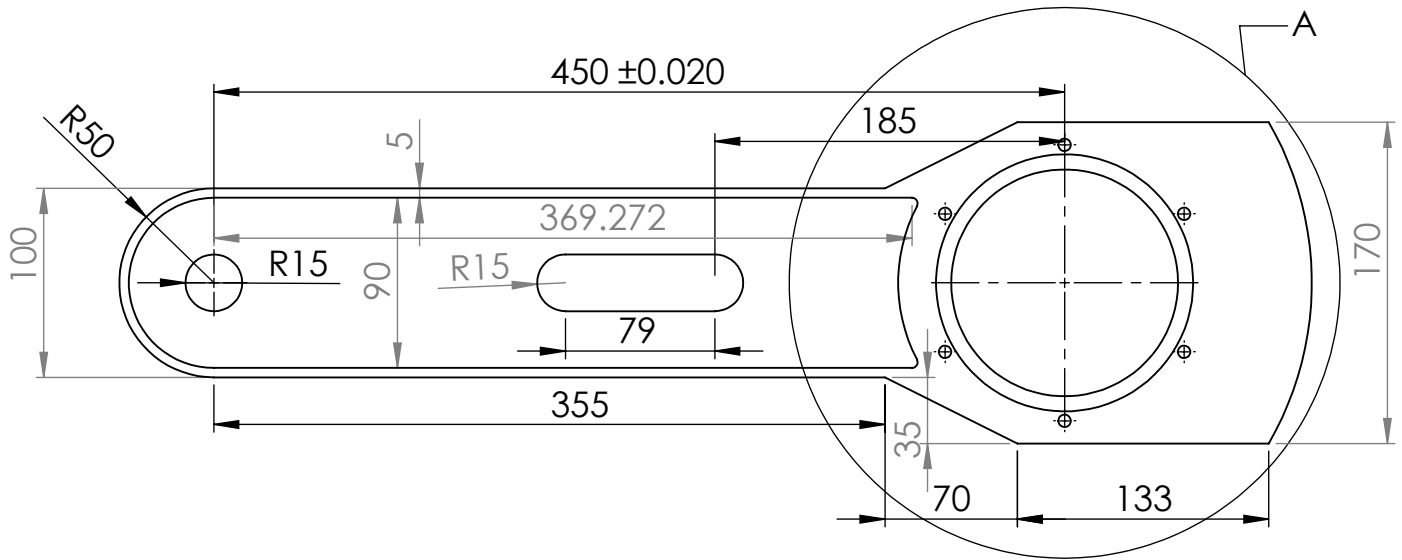
- La renderización (proceso de cálculo complejo desarrollado por un ordenador destinado a generar una imagen 2D a partir de una escena 3D) se realiza utilizando el acelerador gráfico si es que la computadora en donde se instala cuenta con él. Esto incrementa la velocidad y la calidad del programa ya que el procesador de la computadora queda libre de realizar estas complejas operaciones.
- WPF cuenta con animación que se encarga de que el proceso de renderización se realice en el tiempo destinado, esto evita que cada computadora muestre diferente velocidad de animación si su procesador es de diferente capacidad.
- En el proceso de diseño no es necesario incluir por separado cada parte del modelo tridimensional, este se exporta como un ensamble desde el software de diseño, en nuestro caso SolidWorks®, en el formato XAML, este tiene la propiedad de incluir cámara, materiales, luces y otras propiedades. Para importarlo a WPF solo es necesario agregarlo como un elemento, éste se importará como un viewport el cual permite acceder a todas las propiedades del modelo y a cada parte del ensamble.
- Cuenta con un analizador sintáctico que es independiente del modelo dinámico que se desee simular, esto permite al usuario escribir estructuras de control e incluso control de movimiento ya que la posición deseada también puede ser una función matemática.
- Debido a que el software es especializado a comparación de MatLab, su velocidad es superior. Además se cuenta con un método de optimización para las gráficas, lo que permite que los resultados se muestren rápidamente.
- El simulador puede ser publicado como una aplicación de Windows o una aplicación web para internet explorer, esto sin necesidad de realizar algún cambio en el código del programa.

■ Desventajas:

- El uso de esta aplicación está restringido a Windows, a diferencia de utilizar OpenGL, pero actualmente se está desarrollando una adaptación para que pueda ser ejecutado en Unix y Mac.
- El método de integración utilizado es menos óptimo que el ode45 utilizado en MatLab u otros simuladores.
- El modelo dinámico no cuenta con un buen modelo de fricción ya que el utilizado sólo utiliza la fricción viscosa y la de coulomb.
- El usuario no puede modificar el modelo dinámico del sistema, a menos que se le proporcione el código fuente.

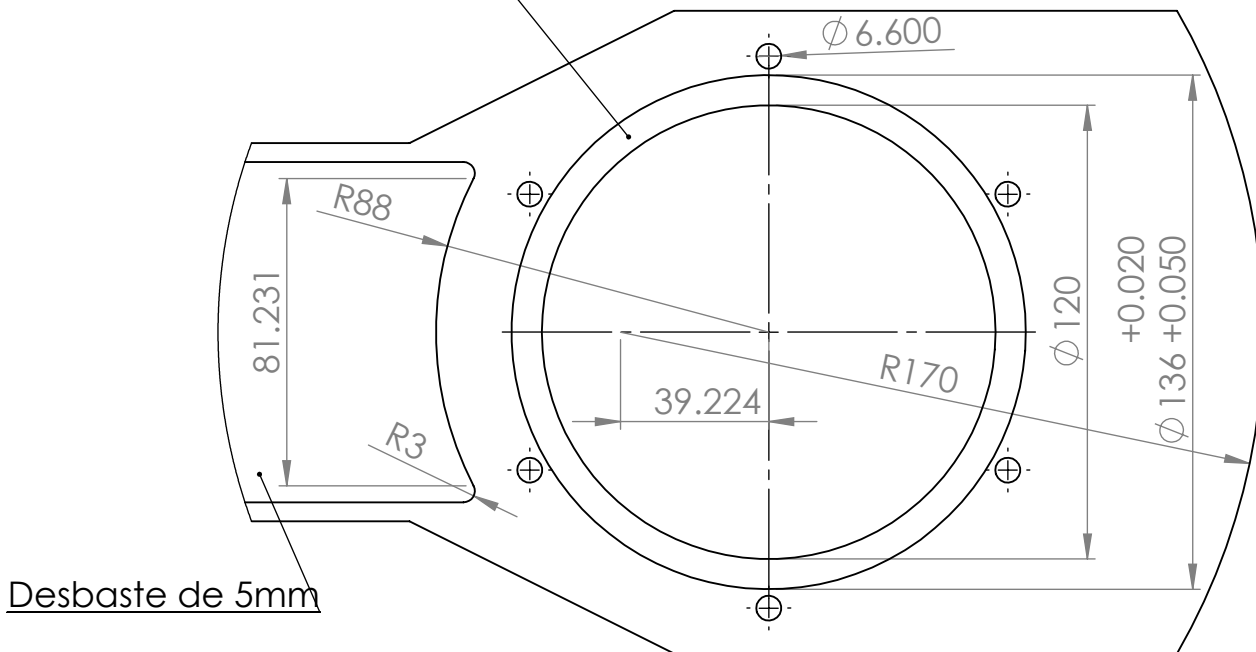
Este simulador fue realizado con la intención de poder realizar diferentes plantas bajo la misma metodología y con la visión de que las aplicaciones de Windows e Internet empiezan a ser desarrolladas en WPF ya que este presenta grandes ventajas en comparación de Windows Forms Application , entre ellas la más importante es la animación. Sin embargo esta tecnología aun esta en desarrollo, esto afecta en el número de herramientas desarrolladas para la programación en WPF, pero haciendo uso de programación más básica en WPF se puede lograr lo mismo que en Windows Form, un ejemplo de esto es el timer, cuando en Windows Form solo es necesario incluir el objeto arrastrándolo desde las herramientas, en WPF es necesario crear el objeto desde código y programar la función del evento.

Vista Posterior



DETALLE A
 ESCALA 1 : 2

Desbaste de 3mm

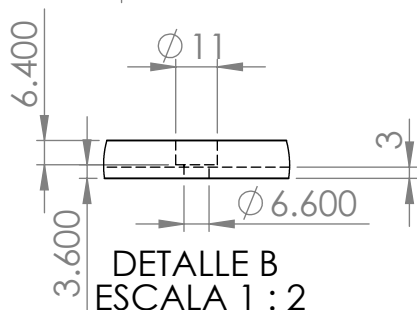
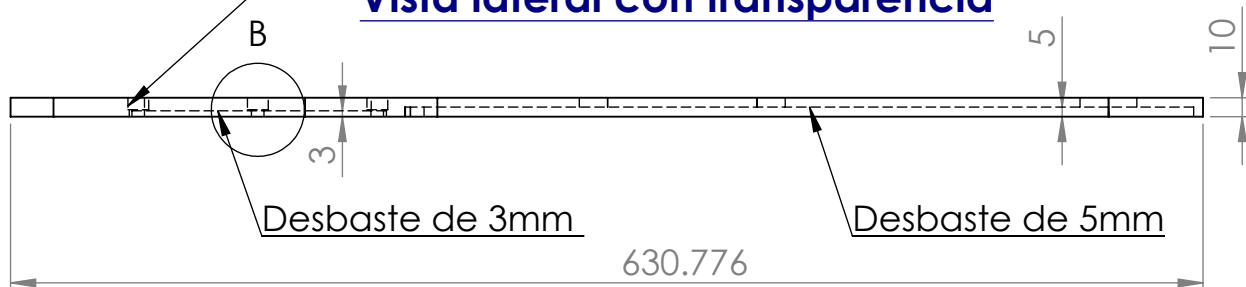


Desbaste de 5mm

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM LAS TOLERANCIAS SON LAS DE LA TABLA		ACABADO:	TOLERANCIAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN A	
Diseño: Ing. Jorge Arturo Mijares Tobias correo: mijares2002@hotmail.com celular: 2223 44 83 98 telefono:(222) 264 0743			Pulido	Medidas Nominales (mm)	Simetrica ± (mm)	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla		
			De 0.5 a 3	0.1				
			De 3 a 6	0.1				
			De 6 a 30	0.2	tÍTULO: Péndulo			
			De 30 a 120	0.3				
			De 120 a 400	0.5				
			De 400 a 1000	0.8				
			De 1000 a 2000	1.2				
			De 2000 a 4000	2				
MATERIAL:	Aluminio 6061-T6	De 4000 a 8000	3	N.º DE DIBUJO 1		Carta		
PESO: 1119 g		De 8000 a 12000	4					
		De 12000 a 16000	5					
				ESCALA:1:10		HOJA 1 DE 2		

Caja para el tornillo M6

Vista lateral con transparencia

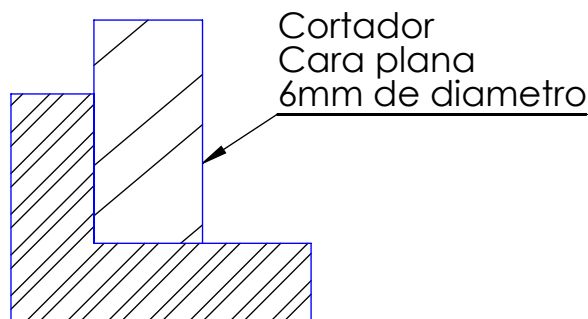


DETALLE B
ESCALA 1 : 2

Ø 6.600 POR TODO

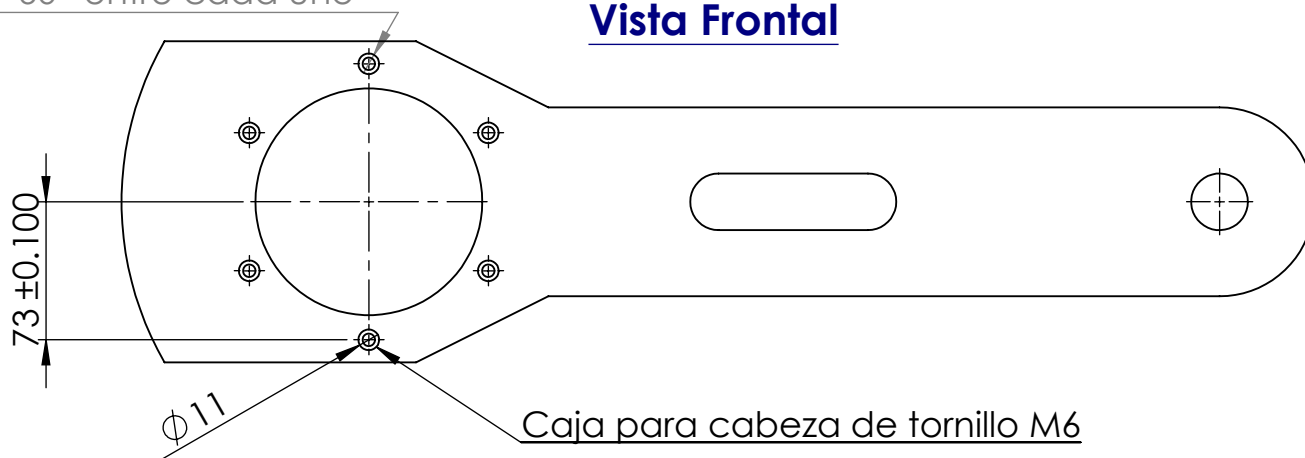
□ Ø 11 ▽ 6.400

Matriz angular en 360°
con $146 \pm .2$ mm de Ø
60° entre cada uno



Vista de sección lateral para
la operación de desbaste

Vista Frontal



Caja para cabeza de tornillo M6

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
LAS TOLERANCIAS SON LAS
DE LA TABLA

ACABADO:

Pulido

TOLERANCIAS

Medidas Nominales (mm)	Simetrica ± (mm)
De 0.5 a 3	0.1
De 3 a 6	0.1
De 6 a 30	0.2
De 30 a 120	0.3
De 120 a 400	0.5
De 400 a 1000	0.8
De 1000 a 2000	1.2
De 2000 a 4000	2
De 4000 a 8000	3
De 8000 a 12000	4
De 12000 a 16000	5

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN A

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Diseño:
Ing. Jorge Arturo Mijares Tobias
correo: mijares2002@hotmail.com
celular: 2223 44 83 98
telefono:(222) 264 0743

TÍTULO:

Péndulo

N.º DE DIBUJO

2

Carta

MATERIAL:

Aluminio
6061-T6

PESO: 1119 g

ESCALA:1:10

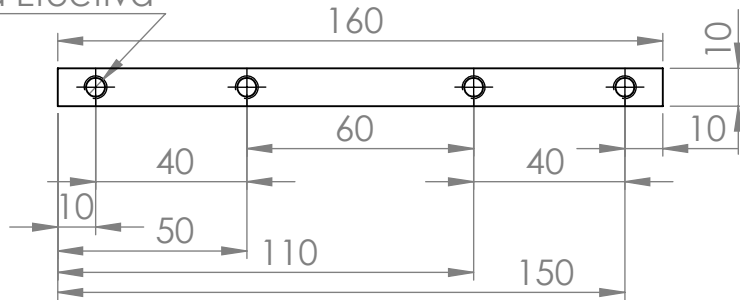
HOJA 2 DE 2

4 x $\varnothing 5 \nabla 37$

M6 - 6H ∇

Rosca Efectiva

Vista Inferior

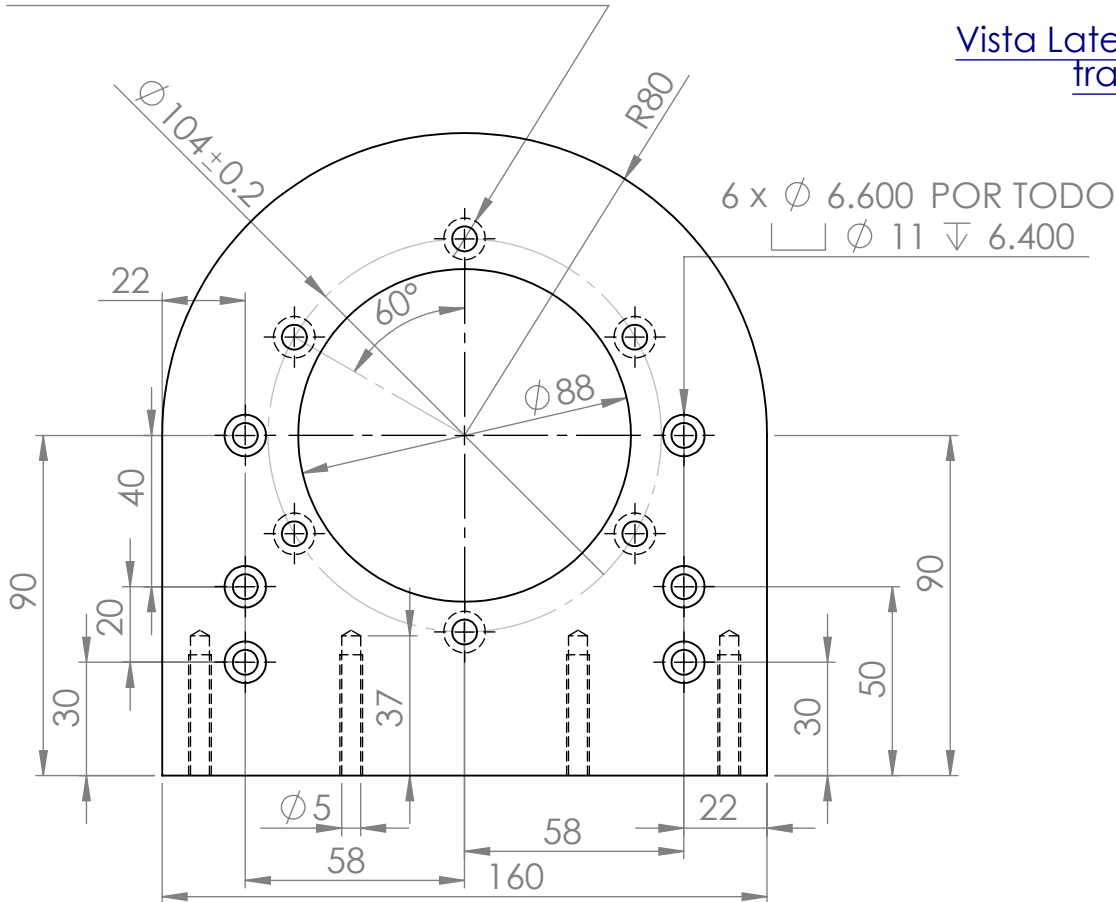


Vista Frontal con Transparencia

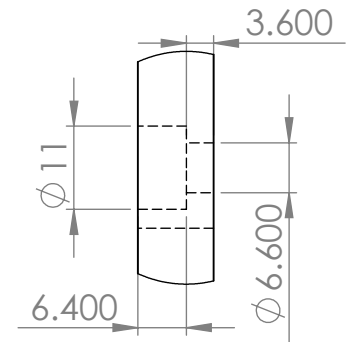
6 x $\varnothing 6.600$ POR TODO

$\square \varnothing 11 \nabla 6.400$ Cara Posterior

Matriz Circular Diametro 104mm

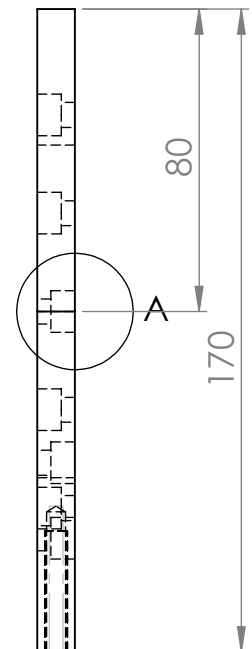


Dimensiones de la caja para tornillo M6



DETALLE A
ESCALA 1 : 1

Vista Lateral Izquierda con transparencia

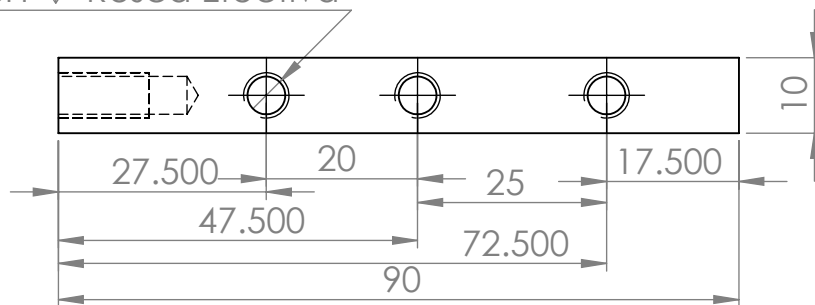


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM LAS TOLERANCIAS SON LAS DE LA TABLA	ACABADO: Pulido	TOLERANCIAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN B	
		Medidas Nominales (mm)	Simetrica ± (mm)	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla			
		De 0.5 a 3	0.1				
Diseño: Ing. Jorge Arturo Mijares Tobias correo: mijares2002@hotmail.com celular: 2223 44 83 98 telefono:(222) 264 0743		De 3 a 6	0.1	TÍTULO: Placa Soporte			
		De 6 a 30	0.2				
		De 30 a 120	0.3				
		De 120 a 400	0.5				
		De 400 a 1000	0.8	N.º DE DIBUJO 3			
		De 1000 a 2000	1.2				
		De 2000 a 4000	2				
		De 4000 a 8000	3				
MATERIAL: Aluminio 6061-T6		De 8000 a 12000	4	Carta			
		De 12000 a 16000	5				
PESO: 457.5 g				ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1	

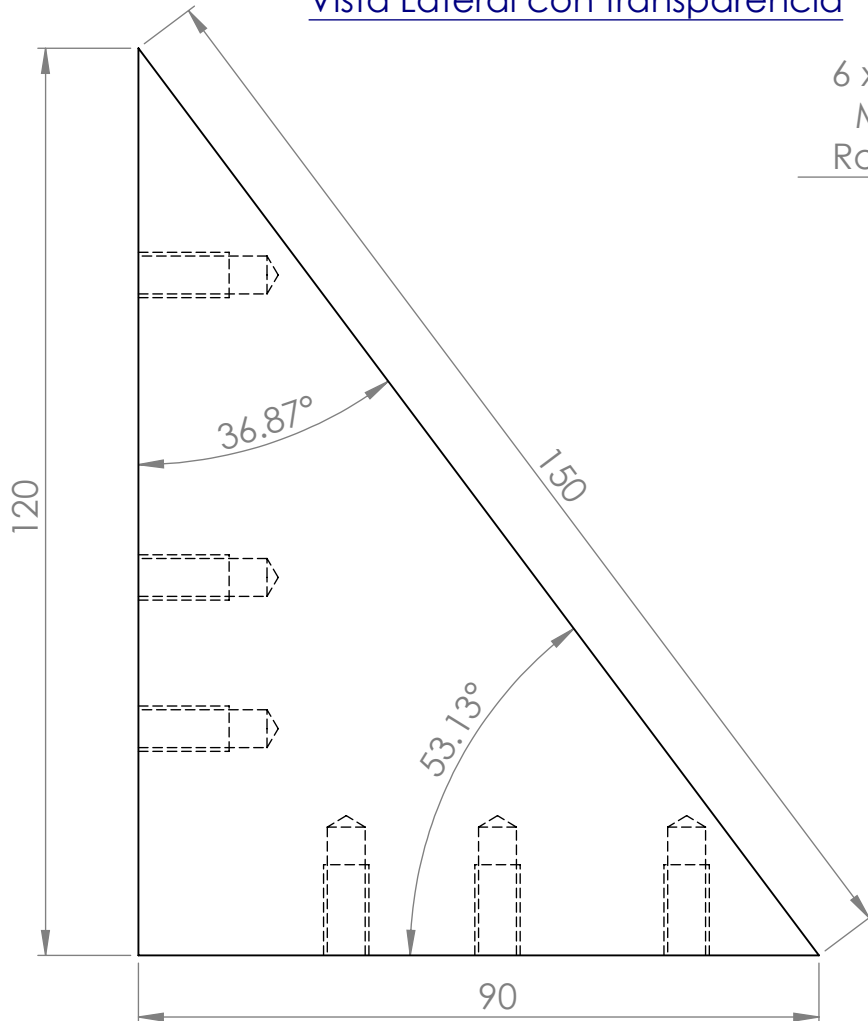
6 x $\varnothing 5 \nabla 17$
M6 - 6H ∇ Rosca Efectiva

Vista Inferior con
transparencia

Todas las perforaciones
de esta pieza son con
roscado interior para
tornillo M6

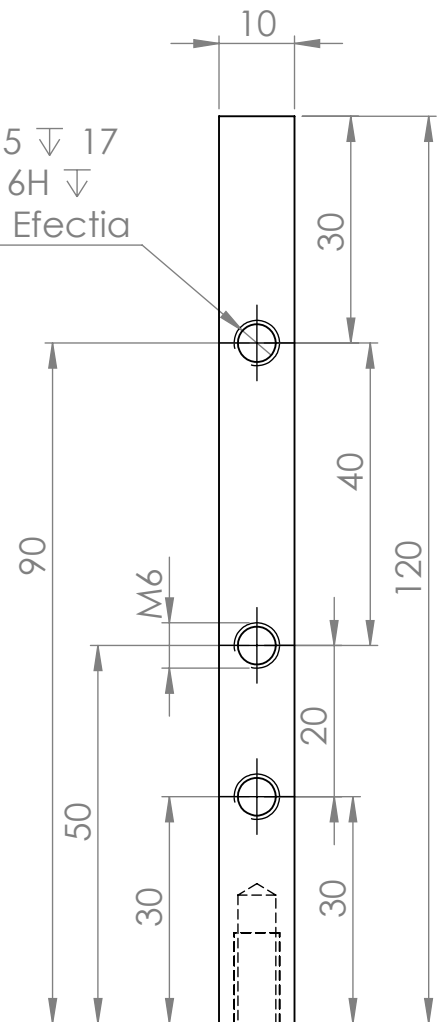


Vista Lateral con transparencia



Vista Frontal con
transparencia

6 x $\varnothing 5 \nabla 17$
M6 - 6H ∇
Rosca Efectiva



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
LAS TOLERANCIAS SON LAS
DE LA TABLA

ACABADO:

Pulido

TOLERANCIAS

Medidas Nominales (mm)	Simetrica \pm (mm)
De 0.5 a 3	0.1
De 3 a 6	0.1
De 6 a 30	0.2
De 30 a 120	0.3
De 120 a 400	0.5
De 400 a 1000	0.8
De 1000 a 2000	1.2
De 2000 a 4000	2
De 4000 a 8000	3
De 8000 a 12000	4
De 12000 a 16000	5

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN B

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Diseño:
Ing. Jorge Arturo Mijares Tobías
correo: mijares2002@hotmail.com
celular: 2223 44 83 98
telefono:(222) 264 0743

MATERIAL:
Aluminio
6061-T6

PESO: 143 g

TÍTULO:

2 Piezas
Escuadra

N.º DE DIBUJO

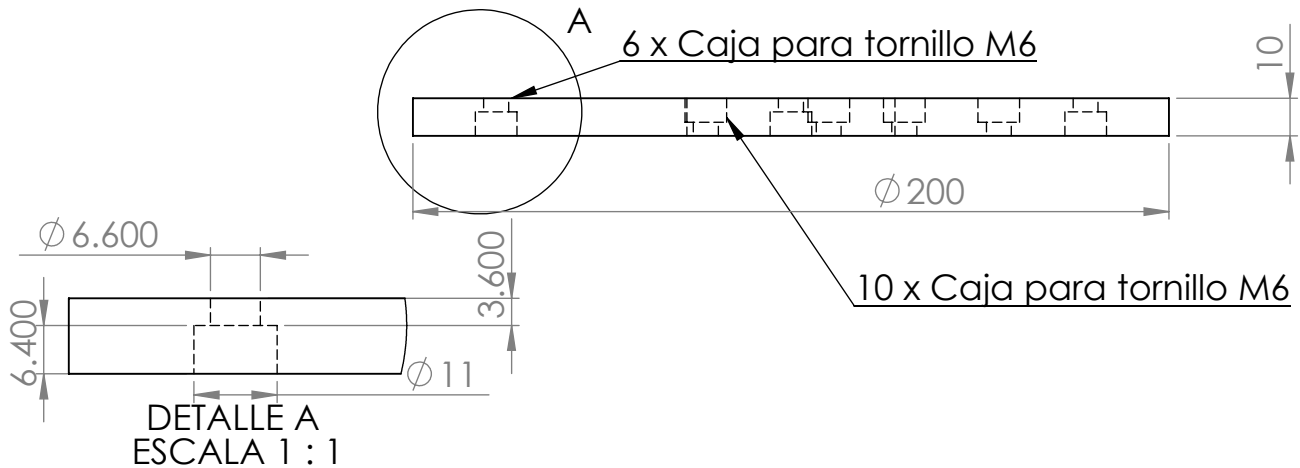
4

Carta

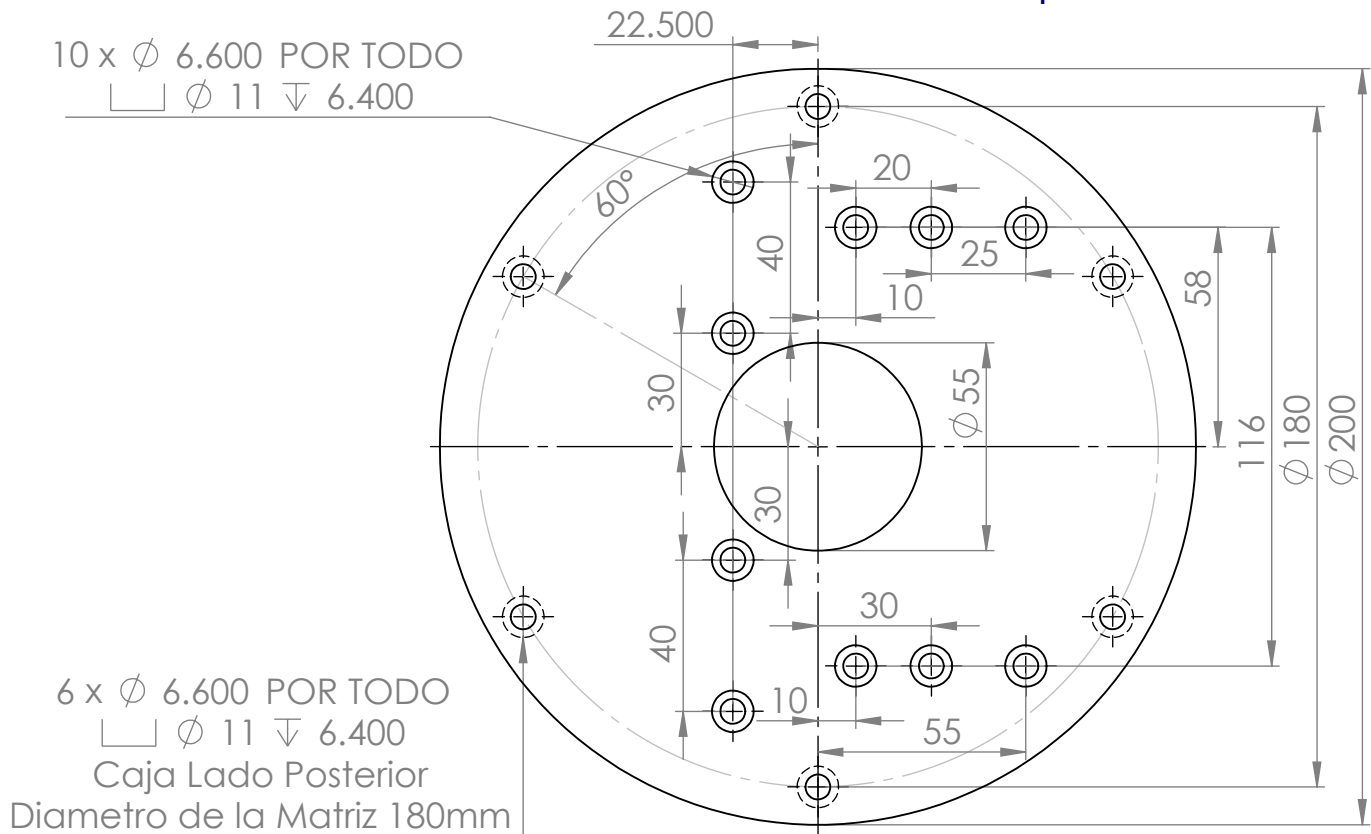
ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1

Vista Superior con transparencia



Vista Frontal con transparencia



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
LAS TOLERANCIAS SON LAS
DE LA TABLA

ACABADO:

TOLERANCIAS

Medidas Nominales (mm)	Simetrica ± (mm)
De 0.5 a 3	0.1
De 3 a 6	0.1
De 6 a 30	0.2
De 30 a 120	0.3
De 120 a 400	0.5
De 400 a 1000	0.8
De 1000 a 2000	1.2
De 2000 a 4000	2
De 4000 a 8000	3
De 8000 a 12000	4
De 12000 a 16000	5

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN B

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Diseño:
Ing. Jorge Arturo Mijares Tobías
correo: mijares2002@hotmail.com
celular: 2223 44 83 98
telefono:(222) 264 0743

MATERIAL:
Aluminio
6061-T6

PESO: 752.5 g

TÍTULO:

Placa Base

N.º DE DIBUJO

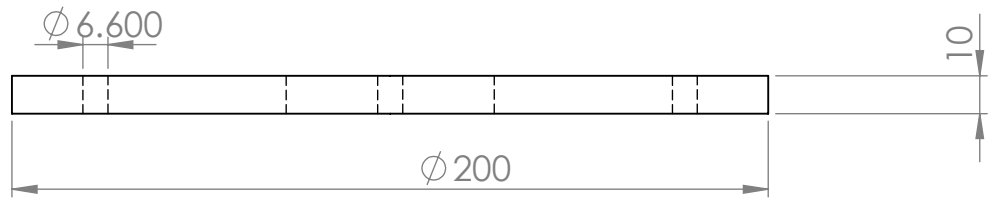
5

Carta

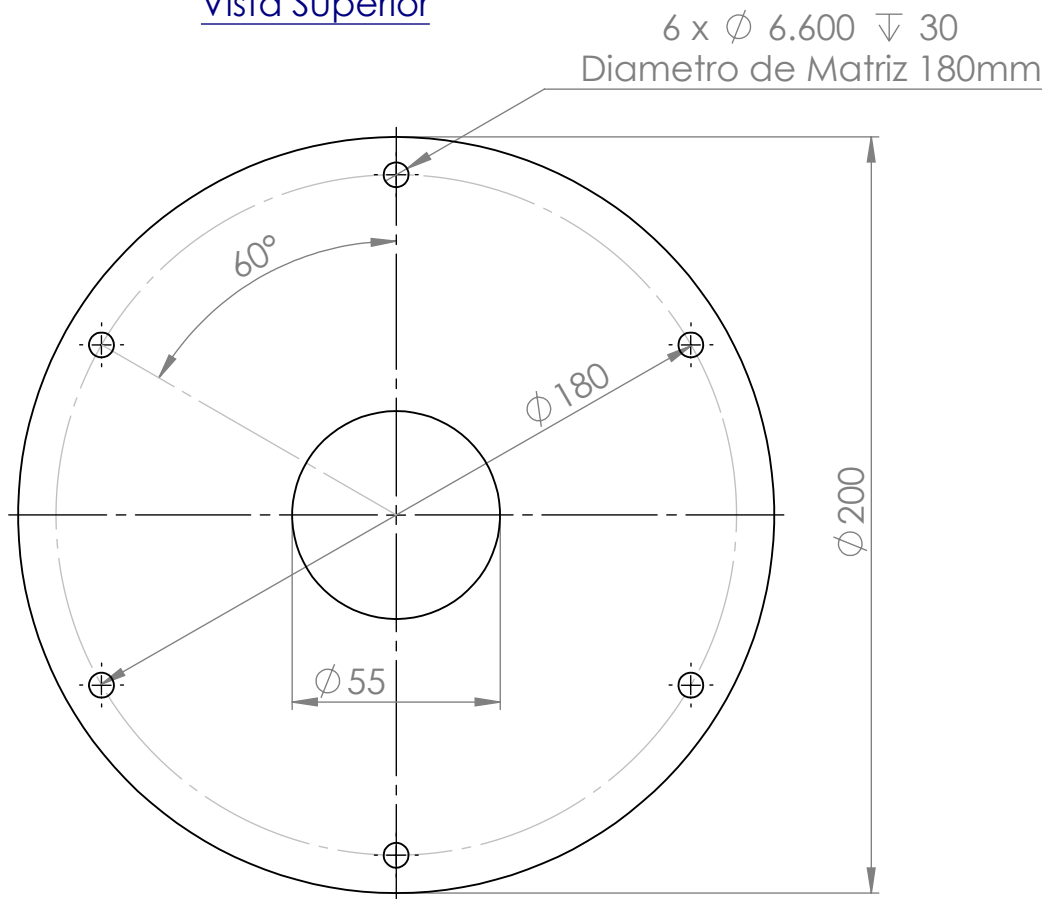
ESCALA:1:2

HOJA 1 DE 1

Vista Lateral con Transparencia



Vista Superior



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
LAS TOLERANCIAS SON LAS
DE LA TABLA

ACABADO:

TOLERANCIAS

Medidas Nominales (mm)	Simetrica \pm (mm)
De 0.5 a 3	0.1
De 3 a 6	0.1
De 6 a 30	0.2
De 30 a 120	0.3
De 120 a 400	0.5
De 400 a 1000	0.8
De 1000 a 2000	1.2
De 2000 a 4000	2
De 4000 a 8000	3
De 8000 a 12000	4
De 12000 a 16000	5

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN B

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Diseño:
Ing. Jorge Arturo Mijares Tobias
correo: mijares2002@hotmail.com
celular: 2223 44 83 98
telefono:(222) 264 0743

TÍTULO:

Base Superior

N.º DE DIBUJO

6

Carta

MATERIAL:

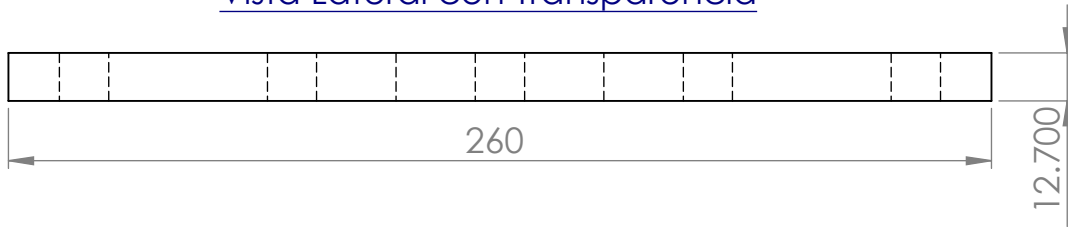
Aluminio
6061-T6

PESO: 778.5 g

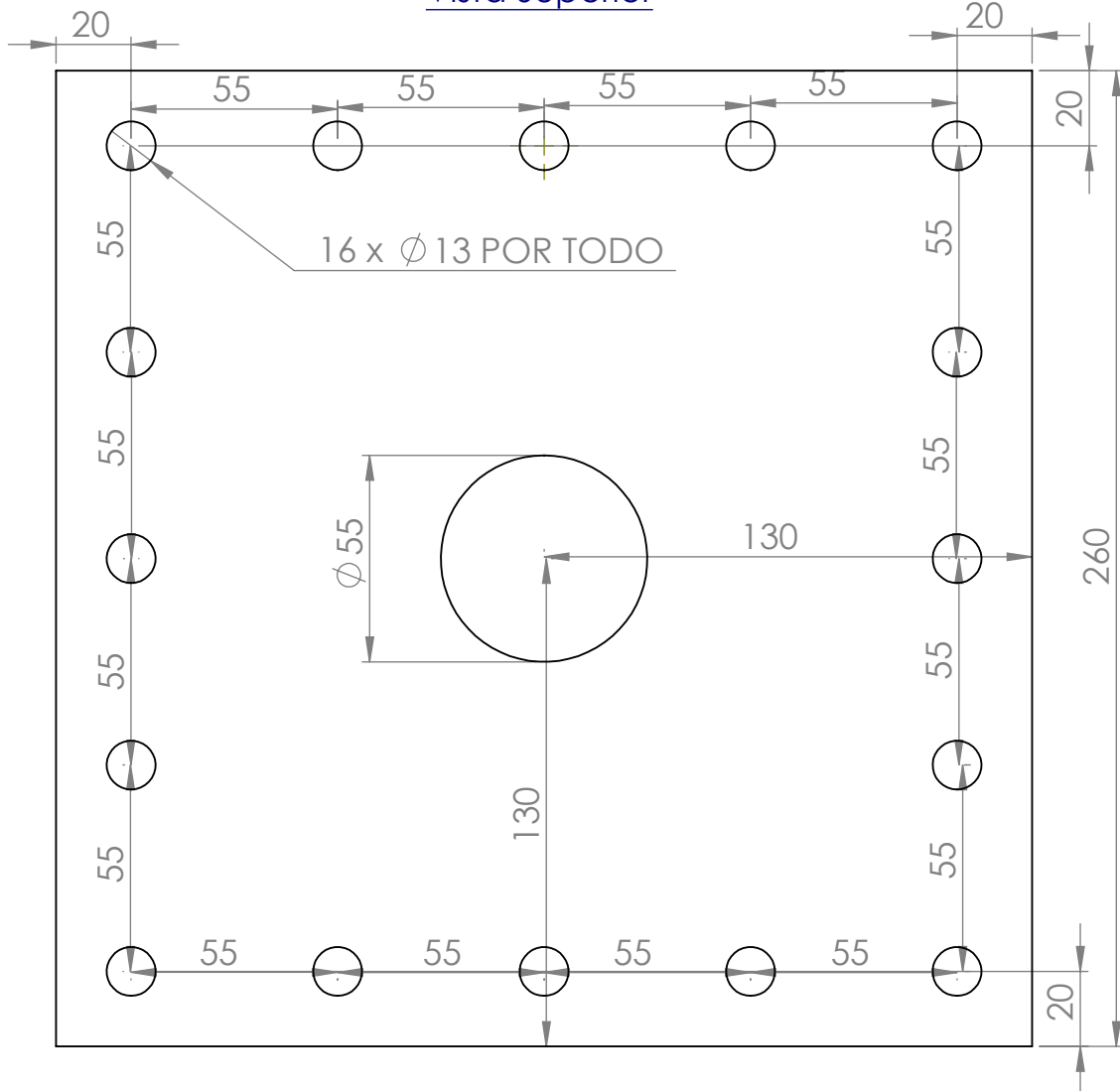
ESCALA:1:5

HOJA 1 DE 1

Vista Lateral con Transparencia



Vista Superior



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
LAS TOLERANCIAS SON LAS
DE LA TABLA

ACABADO:

TOLERANCIAS

Medidas Nominales (mm)	Simetrica \pm (mm)
De 0.5 a 3	0.1
De 3 a 6	0.1
De 6 a 30	0.2
De 30 a 120	0.3
De 120 a 400	0.5
De 400 a 1000	0.8
De 1000 a 2000	1.2
De 2000 a 4000	2
De 4000 a 8000	3
De 8000 a 12000	4
De 12000 a 16000	5

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN A

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Diseño:
Ing. Jorge Arturo Mijares Tobias
correo: mijares2002@hotmail.com
celular: 2223 44 83 98
telefono:(222) 264 0743

TÍTULO:

Base Inferior

N.º DE DIBUJO

7

Carta

MATERIAL:

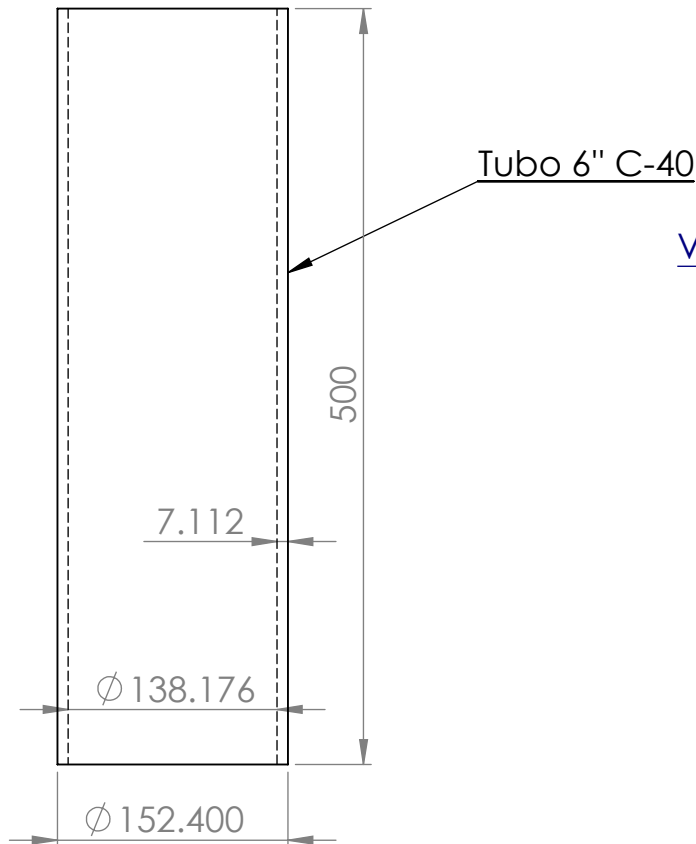
Aluminio
6061-T6

PESO: 2163 g

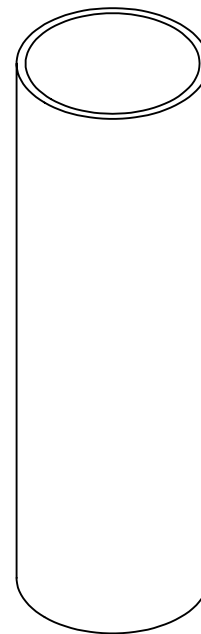
ESCALA:1:5

HOJA 1 DE 1

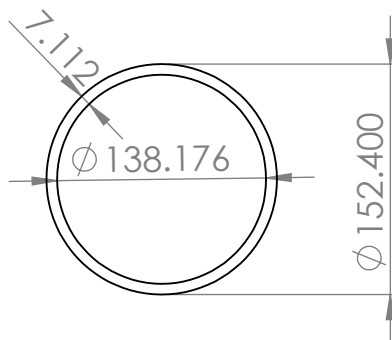
Vista Frontal



Vista Isométrica



Vista Superior



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM LAS TOLERANCIAS SON LAS DE LA TABLA	ACABADO:	TOLERANCIAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN B	
		Medidas Nominales (mm)	Simetrica ± (mm)	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla			
		De 0.5 a 3	0.1				
Diseño: Ing. Jorge Arturo Mijares Tobias correo: mijares2002@hotmail.com celular: 2223 44 83 98 telefono:(222) 264 0743		De 3 a 6	0.1	TÍTULO: Base medio			
		De 6 a 30	0.2				
		De 30 a 120	0.3				
		De 120 a 400	0.5				
		De 400 a 1000	0.8				
		De 1000 a 2000	1.2				
		De 2000 a 4000	2				
		De 4000 a 8000	3				
		De 8000 a 12000	4				
		De 12000 a 16000	5				
MATERIAL:	Aluminio 6061-T6	PESO: 4382 g	ESCALA:1:5	8		Carta	
			HOJA 1 DE 1				