



TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®



Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Ciudad de México

División de Ingeniería y Arquitectura


Proyectos de Ingeniería Mecatrónica II
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica


Perforador Automático de Circuitos

Autores: Diego Santos Burgoa L. 

Proyectos de Ingeniería Mecatrónica I (Ene-Mayo 2004)

Saúl Dufoo Ochoa 

Santiago Sordo Ruiz 

Diego Santos Burgoa L. 

Proyectos de Ingeniería Mecatrónica I (Ago-Dic 2004)

Carlos Méndez 

Alejandro Uribe 

Asesores: Dr. Ernesto Olguín Díaz
M.C. Israel Macías Hidalgo

México D.F. Diciembre de 2004

INDICE

1. INTRODUCCION

1.1 Resumen	1
1.2 Estado del arte	1
1.3 Objetivos y Metas	
O.1 Metas del Primer Semestre	6
O.2 Metas del Segundo Semestre	6
1.4 Análisis Dinámico	7

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Diseño de elementos mecánicos	10
2.2 Control	
2.2.1 Interfase	13
2.2.2 Control de los Ejes	15
2.2.3 Modelo matemático del motor DC	16
2.2.4 Control de Corriente	19
2.2.5 Control de Posición y Velocidad	21
2.3 Fuentes de Energía	
2.3.1 Convertidor Buck	26

3. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

3.1 Mecánica	29
3.2 Obtención de las Plantas de los Motores	34
3.3 Fuentes de Energía	
3.3.1 Simulación	40
3.3.2 LM2678	41
3.4 Electrónica de Potencia	43
3.5 Control de Corriente	44

3.6 Control de Posición y Velocidad	48
4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	
C.1 Conclusiones del proyecto	50
C.2 Alcances a Futuro	51
C.3 Comentarios individuales	51
5. BIBLIOGRAFÍA	54
6. ANEXOS	
A.1 Trabajo del Primer Semestre	56
A.2 Mecánica (Planos)	78
A.3 Códigos G	85
A.4 Motores y Encoders	87
A.5 Sensores y Componentes	88
A.6 Microcontrolador	92
A.7 Interfase	94
A.8 LM2678	96

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo fue realizado en dos semestres y fue constituido por dos equipos diferentes. Los integrantes durante los dos semestres estuvieron constituidos de la siguiente manera:

Semestre Enero-Mayo de 2004

Proyectos de Ingeniería Mecatrónica I

Diego Santos Burgoa L.	719020
Saúl Dufoo Ochoa	719011
Santiago Sordo Ruiz	715384

Semestre Agosto-Diciembre de 2004

Proyectos de Ingeniería Mecatrónica I

Carlos Mendez	718362
Alejandro Uribe	718738

Proyectos de Ingeniería Mecatrónica II

Diego Santos Burgoa L.	719020
------------------------	--------

Nota: El trabajo realizado durante el Semestre Enero-Mayo de 2004 se encuentra en el Apéndice A1. El trabajo realizado por cada integrante durante el semestre Agosto-Diciembre de 2004 se encuentra en Conclusiones y Comentarios.

1.1 Resumen

En este escrito se presenta un método para la construcción de una perforadora automática de circuitos impresos (PCB MILL). La finalidad es crear una mesa de coordenadas que se mueva de manera automática perforando tarjetas de circuitos impresos. Se muestra la teoría de diferentes áreas a desarrollar (Mecánica, Control, Electrónica y Eléctrica) y los resultados de la implementación teórica.

1.2 Estado del arte [12, 13, 14]

Las PCB's o tablillas de circuitos impresos son utilizadas ampliamente en el campo de la ingeniería eléctrica para conectar componentes entre sí. Comúnmente, después de que una tablilla se ha diseñado, se mandan los archivos a una empresa para que se pueda manufacturar y después regresarlos al diseñador. Cuando se está realizando el prototipaje, los gastos por demoras en términos de tiempo, pueden incrementarse demasiado, reduciéndose en días o hasta semanas de tiempo muerto, dependiendo de la manufactura. Si esto no es suficiente para reflexionar acerca de los costos, hay que recordar que la mayoría de las veces, el diseño tenía un error que se detectó ya que se envió el diseño, y hay que corregirlo y mandarlo a manufacturar de nuevo.

La ventaja de una "PCB Mill" radica en la posibilidad de tener el prototipo en unas cuantas horas, y a un precio mucho menor comparado con la manufactura externa. El precio actual de una "PCB Mill" comercial es de alrededor de US\$10,000, que es una cantidad bastante significativa para pequeños laboratorios o personas deseando un

prototipaje rápido. Los conceptos más básicos de utilizados para realizar un dispositivo perforador, son un mecanismo de movimiento a base de tornillos sin fin o de bandas y poleas, una combinación de ejes, X y Y, un control muy preciso y exacto de motores (ya sean motores a pasos o de DC con un encoder para la posición), y un controlador para posicionar correctamente el taladro.

Para cada eje, X, Y y Z, un motor es acoplado al tornillo sin fin o a la polea. Mientras el motor gira una guía montada en el mecanismo tendrá un movimiento unidimensional hacia delante o hacia atrás, dependiendo del sentido de giro del motor. Combinando el eje X y Y, se crea un plano XY bidimensional, esto nos permite posicionar la plataforma en cualquier punto dentro de los rangos establecidos. El eje Z y la tercera dimensión se consigue montando el taladro por separado encima de todos estos mecanismos.

Existen diferentes configuraciones de los dispositivos perforadores, en donde varía la estabilidad, vibraciones, tamaño final del mecanismo, cantidad de partes y masas en movimiento, facilidad de construcción, peso, costos, tiempo de fabricación, etc. Los diferentes modelos a considerar se muestran a continuación:

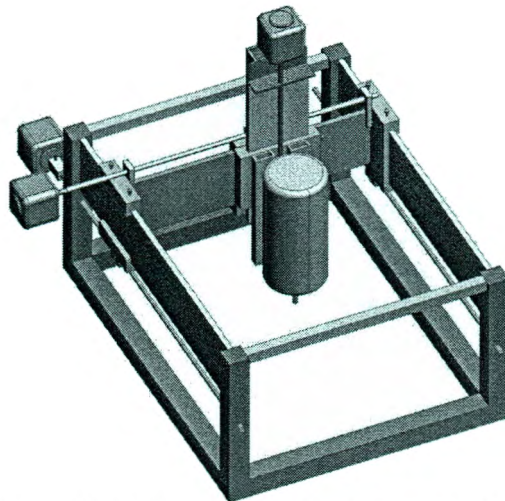


Figura I.2.1 "Taladro en Movimiento (3 ejes)"

La configuración mostrada en la Figura I.2.1 mantiene fija la mesa de trabajo, moviendo únicamente el taladro en los 3 ejes.

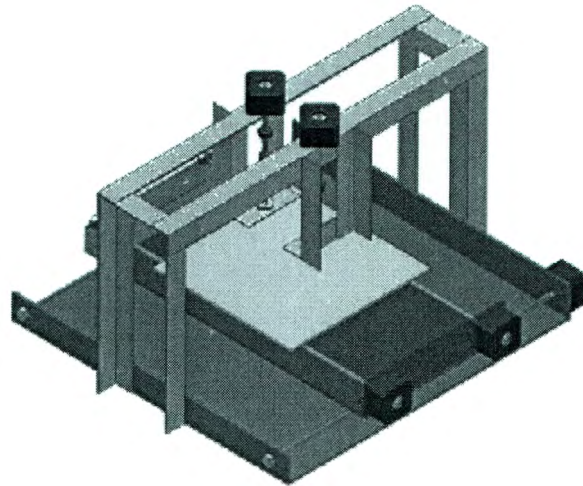


Figura I.2.2 “Mesa en movimiento (2 ejes) y Taladro (1 eje)”

En esta configuración, la mesa se desplaza en los ejes X y Y, y el taladro únicamente en el eje Z, como se observa en la Figura I.2.2.

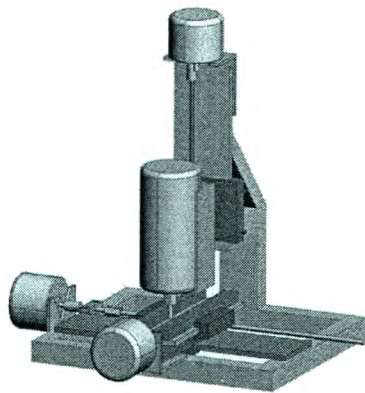


Figura I.2.3 “Mesa en movimiento (2 ejes) y Taladro (1 eje)”

En la Figura I.2.3 se puede apreciar una configuración similar a la anterior, asemejándose a un taladro de banco, en el que se puede desplazar en X y Y la mesa y en Z el taladro.

En la manufactura de circuitos impresos un material conductor es dibujado en la superficie de un plástico reforzado de fibra, posteriormente se hacen pequeños barrenos a través del conductor y el plástico. Para asegurar el contacto eléctrico la soldadura debe rodear por completo la superficie del barreno para unir los elementos con el conductor y éstos hagan contacto correctamente.

Es por esto que el agujero creado debe tener un tamaño regular en la tarjeta, una superficie suave y libre de rebabas, y sobre todo una buena colocación respecto al material conductor. Todo lo anterior requiere técnicas de barrenado avanzadas.

La tecnología utilizada actualmente para obtener esta precisión es por medio del Control Numérico Computarizado (CNC) para localizar automáticamente la posición exacta de

los puntos de barrenado. Todo esto es controlado por medio de una computadora en la cual se puede hacer el diseño de una tarjeta en un programa CAM (Computer Aided Manufacturing). Después de hacer el diseño la computadora se encarga de mandar la información de localización a la máquina la cual traduce las coordenadas y manda las señales pertinentes a los motores.

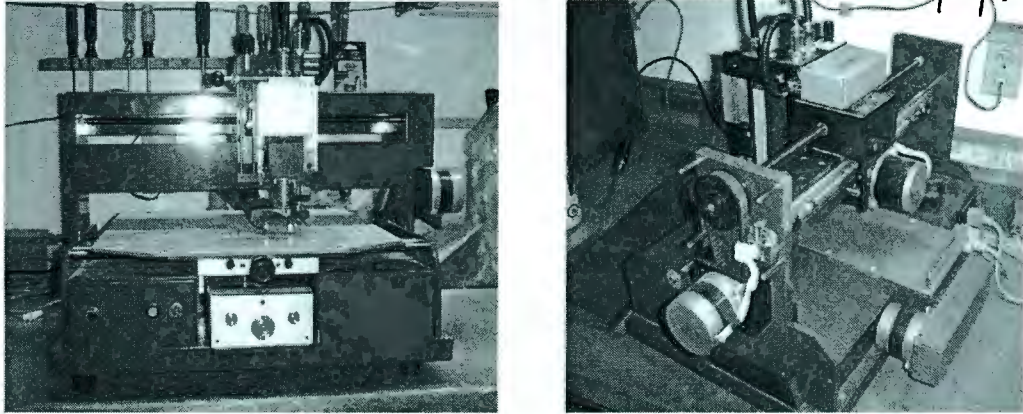


Figura I.2.4 "Máquina Perforadora CNC"

Los motores utilizados son servos o motores de pasos porque son fáciles de controlar y pueden proporcionar el torque y la precisión adecuadas. La etapa de Potencia esta hecha por medio de puentes H.

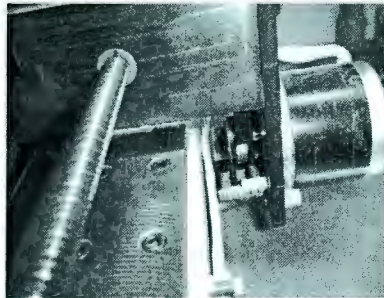


Figura I.2.5 "Acercamiento del Motor"

En la foto anterior podemos ver el motor de pasos de una máquina perforadora para mover el eje X. también podemos observar un tornillo sin fin con el cual se realiza el corrimiento sobre los rieles. La posición en los ejes es sensada por medio de switches de límite y sensores infrarrojos.

Las brocas utilizadas está hechas por medio de aceros rápidos para soportar el impacto, los diámetros pueden ser tan pequeños hasta de .005 pulgadas.

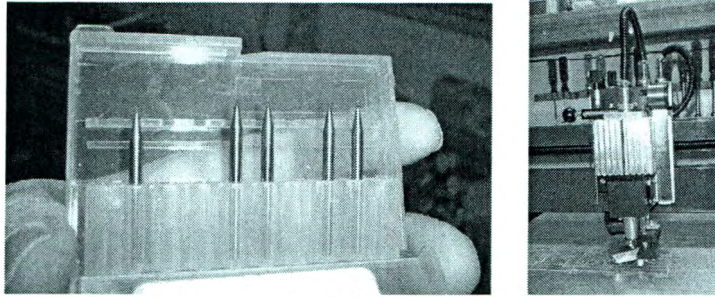


Figura I.2.6 "Brocas y Husillo"

El motor del husillo es un motor de inducción ya que se necesitan altas revoluciones además de un buen torque. Este motor que podemos ver en la foto alcanza 64, 000 rpm. Las tarjetas que perfora esta máquina quedan de la forma presentada en la Figura I.2.7. Esta máquina también realiza el fresado para las pistas del material conductor y puede también hacer el grabado de texto sobre la tarjeta

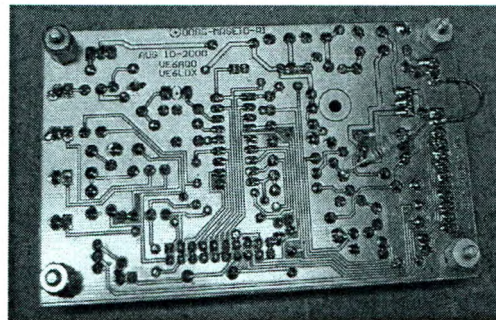


Figura I.2.7 "Tarjeta impresa"

1.3 Objetivos y Metas

- Realizar un análisis teórico para la construcción de una perforadora automática de circuitos.
- Implementar el análisis teórico en la creación de un prototipo práctico y funcional para cualquier usuario.

O.1 Metas del Primer Semestre (Ene-Mayo 2004)

- Investigar acerca de diferentes tipos de PCB Mill
- Definir tiempos y el alcance a desarrollar
- Definir el tipo de estructura a desarrollar
- Diseño mecánico de la estructura
- Análisis Dinámico del sistema
- Definir materiales a utilizar
- Calculo de potencia de los motores
- Definir sensores a utilizar
- Definir el protocolo de interfase a utilizar

O.2 Metas del Segundo Semestre (Ago-Dic 2004)

- Diseño del sistema mecánico
- Diseño de la etapa de control
- Diseño de la fuente de energía
- Diseño de la etapa de potencia
- Definir el protocolo de comunicaciones entre la GUI (interfase) y el Hardware.
- Obtención de materiales
- Implementación del diseño mecánico
- Obtención de parámetros de los motores
- Implementación de la fuente de energía
- Implementación de la etapa de potencia
- Implementación de la etapa de control
- Acoplamiento de sensores y motores
- Acoplamiento del Hardware con la interfase

1.4 Análisis Dinámico

Durante el primer semestre (Ene-Mayo 2004) se realizó una investigación acerca de los diferentes tipos de perforadoras automáticas para circuitos. Se propuso como alcances el realizar una mesa de coordenadas X,Y,Z con todo su análisis Mecánico y Dinámico, crear un sistema de control para manejar automáticamente la mesa de coordenadas y crear una interfase GUI donde se pudiera interpretar un programa de circuitos impresos y mandar una señal a la etapa de control de la mesa de coordenadas. Esta última parte del trabajo (interfase), al final del semestre, se tuvo que dejar como propuesta a trabajo a futuro por cuestiones de tiempo.

Primero se realizó un diseño mecánico de la mesa de coordenadas X,Y,Z del sistema más adecuado, donde se obtuvieron el tipo de material a utilizar así como las dimensiones y la estructura de la mesa de coordenadas. Después de esto, se realizó un análisis dinámico del sistema para calcular las fuerzas que se iban a llevar a cabo en la mesa utilizando el método de Euler-Lagrange que se basa en el análisis por medio de coordenadas generalizadas.

Una vez obtenidas las fuerzas respecto a la posición, velocidad y aceleración del sistema, se puede calcular el torque necesario para mover la mesa de coordenadas. Para esto, primero se llevó a cabo un análisis de generación de trayectorias que nos muestra la posición, velocidad y aceleración para todo tiempo en un movimiento de la mesa de coordenadas. Tomando en cuenta esta generación de trayectoria en los resultados obtenidos en la ecuación Euler-Lagrange, se calculó el torque necesario para mover la mesa en todo tiempo. El punto máximo de torque durante este tiempo es el torque necesario que requieren nuestros motores.

Un punto importante que se investigó fue el tipo de sensores a utilizar en la máquina. Se vio que se necesitan sensores para calcular la posición de la mesa, así como sensores para mandar la mesa a posición cero (Home).

Resultados obtenidos:

- Diseño de la mesa de coordenadas (Figura 1.1.1)

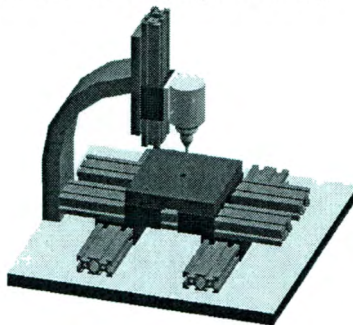


Figura 1.1.1 "Mesa de coordenadas"

- Perforar una tarjeta de máximo 20cm x 20cm
- Materiales a utilizar:
 - Aluminio para los rieles (cinco rieles de 50cm cada uno)

- Nylamid para las correderas (debido a la baja fricción que tiene con el aluminio)
- Tres tornillos sin fin con un paso de 4mm
- Un Motor para cada eje X,Y,Z
- Taladro para perforar de menos de 1Kg de peso
- Análisis Dinámico del sistema:

$$M \ddot{z} + B \dot{z} + m_1 g = \frac{1}{n} \tau_z$$

T_m = torque del motor

n = paso del tornillo sin fin

m_t = masa del taladro

g = gravedad

B = fricción viscosa

$M = m_t + 1/J$ (Masa total a mover)

q = coordenada generalizada

La ventaja en el eje X y Y es que se mueve en un eje perpendicular a la gravedad por lo que el torque es mucho menor y solo nos queda:

$$M_x \ddot{x} + B_x \dot{x} = \frac{1}{n} \tau_x$$

$$M_y \ddot{y} + B_y \dot{y} = \frac{1}{n} \tau_y$$

- Generación de trayectorias
Utilizando una ecuación de 5to orden para que su velocidad y aceleración no tengan discontinuidades y calculando los coeficientes del polinomio donde el desplazamiento máximo a mover es de 25cm en un tiempo de 4 segundos.

$$\theta_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 + a_4 t_f^4 + a_5 t_f^5$$

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{20\theta_f - 20\theta_0}{2t_f^3} \\ \frac{30\theta_0 - 30\theta_f}{2t_f^4} \\ \frac{12\theta_f - 12\theta_0}{2t_f^5} \end{pmatrix}$$

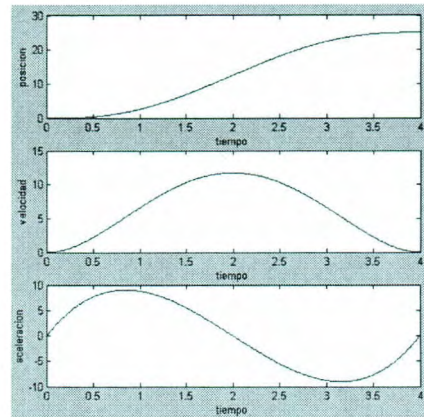


Figura 1.1.2 "Coordenadas Generalizadas"

- Calculando la potencia del motor más grande (130W) utilizando Matlab-Simulink

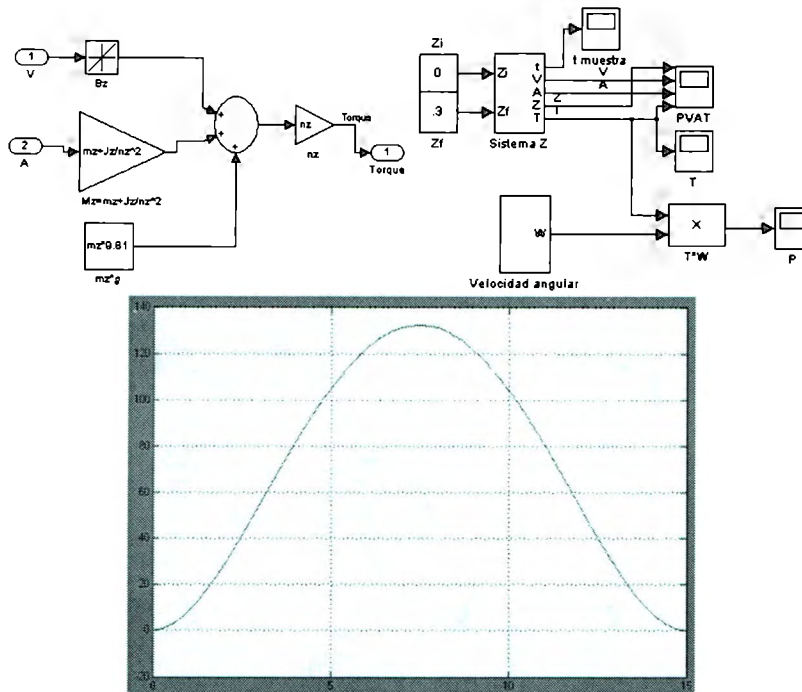


Figura 1.1.3 “Potencia del motor más grande”

- Sensores a utilizar
 - Encoders para los motores
 - Sensores de limite para posición cero en los tres ejes X,Y,Z.

(El trabajo realizado durante el primer semestre (Ene-Mayo 2004) se encuentran en el Apéndice A1)

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Diseño de elementos mecánicos. [5]

Para la realización de la mesa de coordenadas se partió de la idea de generar dos ejes de movimiento horizontal (X,Y) que ubicaran la tarjeta en la posición deseada y un eje de movimiento vertical (Z) para la perforación de la tarjeta una vez ubicada por los ejes de movimiento horizontales.



Figura 2.1.a "Mesa de Coordenadas ejes X y Y"

Para generar dicho movimiento se estableció el uso de motores, de manera que se tiene un motor por cada eje de movimiento. Una vez teniendo los motores se pensó en la manera de transformar el movimiento angular en lineal para obtener el deslizamiento de la mesa. La solución al problema fue el uso de tronillos sin fin acoplados al motor. El giro del tornillo alrededor de su eje produce el movimiento lineal de avance, que lo acerca o lo separa de la tuerca, fija. El mecanismo es capaz de ejercer grandes presiones en el sentido de avance del tornillo es por esto que se usa para construir mesas de banco. Hay diferentes tipos de tornillos y tuercas, para este caso se escogió una cuerda de sección cuadrada ya que con ésta podemos ejercer mayores fuerzas que con una sección triangular, además de que se tiene menos juego mecánico y menor fricción.

Un parámetro característico es el número de entradas o surcos (hélices independientes) del tornillo. En tornillos de una sola entrada, el paso (p) de rosca del tornillo coincide con el avance del tornillo producido al girar 360° alrededor de su eje. Por lo tanto, las velocidades cumplen la siguiente relación:

$$v = \omega p / (2\pi)$$

Donde:

v : velocidad de avance del tornillo

ω : velocidad de giro del tornillo

p : paso de la rosca

La velocidad máxima a la que se mueven los motores a 24V es de 1500 rpm. Es decir que:

$$? = 1500/60 = 25\text{rps} * 2 p$$

al eliminar $2p$ y multiplicar por el paso (4mm) tenemos que la velocidad máxima lineal es de 100 mm/s ó 0.1 m/s.

En el tornillo sin fin de la mesa de coordenadas se tienen 4mm de paso, por lo que se necesita $\frac{1}{4}$ de giro para obtener un avance lineal de 1mm, es decir, 45° del giro del motor.

La mesa de coordenadas está formada por rieles de aluminio con el perfil 12-428 (Figura 2.1.b) de Parker Automation sobre los cuales se deslizan las correderas manufactureras por los mismos miembros del equipo, se escogió este material debido a su resistencia, bajo peso, y relativamente bajo costo.

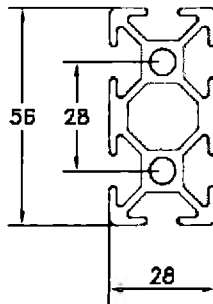


Figura 2.1.b "Perfil 12-428"

Estos rieles están especialmente diseñados para soportar grandes deflexiones. Las especificaciones de estas piezas proporcionadas por el proveedor son las siguientes:

Material	Aluminio
Peso del Perfil	1.53 Kg/m
Momentos de Inercia	$I_x = 16.56 \text{ cm}^4$ $I_y = 4.67 \text{ cm}^4$
Esfuerzo de Fluencia (0.2%)	240 N/mm ² (psi)

Tabla 2.1.a "Materiales"

Tomando en cuenta que los rieles de los ejes horizontales son de 50 cm tendríamos un peso por riel de 0.765 Kg. Los rieles **inferiores** no están sometidos a deflexión ya que están totalmente apoyados a la mesa. El proveedor de los rieles nos proporciono un software de análisis de esfuerzos para sus perfiles dada una longitud y una fuerza concentrada o distribuida.

Utilizando su software y suponiendo una carga concentrada y sobrada de 100Kg por el eje Vertical con un factor de seguridad igual a uno, obtuvimos los siguientes resultados para los rieles **superiores**:

Deflexión Máxima (mm)

<i>Soportado en ambos extremos</i>	<i>0.22</i>
<i>Fijo en un extremo</i>	<i>3.54</i>
<i>Fijo en dos extremos</i>	<i>0.06</i>

Esfuerzo Máximo (N/mm²)

<i>Soportado en ambos extremos</i>	<i>20.8</i>
<i>Fijo en un extremo</i>	<i>83.3</i>
<i>Fijo en dos extremos</i>	<i>10.4</i>

Tabla 2.1.b "Tablas de deflexión y esfuerzo"

Con estos datos podemos ver que los esfuerzos en los rieles superiores tienen poco efecto en la deflexión y que poco se acercan al esfuerzo de fluencia del material.

En cuanto a las correderas que se deslizan sobre los rieles es importante mencionar que estas cuentan con 4 elementos de nylamid que hacen contacto con el aluminio del riel. La idea de esto es reducir la fricción entre los metales para reducir al mismo tiempo las fuerzas que actúan en contra del movimiento y por lo tanto no demandar mucho torque ni corriente de los motores.



Figura 2.1.c "Corredera y Riel"

Las correderas son las que finalmente realizan el movimiento rectilíneo requerido (Figura 2.1.c) y de esta manera se logra tener una mesa que se mueve en 2 ejes horizontales (uno sobre otro). En la superficie de esta mesa se colocó una placa de aluminio que es la mesa de trabajo sobre la cual se coloca la tarjeta de circuitos a ser perforada.

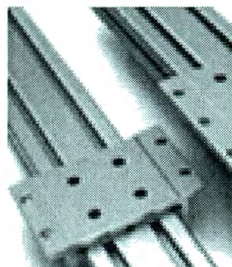


Figura 2.1.d "Corredera"

2.2 Control

2.2.1 Interfase. [33]

Lo primero que se realizó fue el protocolo de comunicación entre la interfase con el control de la mesa. Esto tiene que ver con la relación mecánica del sistema y los sensores de los motores a utilizar. Los sensores a utilizar fueron encoders de 500 (variable e) pulsos por vuelta y los tornillos sin fin a utilizar fueron de 4mm (variable n) de paso. La tarjeta a perforar se diseñó para 200mm (variable d) en cada eje como máximo por lo que la precisión de los sensores esta dada por un **perf** (variable utilizada para expresar la distancia a recorrer por cada pulso del encoder).

$$\text{Vueltas en 20cm} = v = \frac{d}{n} = \frac{200\text{mm}}{4\text{mm}} = 50 \text{ vueltas}$$

$$\text{Pulsos en 20cm} = p = e \cdot v = 25,000 \text{ pulsos}$$

$$\text{Perf} = \frac{p}{d} = 0.008\text{mm} = \mathbf{8 \mu\text{m}}$$

La precisión que nos pueden dar los sensores esta dada por 8 μm . Si la distancia máxima a recorrer es de 20cm, entonces tenemos 25,000 perfs en 20cm, por lo tanto la interfase se calculó que fuera capaz de mandar 25,000 posiciones diferentes. Se realizó el análisis de los bytes necesarios para mandar 25,000 posiciones:

14 bits = 16,383 diferentes combinaciones o números

15 bits = 32,767 diferentes combinaciones o números

Con esto sabemos que si 1 Byte tiene 8 bits, necesitamos 2 Bytes para completar los 15 bits necesarios. Es decir, la interfase se realizó para poder mandar 2 Bytes de comunicación.

Una vez realizado este análisis, se hizo un esquema de cómo debe funcionar la máquina (Figura 2.2.1.a)

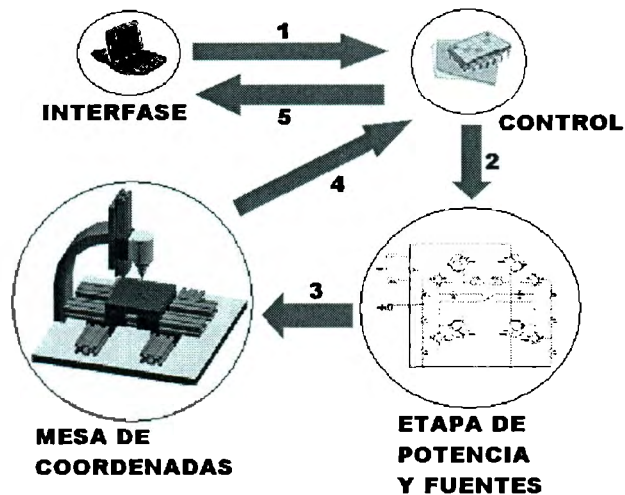


Figura 2.2.1.a "Diagrama de Control General"

1. La interfase manda una señal de posición en 2 Bytes así como la acción a realizar (perforar o no perforar). El sistema de control recibe la señal, implementa el control del motor para mover a la posición deseada.

2. El sistema de control manda la señal de posición controlada a la etapa de potencia que esta conectada a la fuente de energía. Primero lo hace para los ejes X y Y, y si es necesario, al terminar de posicionar el eje X y Y, lo hace para el eje Z.

3. La etapa de potencia manda el voltaje y corriente a la mesa de coordenadas donde se encuentran los motores de cada eje.

4. Los sensores de los motores mandan la señal de posición de regreso al sistema de control. El sistema de control deja de mandar señal a la etapa de potencia cuando el error es cero, es decir, cuando llegó a la posición deseada. Si la interfase mandó la señal de perforar, entonces al llegar a la posición deseada en el eje X y Y el sistema de control repite los pasos 2, 3 y 4 pero para el eje Z hasta llegar a la posición deseada, es decir, hasta que haya perforado.

5. El sistema de control manda una señal a la interfase de que su acción ha sido realizada y el sistema de control espera a recibir el siguiente comando de la interfase. Cuando existe un comando de error en la mesa de coordenadas, manda una señal a la interfase para terminar el proceso.

Comandos:

- Home: Se lleva acabo al encender la maquina. Los motores se mueven en una dirección hasta llegar a un sensor de límite en cada eje. Una vez activados los sensores de límite, las variables de posición en cada eje se reinician a 0. Si la interfase quiere mandar la señal de Home, solo tiene que mandar la posición 0 en cada eje.
- Posicionar: Se lleva acabo al momento en que la interfase manda una señal en 2 Bytes (para cada eje) de la posición en el eje X, Y además de 1 bit de la señal

perforar. La mesa de coordenadas se mueve a la posición deseada y luego lee el bit de perforar el cual se encuentra desactivado.

- Posicionar y perforar: Se lleva acabo al momento en que la interfase manda una señal en 2 Bytes (para cada eje) de la posición en el eje X, Y además de 1 bit de la señal perforar. La mesa de coordenadas se mueve a la posición deseada y luego lee el bit de perforar el cual se encuentra activado así que realiza esta acción.
- Error: Se lleva acabo al momento en que se activa cualquier sensor de limite de final de carrera donde la maquina no puede seguir avanzando ya que llegó a su posición máxima. También se activa cuando no se ha realizado la dinámica de acción de la mesa después de 10 segundos (cuando no ha llegado a la posición y/o no ha perforado). El sistema de control manda 1 bit de error a la interfase para decir que el proceso debe comenzar de nuevo.

2.2.2 Control de los Ejes [2]

Para cada eje se realizó un análisis general del sistema de control que necesitaba para su funcionamiento. Se eligió utilizar motores de corriente directa ya que son fáciles de controlar y en un futuro se puede expandir el proyecto para realizar otras funciones como generación de pistas. Se propuso un sistema como el de la figura 2.2.2.a para el eje X y Y, mientras que para el eje Z se propuso un control de corriente con una señal de perforar la cual es controlada por dos sensores de posición de limite inicial y limite final.

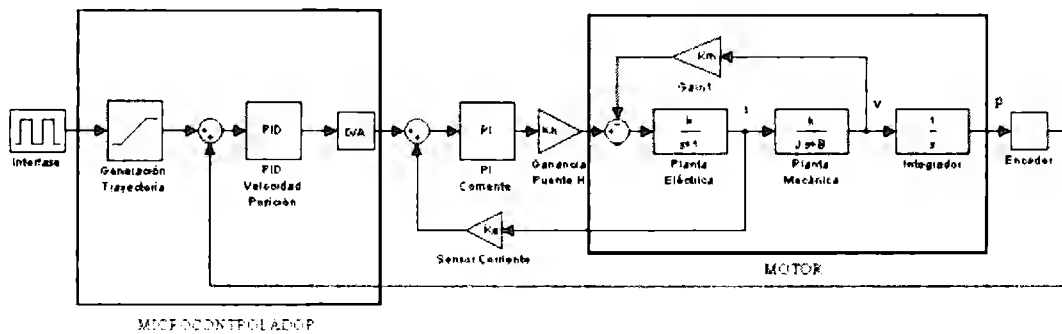


Figura 2.2.2.a "Control de Ejes X y Y"

En la figura 2.2.2.a la interfase manda la posición deseada a la etapa del microcontrolador. El microcontrolador realiza una generación de trayectoria óptima de posición la cual va a ser la entrada al controlador de Velocidad y Posición del motor. La señal controlada es convertida en una señal analógica (D/A) la cual es la señal de referencia de corriente necesaria para ir realizando la trayectoria. Esta señal entra a un controlador de corriente analógico el cual manda una señal a la etapa de potencia (la etapa de potencia se considera como parte del control de corriente). La etapa de potencia da el voltaje necesario al motor hasta llegar a la posición requerida.

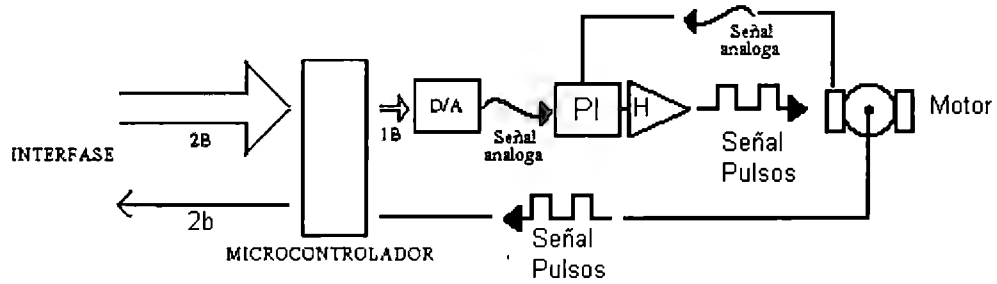


Figura 2.2.2.b "Tipo de señal"

La figura 2.2.2.b muestra el tipo de señal en cada etapa de control. La interfase manda 2 Bytes de señal (sección 2.2.1) donde el microcontrolador al haber procesado la información manda 1 Byte al convertidor D/A. El D/A manda una señal análoga al controlador de corriente el cual genera pulsos de voltaje al motor. Las señales a medir son la corriente de manera analógica y la posición por medio de un encoder el cual genera pulsos como señal.

Como se puede observar en la figura 2.2.2.a, se propuso dos tipos de control. Una de manera digital la cual va a sensar la posición y va a controlar la posición/velocidad del sistema, y la otra de manera analógica la cual va a sensar la corriente del motor y la va a controlar para que no existan picos de corriente y pueda dañar el sistema. Se propuso el control de posición y velocidad de manera digital ya que su dinámica no es tan rápida como la dinámica eléctrica del sistema, por lo que es fácil utilizar un microcontrolador. La dinámica eléctrica se propuso de manera analógica ya que su dinámica es muy rápida. Para poder implementar el control, primero se debe conocer los parámetros del motor (su dinámica eléctrica y mecánica) que se va a utilizar (sección 2.2.3) y después se puede realizar un control de corriente (sección 2.2.4) y otro de posición/velocidad (sección 2.2.5)

2.2.3 Modelo matemático del motor DC [20]

La figura 2.2.3.a nos muestra el circuito equivalente para un motor de corriente directa.

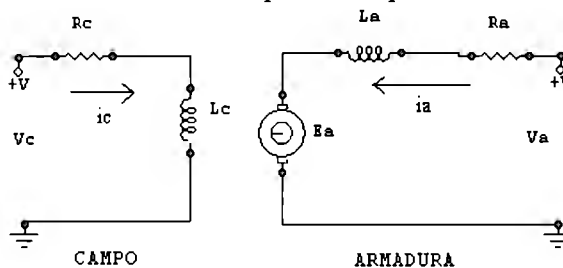


Figura 2.2.3.a "Modelo de un motor DC"

Para un motor con imanes permanentes, tenemos que el voltaje de campo es constante ($V_c = cte$), por lo tanto la corriente de campo y el flujo son constantes. Analizando en función de V_a tenemos las siguientes ecuaciones.

$$La \frac{di}{dt} + Ra(ia) + Ea = Va \quad \dots(2.2.3.1)$$

$$Ea = k\phi \cdot w \quad \dots(2.2.3.2)$$

Planta Eléctrica

Con estas dos ecuaciones podemos ver que si bloqueamos el motor, la velocidad es 0 por lo que la FEM también va a ser 0 ($Ea = 0$).

$$La \frac{di}{dt} + Ra(ia) = Va \quad \dots(2.2.3.3)$$

Sacando Laplace de la ecuación (2.2.3.3):

$$Va = Ia(La \cdot s + Ra) \quad \dots(2.2.3.4)$$

Para poder realizar el modelo matemático de corriente, tenemos la siguiente ecuación:

$$G(s) = \frac{I(s)}{V(s)} \quad \dots(2.2.3.5)$$

Por lo tanto

$$G(s) = \frac{1}{La \cdot s + Ra}$$

$$G(s) = \frac{1/La}{s + Ra/La} \quad \dots(2.2.3.6)$$

$G(s)$ nos muestra la función de transferencia, donde los parámetros a encontrar son la resistencia y la inductancia. Ya vimos que el modelo matemático se representa de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{k}{s + p} \quad \dots(2.2.3.7)$$

El sistema es de primer orden por lo que p corresponde al polo

Aplicando un escalón unitario con amplitud v , se tiene que:

$$V(t) = v \cdot 1(t) \quad \dots(2.2.3.8)$$

Tenemos la siguiente ecuación

$$ia(t) = iss(1 - e^{-pt}) = iss - iss \cdot e^{-pt} \quad \dots(2.2.3.9)$$

Donde ia corresponde a la corriente, iss a la corriente en estado estacionario. De la ecuación anterior tenemos dos partes, una que corresponde al estado estacionario y la segunda parte que corresponde a la parte de estado transitorio del sistema. De 2.2.3.9 obtenemos,

$$e^{-pt} = \frac{iss - ia(t)}{iss} \quad \dots(2.2.3.10)$$

La corriente de estado estacionario se puede obtener de la gráfica obtenida, y con esto podemos construir una función z definida como,

$$z(t) = \ln \left[\frac{i_{ss} - i(t)}{i_{ss}} \right] = -p \cdot t \quad \dots(2.2.3.11)$$

Podemos obtener el valor del polo 1 después de aplicar una regresión lineal a la función obtenida en la parte donde tiene efecto la parte transitoria.

Al obtener el polo del sistema de primer orden, lo que queda es saber el valor de la ganancia del sistema.

Finalmente, aplicando ley de estado estacionario ($s=0$) a 1.6a. Obtenemos:

$$k = \frac{i_{ss} \cdot p}{v} \quad \dots(2.2.3.12)$$

Dinámica Mecánica

Una vez implementado un control sobre la corriente de armadura del motor, la corriente se mantiene y considerando que su dinámica eléctrica es mucho más rápida (10 veces más rápida o mayor) que la dinámica mecánica por lo que es posible analizar la dinámica mecánica por separado. De la teoría de máquinas eléctricas:

$$T_e - T_l = J \frac{dw(t)}{dt} + Bw(t) \quad \dots(2.2.3.13)$$

$$T_e = K_e \cdot i_a \quad \dots(2.2.3.14)$$

Donde T_e es el torque eléctrico del motor, T_l es el torque de carga, J es el momento de inercia en el motor, B es la fricción en el motor, W es la velocidad del motor, K_e es la ganancia eléctrica del motor, i_a es la corriente de armadura.

Usando 2.2.3.13, 2.2.3.14, utilizando T_l como cero (sin utilizar ninguna carga) y transformando al dominio de Laplace, obtenemos:

$$K_e \cdot I_a(s) = (Js + B) \cdot W(s)$$

$$G(s) = \frac{W(s)}{I_a(s)} = \frac{K_e}{Js + B} \quad \dots(2.2.3.15)$$

De esta manera es posible observar la respuesta mecánica a un escalón de corriente. Por lo que el modelo matemático se representa de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{k}{s + p} \quad \dots(2.2.3.16)$$

El sistema es de primer orden por lo que p corresponde al polo.

Aplicando un escalón unitario con amplitud I , se tiene que:

$$i(t) = I \cdot 1(t) \quad \dots(2.2.3.17)$$

Tenemos la siguiente ecuación

$$w(t) = w_{ss}(1 - e^{-pt}) = w_{ss} - w_{ss} \cdot e^{-pt} \quad \dots(2.2.3.18)$$

Donde w corresponde a la velocidad del motor, w_{ss} a la velocidad en estado estacionario, de la ecuación anterior tenemos dos partes una que corresponde al estado estacionario y la segunda parte que corresponde a la parte de estado transitorio del sistema. De 2.2.3.18 obtenemos,

$$e^{-pt} = \frac{iss - ia(t)}{iss} \quad \dots(2.2.3.19)$$

La corriente de estado estacionario se puede obtener de la gráfica obtenida, y con esto podemos construir una función z definida como,

$$z(t) = \ln \left[\frac{wss - w(t)}{wss} \right] = -p \cdot t \quad \dots(2.2.3.20)$$

Sacando una regresión lineal de la función definida en la parte donde tiene efecto la parte transitoria, podemos obtener el valor del polo 1.

Al obtener el polo del sistema de primer orden, lo que queda es saber el valor de la ganancia del sistema.

Finalmente, aplicando ley de estado estacionario. Obtenemos:

$$k = \frac{wss \cdot p}{v} \quad \dots(2.2.3.21)$$

Con la planta eléctrica y la planta mecánica, sabemos que el modelo dinámico del motor se comporta como la figura 2.2.3.b

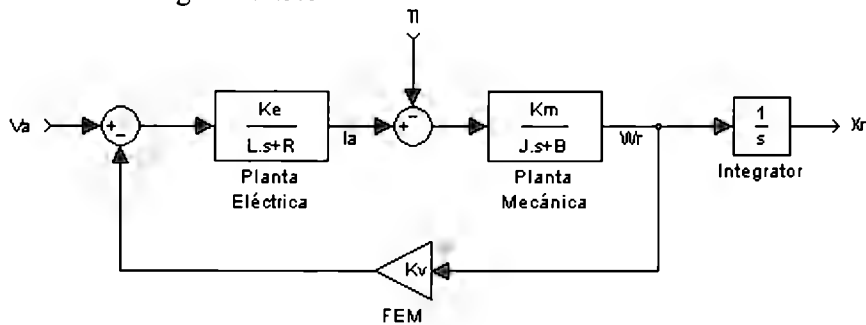


Figura 2.2.3.b "Modelo Dinámico del motor"

Donde Va es el voltaje de armadura, Ia es la corriente de armadura, Wr es la velocidad del rotor, Xr es la posición del rotor, Kv es la FEM producida dentro del motor y Tl son las cargas externas.

2.2.4 Control de Corriente [9]

Para el control de corriente se utiliza un control PI para hacer que la corriente llegue a la corriente deseada (ganancia del integrador) y que llegue en el tiempo deseado (ganancia proporcional) además de que ayuda como filtro para las perturbaciones externas como la FEM. Un controlador PI tiene la siguiente ecuación:

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s}$$

$$C(s) = \frac{Kp(s + \frac{Ki}{Kp})}{s} \quad \dots(2.2.4.1)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional y K_i es la ganancia integral. Con la planta eléctrica del motor, tenemos el siguiente diagrama de bloques para el sistema del motor con el Puente H, controlador PI y su ganancia de retroalimentación.

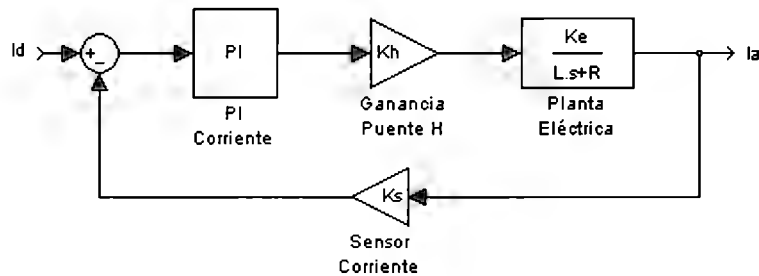


Figura 2.2.4.a "Sistema de Control de corriente"

Para calcular los polos en lazo cerrado, proponemos que el sobre impulso sea de 2% para que no tenga picos de corriente muy altos, con esto obtendremos un factor de amortiguamiento.

$$Mp = 2\%$$

$$\zeta = 0.78$$

Para el PWM, tendremos la frecuencia (la cual debe ser 10 veces más rápida que la respuesta del motor para asegurar el funcionamiento del controlador):

$$f = \text{frecuencia}$$

$$T = \left(\frac{1}{f}\right)$$

Queremos que por lo menos existan 10 ciclos de PWM durante el tiempo de establecimiento t_s .

$$t_s = 10\left(\frac{1}{f}\right)$$

Sabemos que para calcular los polos tenemos que calcular σ y ωd . Ajustando la frecuencia del PWM a 300 Hz por cuestiones de facilidad de uso de opto acopladores tenemos:

$$\sigma = \frac{4}{t_s} = \frac{2}{5} f = 0.4 \cdot 300 = 120$$

$$\omega d = \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \sigma = 96$$

Por lo tanto los polos son:

$$S_{1,2} = -120 \pm j96$$

La ecuación característica es:

$$(s - s_1)(s - s_2) = 0$$

$$s^2 + (240)s + (23616) = 0 \dots (2.2.4.2)$$

La planta eléctrica es de la siguiente forma:

$$Pe(s) = \frac{Ke}{(s + Pe)} \dots (2.2.4.3)$$

Representando el control de corriente en una sola expresión como lo muestra la figura Figura 2.2.4.b

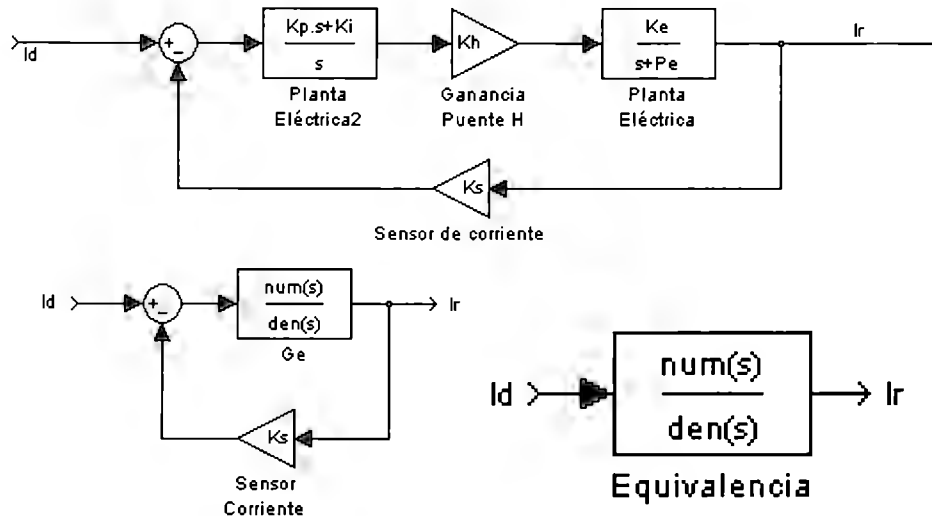


Figura 2.2.4.b "Equivalencia"

Donde la Equivalencia esta dada por la siguiente ecuación:

$$Ge(s) = Kp(s + \frac{Ki}{Kp})Kh \cdot Ke \dots (2.2.4.4)$$

La ecuación característica de lazo cerrado es la siguiente:

$$s^2 + s(Kp \cdot Kh \cdot Ke \cdot Ks + Pe) + Ki \cdot Kh \cdot Ks \cdot Ke = 0 \dots (2.2.4.5)$$

Comparando la ecuación 2.2.4.2 con la ecuación 2.2.4.5 tenemos que:

$$(240) = Kp \cdot Kh \cdot Ke \cdot Ks + Pe$$

$$(23616) = Ki \cdot Kh \cdot Ks \cdot Ke$$

$$Kp = \frac{(240) - Pe}{Kh \cdot Ke \cdot Ks} \dots (2.2.4.6)$$

$$Ki = \frac{(23616)}{Kh \cdot Ks \cdot Ke} \dots (2.2.4.7)$$

2.2.5 Control de Posición y Velocidad [10,11]

Existen varios métodos para controlar la posición y velocidad de un motor de corriente directa. Se plantearon dos métodos: Utilizando un control de punto a punto por medio de retroalimentación de estado y la otra por medio de un controlador PD considerando la generación de trayectorias. La ventaja de utilizar el control por retroalimentación de estado es que solo se necesita calcular una ganancia K, la desventaja es que cada vez que se necesite mover a una posición (no importando la distancia) va a tomar el mismo

tiempo, por lo que el control se debe implementar para la distancia máxima a recorrer. La ventaja de utilizar el control PD es que se considera una trayectoria para cada posición así como parámetros para cada instante, la desventaja de utilizar este método es calcular las ganancias y la generación de trayectorias para cada posición.

Retroalimentación de estado

Esta técnica usada para encontrar el valor de regulación es la de posicionamiento de polos, por retroalimentación de estado. A través de este método se diseña con la finalidad de que los polos dominantes de lazo cerrado tengan un coeficiente de amortiguamiento y una frecuencia natural deseada, además asumimos que la dinámica de los polos de lazo cerrado no dominante puede ser despreciable, por lo que nuestro sistema es de primer orden. La figura 2.2.5.a podemos observar como quedaría nuestro sistema en estado espacio con la inclusión de un regulador K. Partimos de un sistema en estado espacio de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.2.5.1)$$

Donde

x = vector de estado

y = señal de salida

u = señal de control

A = matriz constante de n*n

B = matriz constante de n*p

C = Matriz constante de q*n

D = constante escalar

Por lo que nuestra señal de control se define como:

$$U = -Kx \dots\dots\dots (2.2.5.2)$$

Esto significa que la señal de entrada de control es determinada por un estado instantáneo, este sistema es llamado de retroalimentación de estado. La matriz K es llamada la ganancia de retroalimentación de estado.

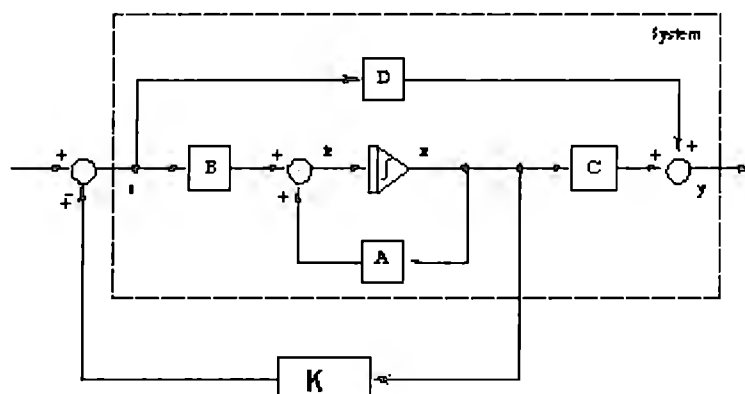


Figura 2.2.5.a "Retroalimentación de estado"

Este sistema de lazo cerrado no tiene entrada, su objetivo es mantener la salida cero, debido a ruidos que pueda haber la salida no será exactamente cero. La salida cero será regresada a la referencia de entrada cero debido a la configuración del sistema de retroalimentación de estado. Un sistema donde la entrada de referencia siempre es cero es llamado un regulador.

De la figura 2.2.5.a podemos ver que:

$$\dot{x}(t) = (A - Bk)x(t) \dots\dots\dots (2.2.5.3)$$

La solución de esta ecuación es:

$$\dot{x}(t) = e^{(A-Bk)t} x(0) \dots\dots\dots(2.2.5.4)$$

Donde $x(0)$ es el estado inicial causado por ruidos externos. De aquí definimos que nuestra nueva matriz de estado A' va a estar dada por:

$$A' = (A - Bk) \dots\dots\dots(2.2.5.5)$$

La función de transferencia discreta de la planta mecánica de un motor esta dada por la siguiente ecuación:

$$G(z) = \frac{\Omega(z)}{U(z)} = \frac{b}{z - a} \quad (2.2.5.6)$$

$$\omega(k + 1) = a\omega(k) + bu(k) \quad (2.2.5.7)$$

En donde $u(k)$ es la corriente medida en mA y $w(k)$ está dada en conteos (del encoder) por tiempo de muestreo. El sistema deseado es un control de posición, así que es necesario definir la variable de posición que estará dada en conteos del encoder. De esta manera es posible observar que la velocidad actual está dada como:

$$\begin{aligned} \omega(k) &= \theta(k) - \theta(k - 1) \\ \rightarrow \theta(k + 1) &= \theta(k - 1) + \omega(k + 1) \end{aligned} \quad (2.2.5.8)$$

Finalmente utilizando (2.2.5.7)

$$\theta(k + 1) = \theta(k - 1) + a\omega(k) + bu(k) \quad (2.2.5.9)$$

De esta manera si escogemos $x_1 = \theta$ y $x_2 = \omega$ obtenemos el sistema siguiente:

$$\begin{aligned} x(k + 1) &= Fx(k) + Gu(k) \\ x(k + 1) &= \begin{bmatrix} 1 & a \\ 0 & a \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} b \\ b \end{bmatrix} u(k) \end{aligned}$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(k)$$

$$x(k) = [\theta(k) \quad \omega(k)]^T$$

De esta manera se obtiene nuestro sistema en la forma canónica companion. Las ganancias de retroalimentación de estado son fáciles de obtener utilizando la ecuación de Ackermann (2.2.5.6)

$$K = [k_1 \quad k_2] = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1] U^{-1} \varphi(F)$$

$$U = \begin{bmatrix} G & FG & F^2G & \dots & F^{n-1}G \end{bmatrix} \quad (2.2.5.6)$$

$$\varphi(F) = \alpha_n I + \alpha_{n-1} F + \dots + \alpha_1 F^{n-1} + F^n$$

Donde U es la matriz de controlabilidad del sistema y $\varphi(F)$ esta dada por una matriz de en función de F multiplicada por coeficientes alfa de tamaño n (ecuación característica).

Controlador PD de trayectorias

En la sección 1.1 se vio un análisis de cómo generar una trayectoria y calcular el par a partir de esa función. Lo importante a considerar en este controlador es que el sistema no solo va a controlar las variables del motor sino que la mesa en su totalidad en todo instante de tiempo conforme una trayectoria deseada. A partir de aquí se puede diseñar un controlador PD en base a estas condiciones. El esquema general de este controlador se encuentra en la figura 2.2.5.b.

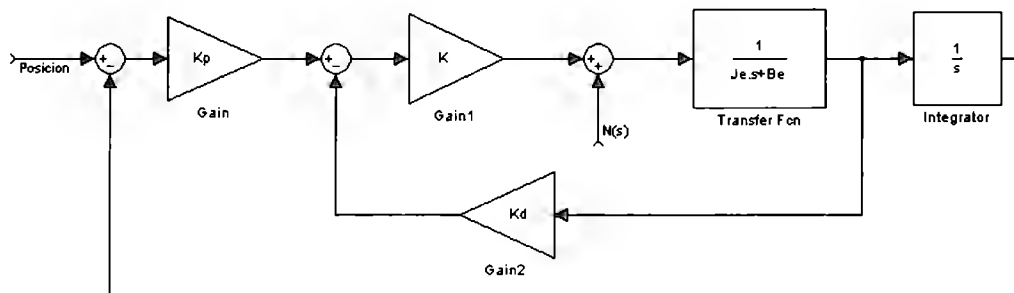


Figura 2.2.5.b "Control PD"

Donde la dinámica eléctrica es muy rápida (puede llegar a ser 100 veces mas rápida que la dinámica mecánica) por lo que se considera solo una ganancia K. N(s) son las fuerzas externas causadas durante una trayectoria planeada. Je y Be son los momentos de inercia y fricción respectivamente en función de la trayectoria deseada y el paso del tornillo sin fin. Kd y Kp están dadas por las siguientes expresiones:

$$J_e = \text{promedio}(J_m + n^2 d \cdot q)$$

$$B_e = \text{promedio}(B_m + K K_b)$$

$$K_d = \frac{2J_e W - B_e}{K_e}$$

$$K_p = \frac{J_e}{K_e} W^2$$

Donde J_m y B_m son el coeficiente de inercia y fricción respectivamente del motor, n es el paso, d es un factor de ruido, q es la coordenada generalizada, K_b es la ganancia de retroalimentación de velocidad, W es la velocidad del motor. Ya que el controlador es de tipo PD, el estado estacionario no siempre es 0, como lo puede ser con un PI. En este caso el error en estado estacionario esta dado por:

$$E_{ss} = \frac{N}{K K_p}$$

Por lo que entre mayor sea la ganancia proporcional, el error en estado estacionario tiende a 0.

2.3 Fuentes de Energía [29]

2.3.1 Convertidor Buck

Empezamos explicando el funcionamiento del convertidor buck, ya que las fuentes de alimentación del circuito están basadas a partir de la topología de este. Este circuito puede operar en cualquiera de los tres estados que se describen a continuación. El primer estado corresponde al caso cuando el interruptor está cerrado. En este estado, la corriente a través del inductor aumenta, dado que la alimentación de voltaje es mayor que el voltaje de salida, donde la corriente del capacitor puede ir en cualquier sentido, dependiendo de la corriente del inductor y la corriente que fluye a través de la carga. Cuando la corriente en el inductor aumenta, la energía almacenada en este aumenta también.

Cuando el interruptor está encendido, los elementos por los que fluye corriente se muestran en color rojo en la Figura 2.3.1.a.

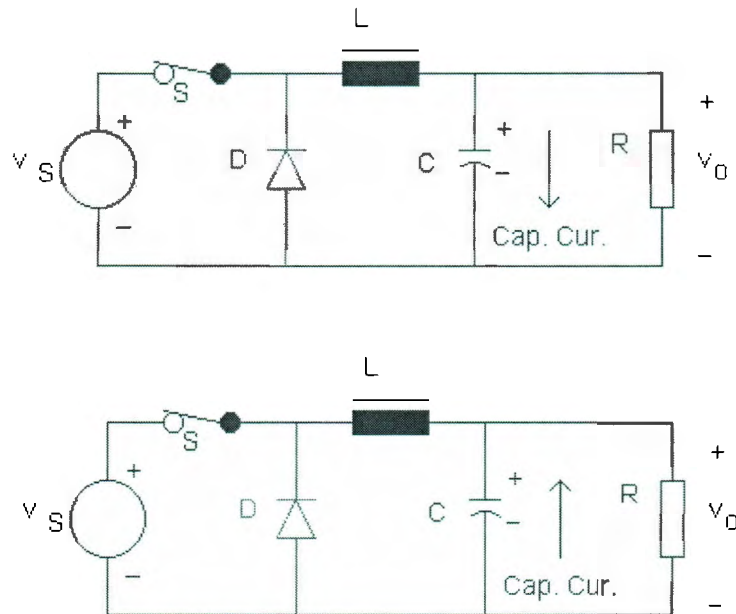


Figura 2.3.1.a "Convertidor Buck : Primer Estado"

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito en el primer estado son:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_S - v_O}{L} \quad (1)$$

$$\frac{dv_O}{dt} = \frac{i_L - v_O/R}{C} \quad (2)$$

El segundo estado se refiere a la condición cuando el interruptor se encuentra abierto y el diodo esta en funcionamiento. Aquí, la corriente del inductor circula libremente a través del diodo y el inductor alimenta al circuito RC a la salida. La energía almacenada en el inductor cae en este estado, el inductor se descarga y la corriente del capacitor puede fluir en cualquier dirección.

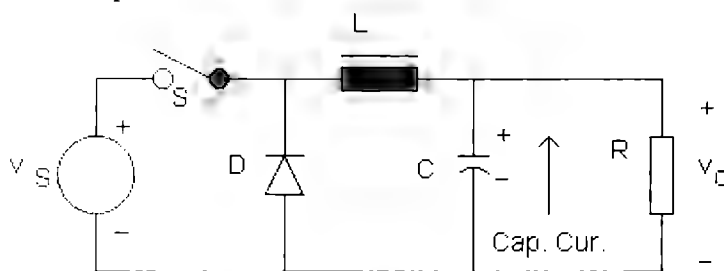


FIG. 3.1.4-2(a)

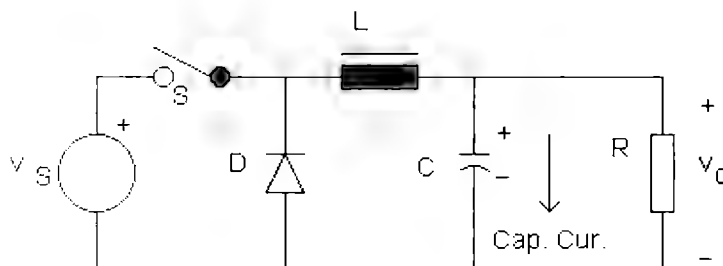


Figura 2.3.1.b "Convertidor Buck : Segundo Estado"

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito en el segundo estado son:

$$\frac{di_L}{dt} = - \frac{v_O}{L} \quad (3)$$

$$\frac{dv_O}{dt} = \frac{i_L - v_O/R}{C} \quad (4)$$

Cuando el interruptor esta abierto, el inductor se descarga. Una vez que se ha descargado por completo, su corriente cae a cero y tiende a revertirse, el diodo bloquea esta conducción en la dirección opuesta. En el tercer estado, ambos, el diodo y el interruptor se encuentran apagados como se muestra en la figura 2.3.1.c. Durante este estado el capacitor descarga su energía alimentando así al circuito.

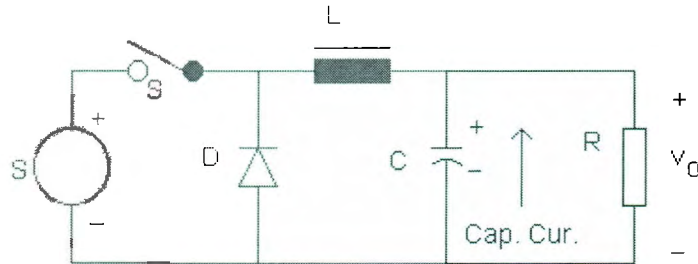


Figura 3.1.c "Convertidor Buck : Tercer Estado"

La ecuación que describe el comportamiento del circuito en el tercer estado son:

$$\frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o/R}{C} \quad (5)$$

3. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

3.1 Mecánica

Una vez teniendo los materiales a utilizar se prosiguió con el diseño CAD de nuestras correderas y de nuestra mesa, además de el diseño de los planos de cada pieza con las medidas y tolerancias correctas. De esta manera se obtuvo un modelo en 3D para analizarlo y detectar errores antes de la manufactura.

El diseño de las correderas (Figura 3.1.a) se realizó de manera que existiera poco juego mecánico sobre el riel para no perder precisión al momento de que la mesa se mueva.

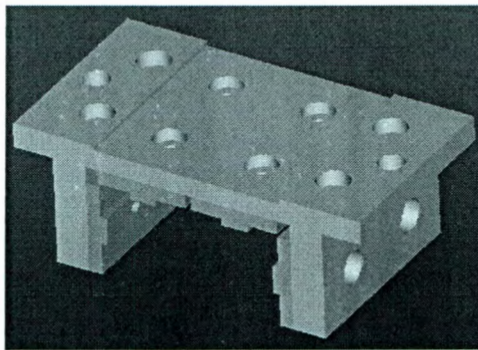


Figura 3.1.a "Corredera deslizante"

Debido a que la precisión de las correderas es muy importante para que deslicen perfectamente sobre el riel, la manufactura de las piezas se realizó por medio de la fresadora de control numérico.

Teniendo como base las medidas del riel se diseñó la corredera sobre éste (Figura 3.1.b), de manera que quedaran unidas en 2 ejes. Un eje sirve para que la corredera deslice perfectamente en línea recta y otro eje sirve para que no exista juego mecánico en el eje vertical de la figura.

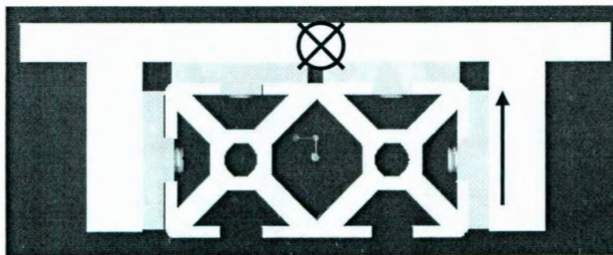


Figura 3.1.b "Corredera con riel"

Las únicas medidas que se modificaron de la corredera original fueron los espesores de las abrazaderas (Figura 3.1.c) ya que el espesor original era demasiado pequeño como para barrenar y hacer la cuerda. Por todo esto las modificaciones de la corredera original incluyen 4 barrenos extras para sujetar las abrazaderas (Figura 3.1.d).

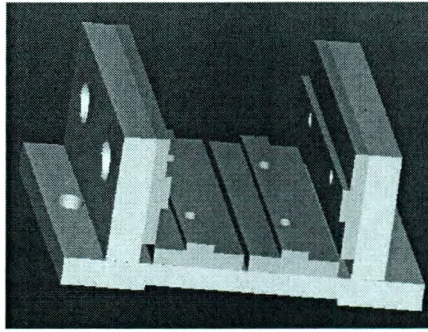


Figura 3.1.c "Corredera rediseñada, abrazaderas con mayor espesor"

Ya que se analizó el modelo se diseñaron los planos por pieza de la corredera, dichos planos se pueden consultar en el anexo 6.8 de este documento.

Se compraron las placas de aluminio, se cortaron y se realizaron los barrenos para tornillos de 3/16.

Con la ayuda de los planos se programó el código G para fabricar las piezas en serie de la corredera (Placa de soporte, Abrazaderas, Nylamid).

La fresadora realizó las siguientes tareas:

Rectificado (Mesa de Acero y Aluminio)

Cortado de las placas principales

Cortado de las abrazaderas

Cortado del Nylamid

Barrenado y acabado de todas las anteriores

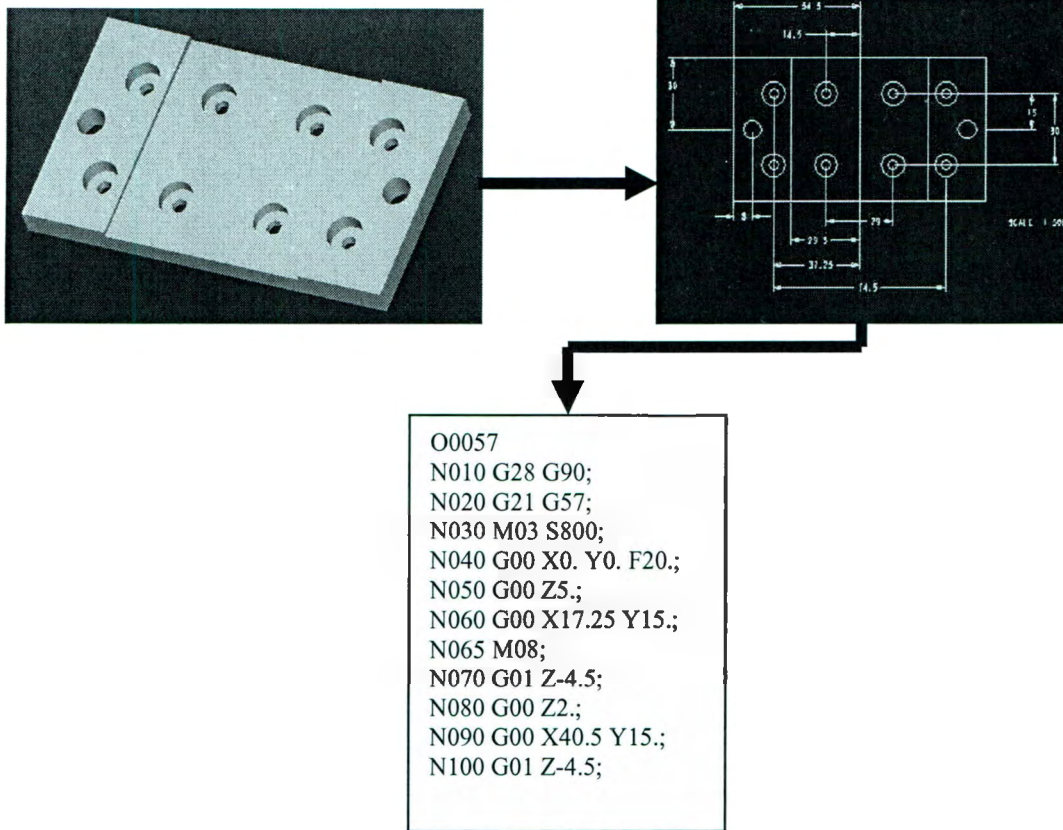


Figura 3.1.d "Proceso de Fabricación"

NOTA: Los códigos G utilizados para las piezas se pueden consultar en el anexo de este documento

Las piezas fabricadas para 8 correderas fueron las siguientes:




Nombre	Parte	Número de Piezas
Placa Principal		8
Abrazaderas		16
Nylamid		32

Tabla 3.1.e "Piezas Fabricadas"

Terminado el maquinado de las piezas se realizaron las cuerdas de los barrenos con la ayuda de machuelos y se procedió al ensamble y acabado de las mismas, obteniendo finalmente las 8 correderas.

Los resultados obtenidos fueron poca fricción y bajo juego mecánico gracias a la precisión obtenida en el maquinado.

La base de la mesa de coordenadas es una placa de acero $\frac{1}{2}$ pulgada con el peso suficiente para evitar las vibraciones de todo el sistema. Sobre ésta se montaron los rieles y las correderas por medio de tornillos Figura 3.1.f.

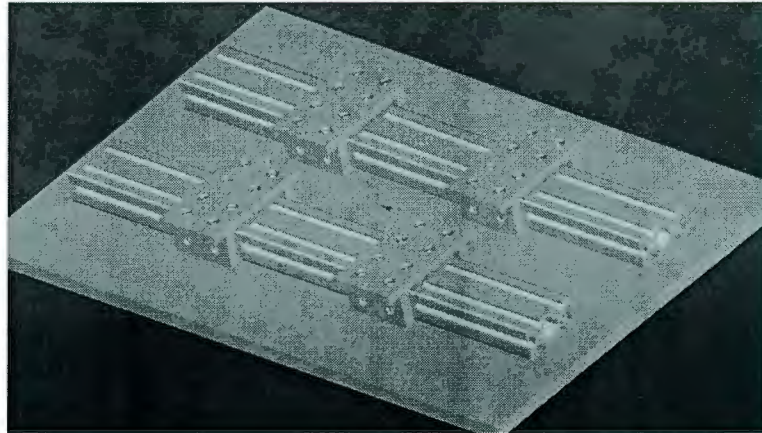


Figura 3.1.f "Eje X"

Posteriormente se monto el eje Y sobre el eje X, en la figura 3.1.g se puede ver que se añadió una placa de aluminio de 5mm sobre las correderas del eje X, esto debido a que al realizar el movimiento en este eje se tiene que mover también al motor que acciona al eje Y, de tal manera que el motor del eje Y se montó sobre esta segunda placa de aluminio

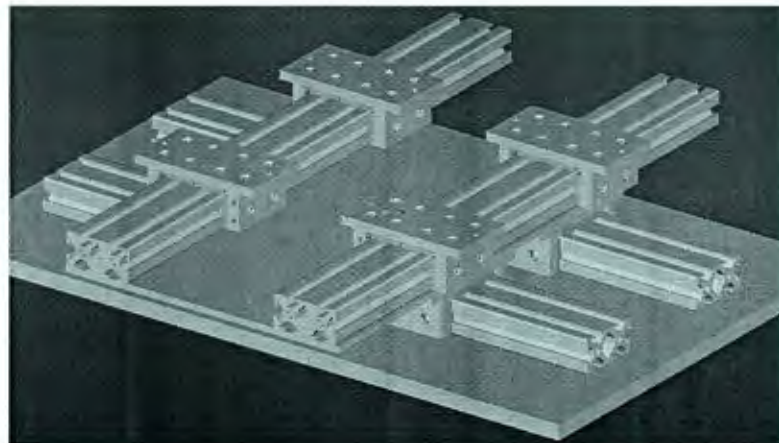


Figura 3.1.g "Ejes Horizontales (X,Y) sobre la placa de acero."

El movimiento de las correderas se logra gracias al acoplamiento de los tornillos sin fin a cada uno de los motores de los ejes. Una placa con la tuerca es atornillada a las correderas para que estas sean empujadas al girar el tornillo sin fin (Figura 3.1.h).

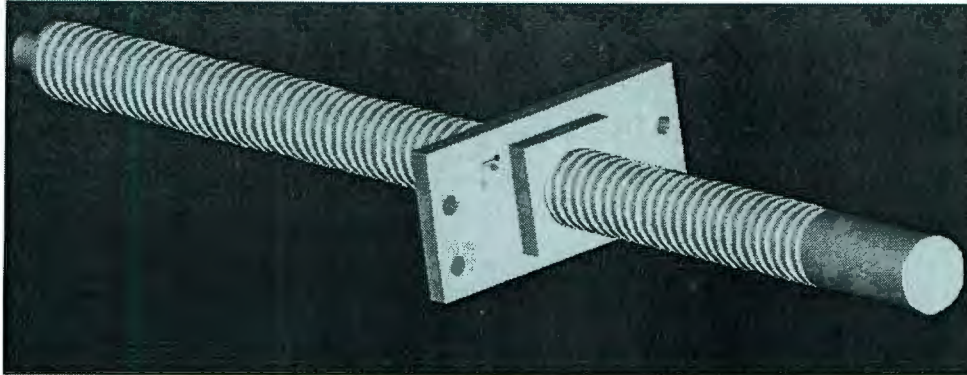


Figura 3.1.h "Tornillo Sin Fin"

La tuerca del tornillo sin fin fue acoplada a la placa de aluminio por medio de opresores los cuales van enroscados por la parte superior de la placa presionan a la tuerca para que no se mueva.

Finalmente sobre las correderas del eje Y se colocó otra placa de aluminio de 5 mm (mesa de trabajo) sobre la cual se coloca una pequeña lamina de madera para el barrenado de la tarjeta. El diseño final de los ejes X y Y se puede ver en la Figura 3.1.i.

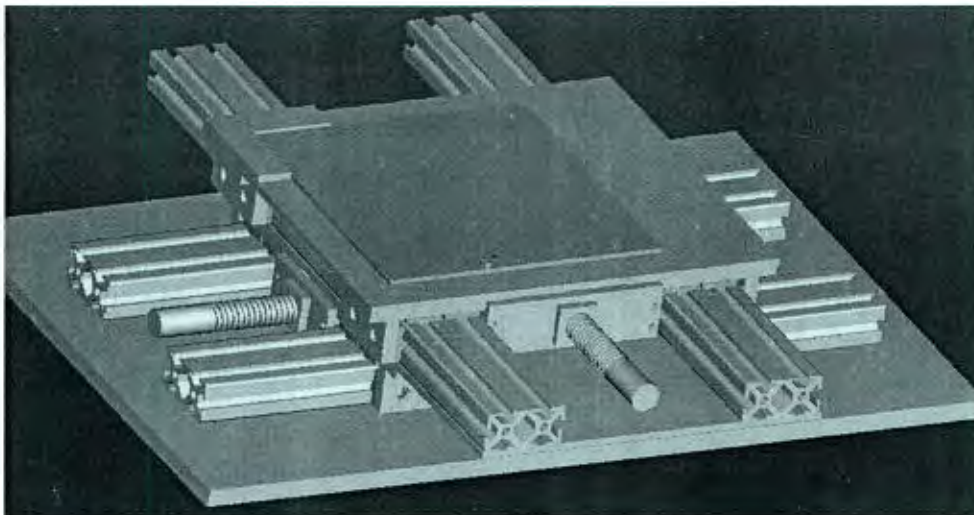


Figura 3.1.i "Ejes X y Y finalizados"

3.2 Obtención de las Plantas de los Motores

Planta Eléctrica:

Al motor (Pittman, ver anexos) se le puso una resistencia de 0.1Ω en serie con la entrada de voltaje. Se bloqueó el motor y se le aplicó un escalón de 2V. Se midió en un osciloscopio el voltaje en la resistencia el cual es proporcional a la corriente (Figura 3.2.1.a).

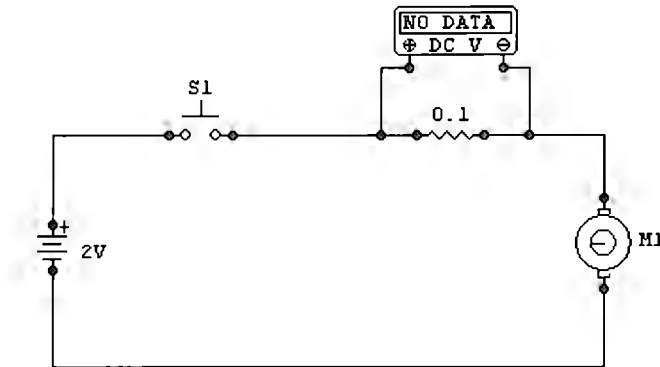


Figura 3.2.1.a "Circuito de Medición de corriente"

Se obtuvo una tabla de datos que corresponden a la siguiente gráfica:

Datos de la respuesta a un escalón

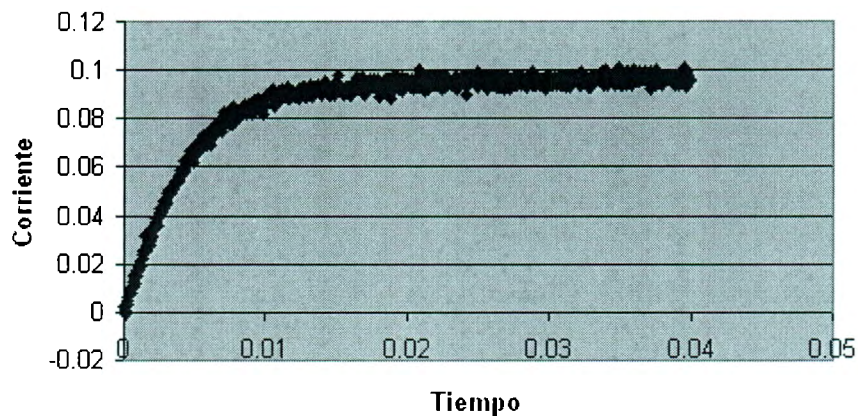


Figura 3.2.1.b. "Respuesta al escalón"

En este sistema se puede ver claramente que la respuesta es de primer orden, con el valor en estado estacionario de 0.096 (promedio de los últimos valores). Sacando los valores de z (ecuación 2.2.3.11) para cada instante de tiempo y graficando en un tiempo de 0 a 0.005 segundos (parte lineal), se obtuvo la siguiente gráfica:

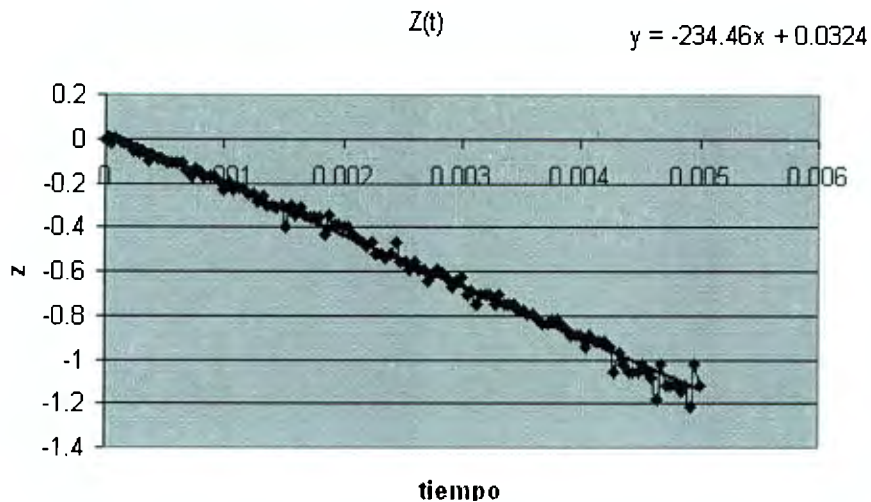


Figura 3.2.1.c "Gráfica de z(t)"

Sacando la regresión lineal, se pudo observar que la pendiente es de -234. Este valor es el polo del sistema de primer orden. Utilizando la fórmula (2.2.3.12) para obtener la K_e del sistema, se obtuvo el valor de $K_e = 12$.

De esta manera, utilizando la ecuación 2.2.3.7 obtuvimos la siguiente planta eléctrica

$$G_{M1}(s) = \frac{12}{s + 234} \quad \dots(3.2.1.1)$$

Con los datos se graficó la respuesta del sistema planteado con la ecuación 2.2.3.9 y comparada con la experimental resultó muy parecida (Figura 3.2.1.d).

Comparación

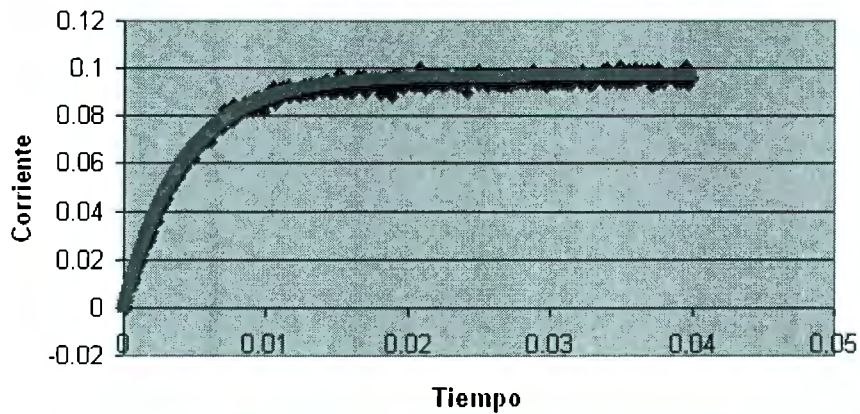


Figura 3.2.1.d "Comparación de respuestas"

Donde el error entre la función de transferencia real y la calculada es prácticamente 0. Se muestra en la siguiente figura:

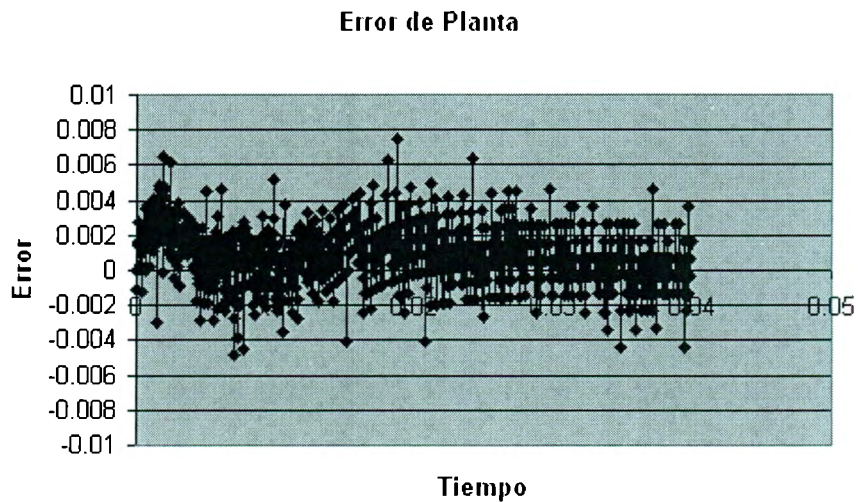


Figura 3.2.1.d.1 "Error de Planta Eléctrica"

De la función de transferencia (3.2.1.1) podemos conocer los valores de los parámetros comparando con 2.2.3.6, donde $k=12=1/L$ y $P=234=R/L$ por lo que: $R=19.5\Omega$ y $L=0.0833$ H. Utilizamos Matlab (Simulink) para comprobar nuestros resultados. El diagrama y la respuesta se muestran en la Figura 3.2.1.e.

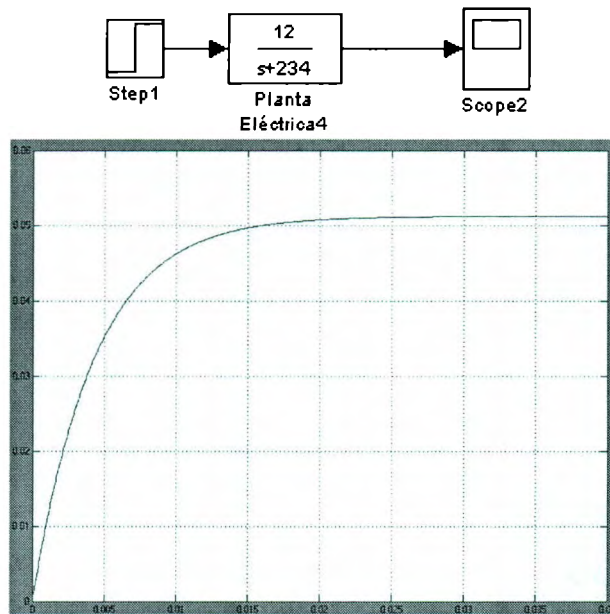


Figura 3.2.1.e "Diagrama y respuesta al escalón"

Planta Mecánica:

Para la obtención de la planta mecánica, primero se tuvo que calcular la planta eléctrica, calcular e implementar el control de corriente (sección 3.2.2 y 3.3.3). Una vez realizado esto, se acopló un sensor de velocidad en el rotor del motor (por cuestiones de costo y facilidad, se utilizó un motor mucho mas pequeño y con otras características para que su modelo dinámico no afectara la respuesta de velocidad y se pudiera considerar como una respuesta lineal). Se tomó la medición a un escalón (Figura 3.2.1.f).

Respuesta Escalon

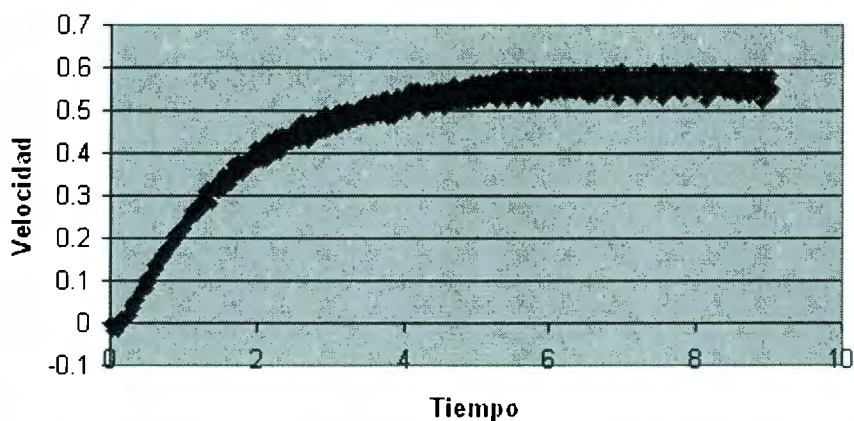


Figura 3.2.1.f "Respuesta al escalón"

En esta gráfica se puede observar la respuesta de la velocidad a la entrada escalón de corriente de $I=0.2A$, en este sistema se puede ver claramente que la respuesta es de primer orden, ya que la dinámica eléctrica es mucho más rápida que la mecánica por lo que se puede despreciar para calcular los valores mecánicos (nuestro sensor de velocidad regresa un Volt por cada 1000rpms). El valor en estado estacionario fue calculado de 0.56 (promedio de los últimos 100 valores).

Utilizando la ecuación 2.2.3.10 para calcular $Z(t)$ y graficando en un tiempo de 3 segundos (parte lineal de $z(t)$) obtuvimos la Figura 3.2.1.g (Figura

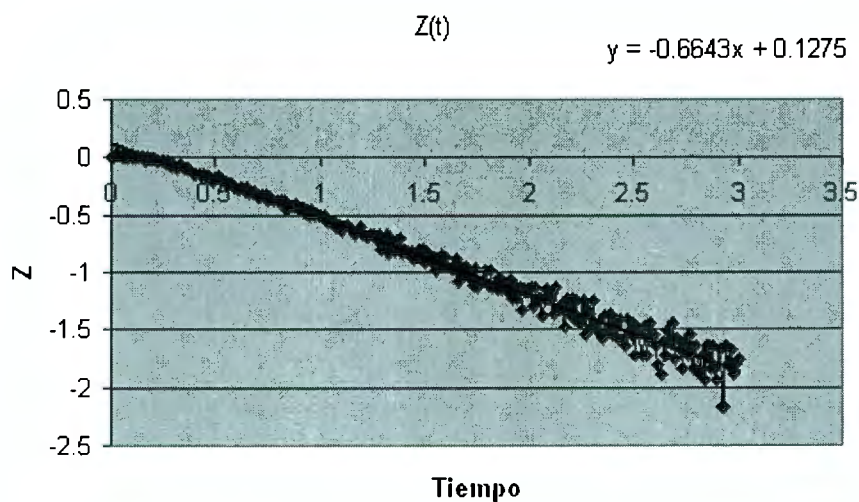


Figura 3.2.1.g "Gráfica de $z(t)$ "

La pendiente es el polo del modelo propuesto, esto es, -0.66. Por medio de la ecuación 2.2.3.21 obtuvimos que $K_m=1.86$.

$$G_{M1}(s) = \frac{1.86}{s + 0.66} \quad \dots(3.2.1.2)$$

Con la ecuación 2.2.3.18 se graficó la respuesta del sistema planteado y comparada con la experimental resultó muy parecida (Figura 3.2.1.h).

Comparacion

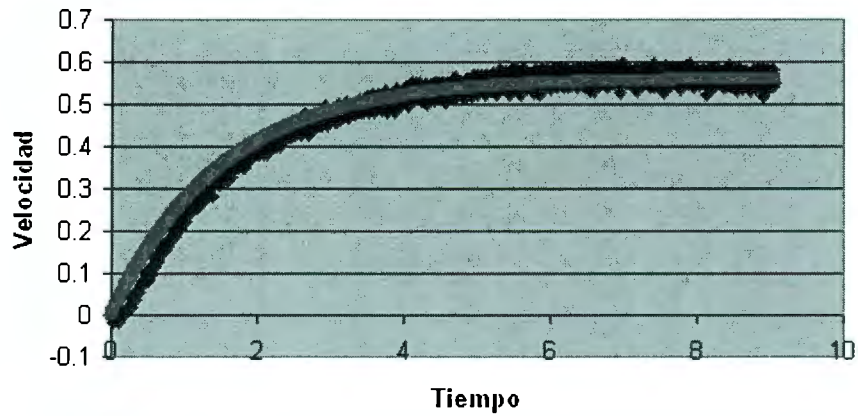


Figura 3.2.1.h "Comparación Mecánica"

Donde el error entre la función de transferencia real y la calculada no pasa de 0.08. Se muestra en la siguiente figura:

Error de Planta

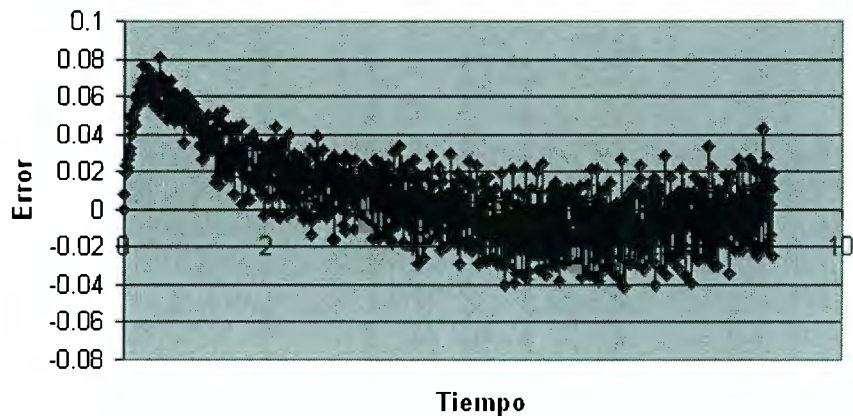


Figura 3.2.1.h.1 "Error de Planta Mecánica"

De la función de transferencia (3.2.1.2) podemos conocer los valores de los parámetros comparando con 2.2.3.15, donde $K_m=1.86=1/J$ y $P_m=0.66=B/J$ por lo que: $B=0.3548$ y $J=0.5376$. Utilizamos Matlab (Simulink) para comprobar nuestros resultados. El diagrama y la respuesta se muestran en la Figura 3.2.1.i.

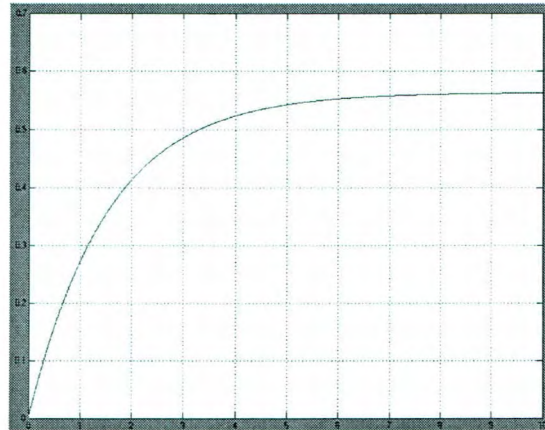
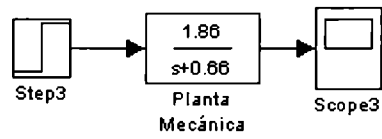


Figura 3.2.1.i “Diagrama y respuesta al escalón”

Nota: Este proceso fue realizado varias veces hasta obtener una respuesta óptima al escalón para el sistema y es el que se presenta en el documento para la planta eléctrica y la mecánica.

3.3 Fuentes de Energía

3.3.1 Simulación

Las siguientes gráficas fueron obtenidas con el software LM267X de Nacional Semiconductor y nos dan una aproximación bastante cercana al comportamiento real del circuito. Estas son resultado de la simulación del CI LM2678T-ADJ que es el modelo con Voltaje variable de la familia LM2678, este se utilizará para alimentar los controladores de los motores, los cuales necesitan una alimentación de $\pm 15\text{VCD}$ y su circuito se muestra a la cabeza de las gráficas.

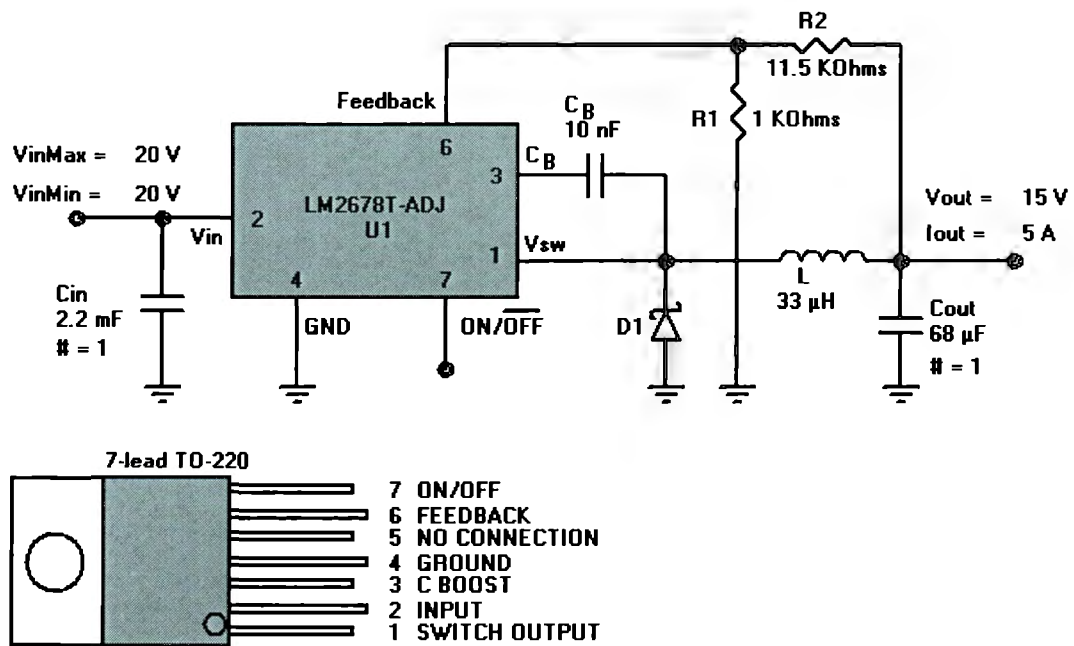


Figura 3.3.1.a "Circuito del LM2678T-ADJ"

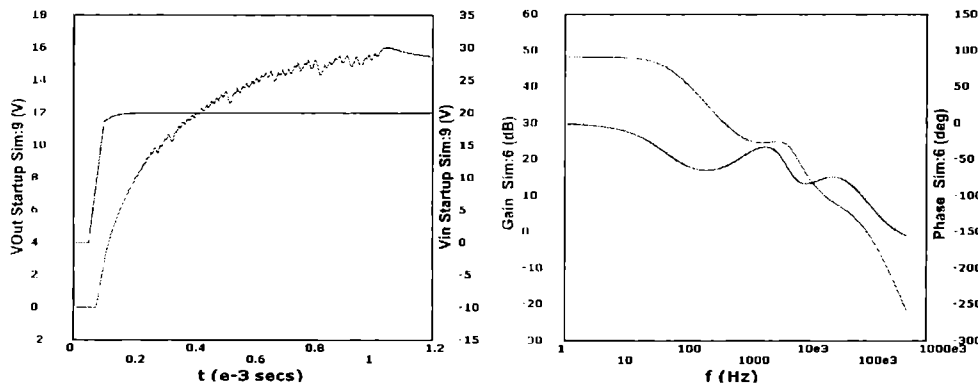


FIG. 3.1.4-7: Respuesta al Inicio

Fig. 3.1.4-8:

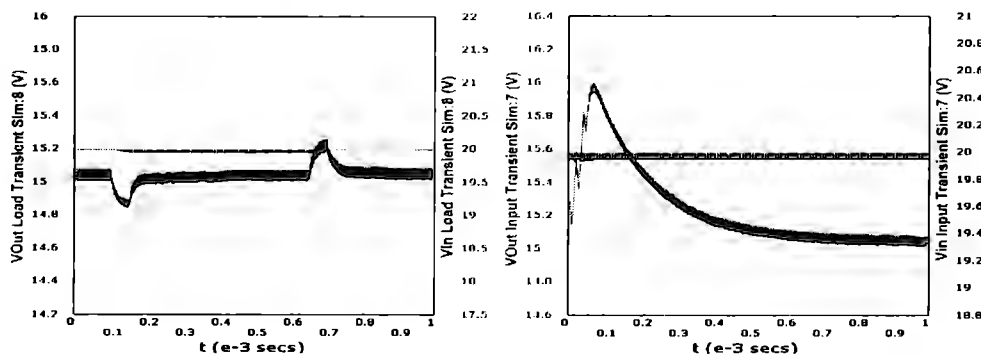


FIG. 3.1.4-9: Transitorio en la Carga

Fig. 3.1.4-10:

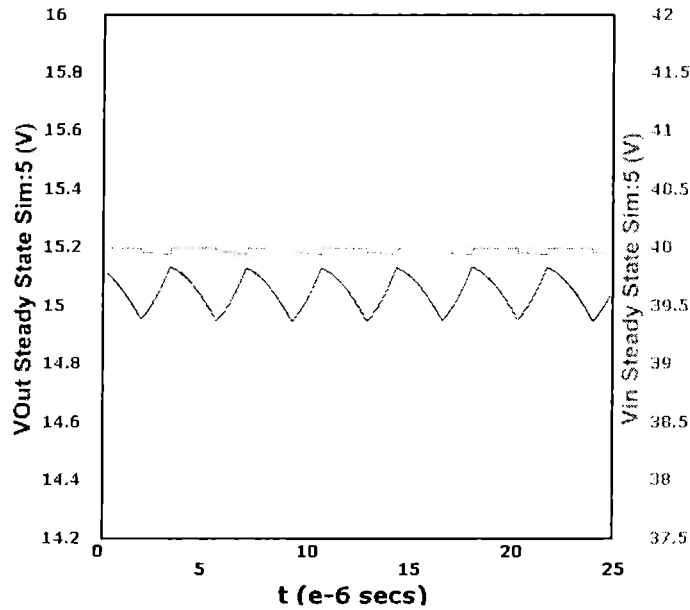


FIG. 3.1.4-11: Condición Estable

3.3.2 LM2678

La alimentación de cada motor, uno para cada eje resultando 3 en total, requiere de un voltaje de 0-24 VCD por lo que para cada motor se tuvieron que acoplar 2 fuentes de 12 VCD para proporcionar el voltaje necesario. Se realizaron 2 fuentes de 12V en vez de una sola de 24V debido a la corriente que necesitan soportar dichas fuentes. La corriente nominal de los motores es de aproximadamente 2A por lo cual se necesitaron de al menos 5A de corriente máxima para poder soportar los picos de corriente que el motor genere. Esto se toma como medida precautoria dado que el control de los mismos motores contiene un lazo interno de corriente que limita esta para que no sea mayor a la nominal.

El voltaje de alimentación del CI tiene que ser mayor al voltaje de salida que se requiere, preferentemente para nuestro circuito este es de 15VCD como mínimo y 20 VCD como máximo. Para así evitar cambios bruscos en el Vin lo cual causaría cambios aun mas agresivos en la corriente del inductor.

Calculando los distintos componentes necesarios para el circuito de la fuente obtenemos como resultado el circuito que se muestra en la fig. 3.2.4-1.

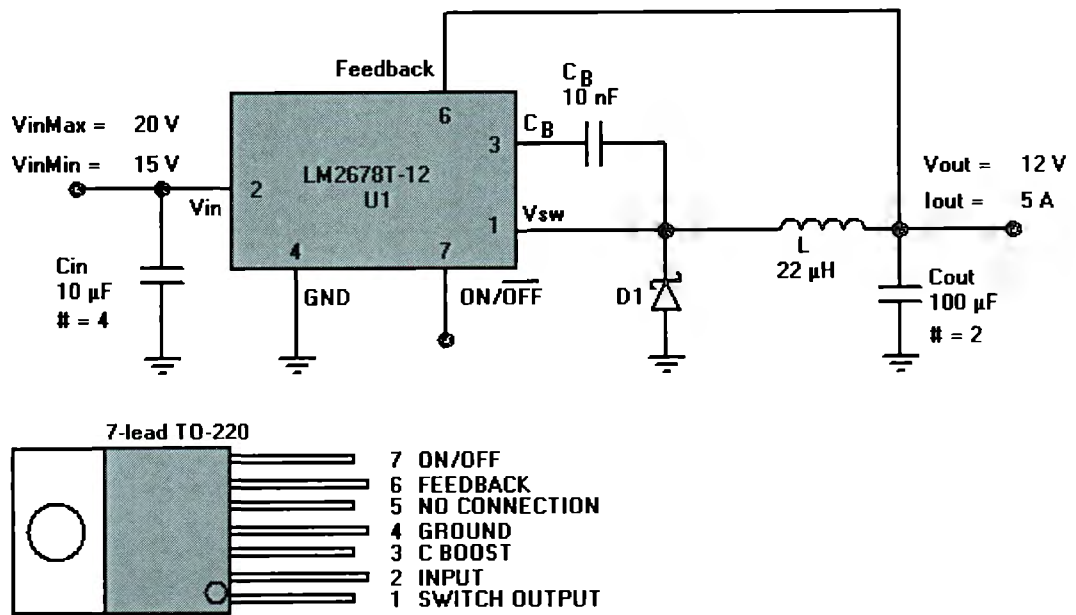


Fig. 3.2.4-1: Circuito Final

3.4 Electrónica de Potencia

Para la etapa de potencia se escogió utilizar un puente H para darle la energía necesaria a los motores. El puente H debe recibir 4 entradas y tener 2 salidas. Las entradas se basan en 50V (máximo) y 5A, tierra y 2 para el control del sentido del motor a 5V (conectadas al controlador PI). Las salidas son: el voltaje positivo o negativo y tierra. La figura 3.3.1.a muestra el circuito utilizado para la realización de los puentes H.

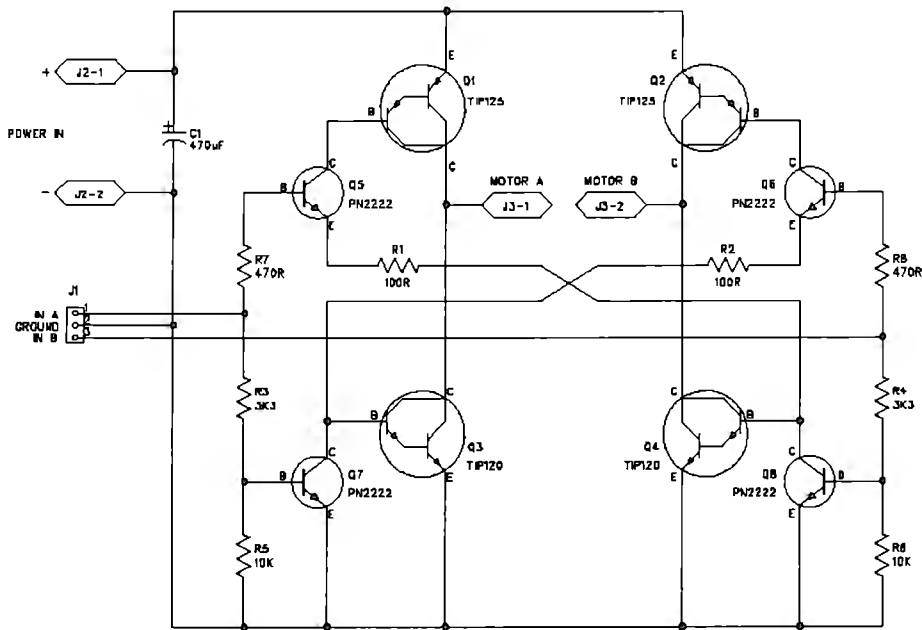


Figura 3.3.1.a "Puente H"

Una vez implementado el puente H, se realizaron pruebas para comprobar el funcionamiento. La Figura 3.3.1.b muestra la señal de entrada digital 1,0 (señal inferior) y la señal de salida del puente H (señal superior).

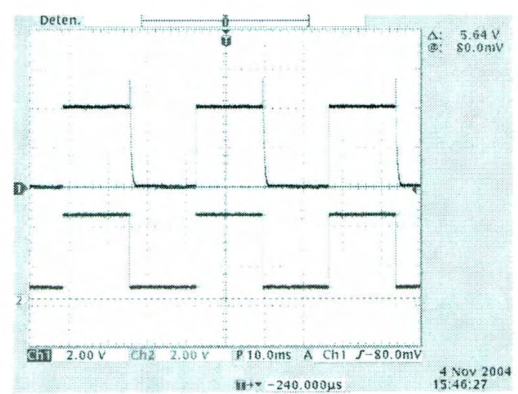


Figura 3.3.1.b "Entrada-Salida"

3.5 Control de Corriente

A partir de las ecuaciones 2.2.4.6 y 2.2.4.7 y considerando que el puente H nos da una ganancia de 10 ($K_h = 10$) así como el sensor de corriente una ganancia de 1 ($K_s = 1$), se calculó K_p y K_i .

$$K_p = 0.3$$

$$K_i = 197$$

El controlador calculado a partir de la ecuación 2.2.4.1:

$$Ca(s) = 0.3 + \frac{197}{s} \dots (3.5.1)$$

Simulando en Matlab Simulink la respuesta a un escalón:

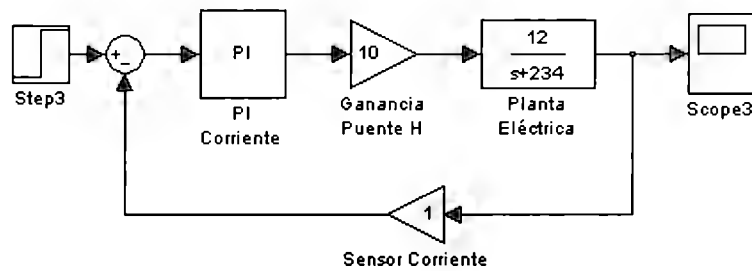


Figura 3.5.a "Simulación de escalón"

Obtuvimos la siguiente gráfica:

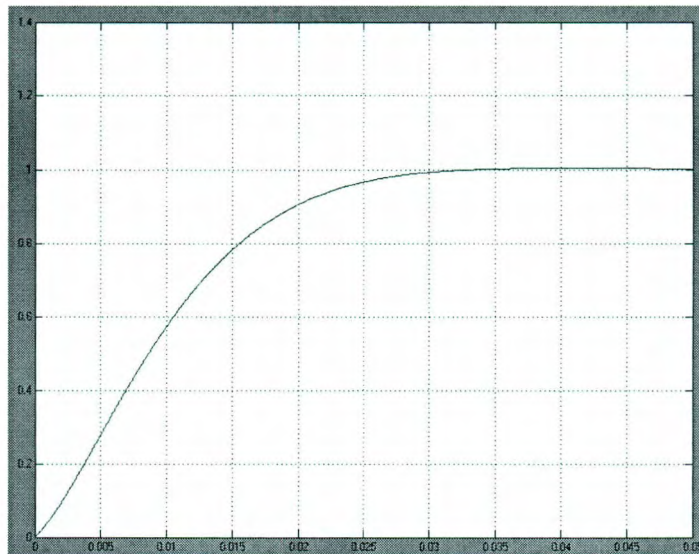


Figura 3.5.b "Respuesta en simulación de un escalón"

En la figura 3.5.b se puede observar que el controlador hace que la respuesta llegue al valor deseado en un tiempo de 0.035s, por lo que el controlador funciona de manera correcta.

Control Analógico

El control analógico se implemento por medio de OP-AMP donde se utilizó la nomenclatura de la figura 3.5.c para implementar el controlador PI

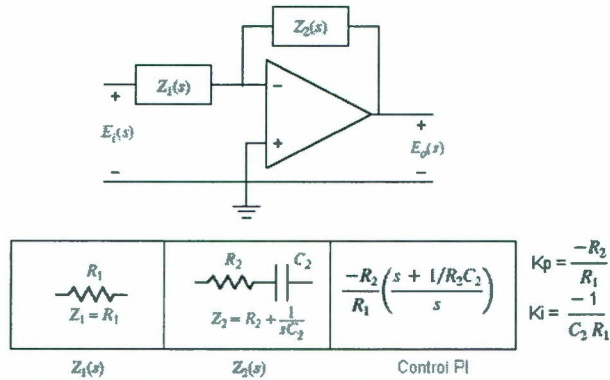


Figura 3.5.c "Configuración PI para OP-AMP"

Control PI

De esta manera se utilizó el circuito que se ve en la figura 3.5.d para la implementación del controlador.

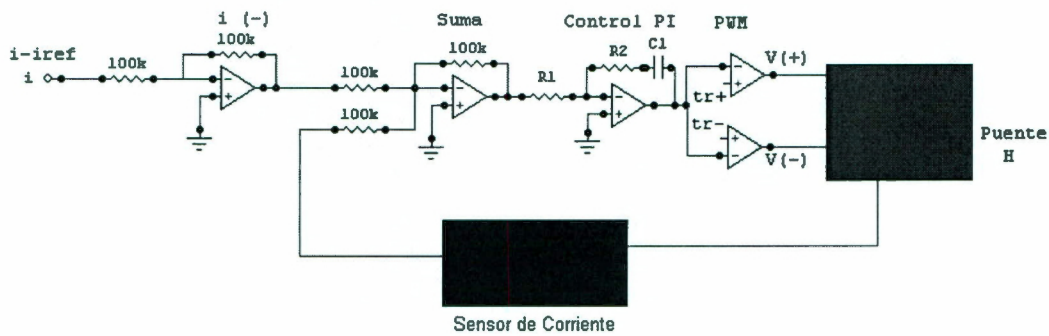


Figura 3.5.d "Controlador PI"

Señal Triangular (Tr)

Se utilizó un PWM con señal triangular a 300Hz para el funcionamiento del controlador PI. Para esto, se implemento el circuito que se muestra en la figura 3.5.e.

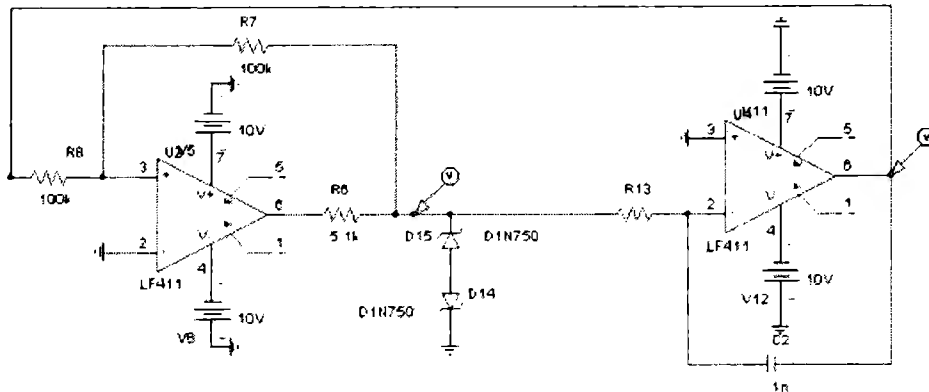


Figura 3.5.e "Generador de señal triangular"

Una vez implementado el circuito, se realizaron pruebas para verificar su funcionamiento. Figura 3.5.f.

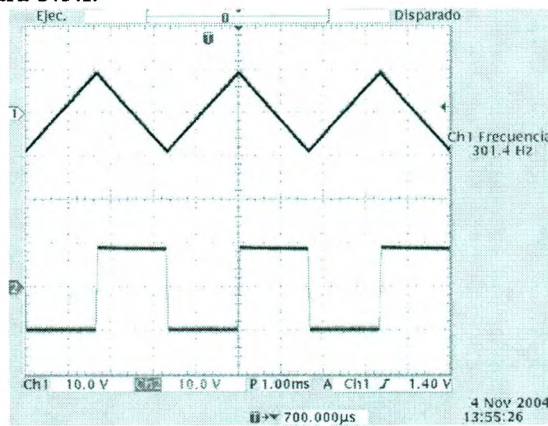


Figura 3.5.f "Generador de señal triangular"

Sensor de corriente 1V-1A

Se utilizó el circuito de la figura 3.5.g para realizar que el sensor de corriente nos diera 1V por cada A.

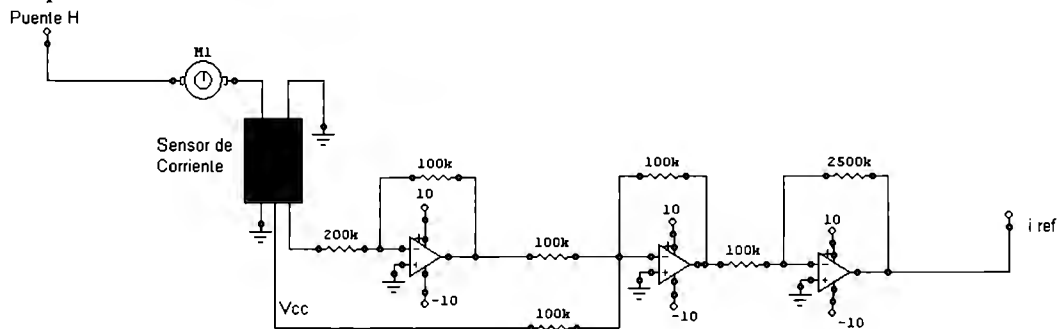


Figura 3.5.g "Sensor de corriente"

La figura 3.5.h muestra la respuesta del motor a un escalón sin un control de corriente. La figura 3.5.i nos muestra la respuesta del motor a una diversidad de entradas. Se

puede ver que ya no existen picos de corriente y existe solo un pequeño sobre impulso así como el control sigue a la señal.

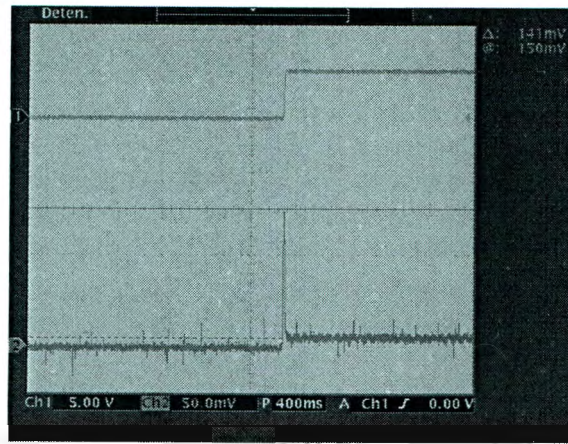


Figura 3.5.h "Pico de corriente"

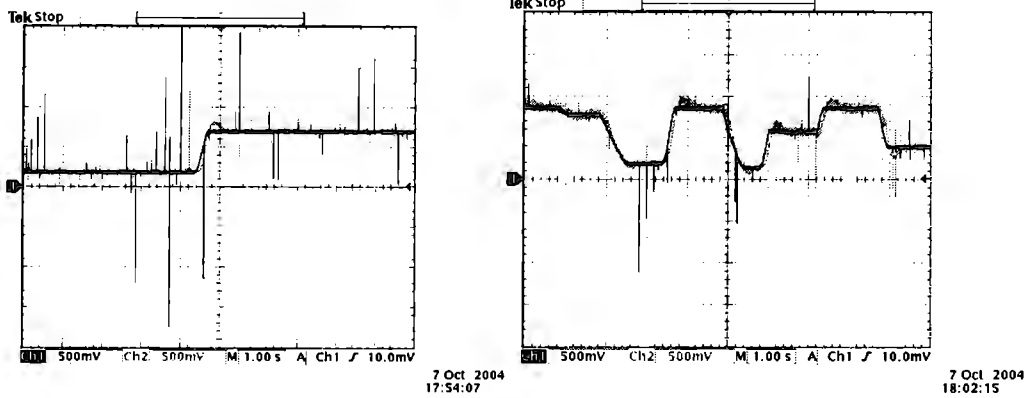


Figura 3.5.i "Respuesta con controlador"

ANEXO 3
MONITORIO DE LOS DATOS DE LA
EXPERIMENTACIÓN

3.6 Control de Posición y Velocidad

La aplicación desarrollada tiene como parámetros de diseño un tiempo de establecimiento de 4 segundos para la posición (para un movimiento máximo en la mesa), además de un transitorio suave y sobretiro lo más pequeño posible. De esta manera nuestro polo dominante debe ser de primer orden, para evitar el sobretiro.

Como $t_s=4$, la constante de tiempo debe ser de 1 segundo. Por lo tanto nuestro primer polo es $p_1=4/t_s=1$. Nuestro segundo polo debe ser por lo menos 5 veces más rápido para considerar la dinámica dominante de primer orden. Por lo tanto podemos posicionar nuestro polo con $t_s=(4s)/5$. De esta manera $p_2=4/t_s=5$.

Estos polos deseados están en el plano s. Para obtenerlos en el plano z necesitamos saber el tiempo de muestreo a utilizar. Como cuestión práctica, se dice que la frecuencia de muestreo debe estar en el rango de 20 a 40 veces el ancho de banda de los polos de lazo cerrado. El ancho de banda de p_1 es 0.2Hz. Así que la frecuencia de muestreo debe estar en el rango 34~8Hz, o bien, $T=.250\sim.125$ ms. De esta manera seleccionamos $T=100$ ms, para obtener más suavidad en el control.

Con este tiempo de muestreo podemos obtener nuestros polos de lazo cerrado utilizando el siguiente programa en Matlab.

```
tm=.1;
s=tf('s');
p1=1/(s+5);
p2=1/(s+1);
p11=c2d(p1,tm,'zoh')
p22=c2d(p2,tm,'zoh')
p1d=pole(p11);
p2d=pole(p22);
P=[p1d,p2d]
```

Obteniendo: $P=[0.60653 \quad 0.90483]$

La ecuación característica es:

$$(z - p_1)(z - p_2) = (z - .90483)(z - .60653) \quad .$$
$$\varphi(z) = z^2 - 1.51136z + 0.5488 \quad (3.6.1)$$

Podemos utilizar Matlab para encontrar estas ganancias, utilizando las funciones PLACE o ACKER. El siguiente programa de Matlab fue utilizado para obtener K.

```
tm=.1;
s=tf('s');
p1=1/(s+5);
p2=1/(s+1);
p11=c2d(p1,tm,'zoh')
p22=c2d(p2,tm,'zoh')
```

```

p1d=pole(p11);
p2d=pole(p22);
P=[p1d,p2d]

```

```

K = PLACE(A,B,P)

```

Con este programa se obtuvo la matriz K necesaria para tener los polos en donde se requieren. Los resultados se expresan en la siguiente tabla:

b	a	k_1	k_2
0.579828	0.9357	0.0646	0.6672

Tabla 3.6.1 "Ganancias de Retroalimentación de Estado"

Se planteó el sistema en Simulink como se muestra en la Figura 3.6.a.

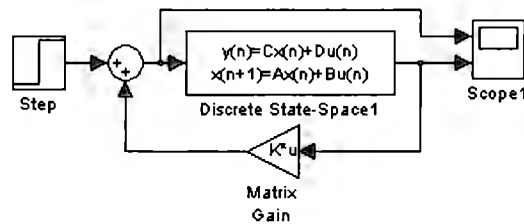


Figura 3.6.a Sistema Simulado

Finalmente los resultados se observan en las Figuras 3.6.b.

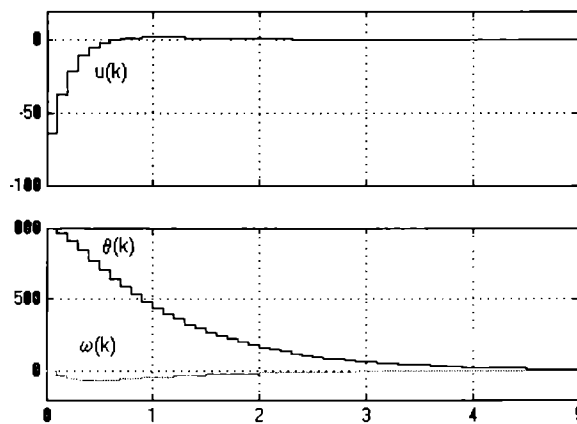


Figura 3.6.b "Respuesta a una entrada de posición"

Se observa que ambos sistemas tienen una regulación de 4 segundos de tiempo de asentamiento, no presentan oscilaciones y la entrada proporcionada es aceptable. Menos de 100mA para lograr un movimiento de 1000 pasos.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

C.1 Conclusiones del proyecto

Con respecto a los objetivos propuestos para el semestre Agosto-Diciembre, se han logrado la mayoría de los objetivos.

Se logró diseñar el sistema mecánico en su totalidad, se obtuvo el diseño de la mesa de coordenadas así como los planos acotados por pieza de la mesa. Se realizó la programación del código G y se implementó la manufactura de las correderas para cada eje con la precisión adecuada. Se llevó a cabo la compra de los rieles y la placa de la base de la mesa de coordenadas, así como se completó el acoplamiento de los tornillos sin fin, junto con los motores y el armado de la mesa en los ejes X y Y.

Se obtuvieron los materiales necesarios para la implementación de la máquina en su totalidad. Se obtuvieron los materiales para el diseño mecánico, los motores a utilizar, así como los componentes para la etapa de control. Se diseñó y se implementó un puente H para los motores de los ejes X, Y así como se implementó un PWM con señal triangular. Se consiguieron los sensores de posición y velocidad (encoders), así como los sensores de corriente para la etapa de control PI.

Una vez que se obtuvieron los motores se realizó un análisis detallado del funcionamiento de los motores. Se calculó el comportamiento para cada motor sacando las plantas eléctrica y mecánica de ellas. Se realizaron pruebas de funcionamiento para cada motor para que de esta manera se pudiera implementar el control de cada eje.

En cuanto a la etapa de control, se logró diseñar un esquema general del control de la máquina, así como el diseño de control específico de lo que necesita cada motor para cada coordenada. Se realizó el protocolo de comunicación en cada etapa desde la señal de la interfase a la máquina, durante el control general del sistema, comunicación para cada eje, etapa de potencia y retroalimentación de la máquina. Se logró implementar el control de corriente de manera analógica realizando un control respecto al comportamiento de los motores. De esta manera también se llevó a cabo el diseño de control de velocidad y posición por medio de una retroalimentación de estado.

El objetivo no alcanzado en la parte mecánica es la finalización del eje Z y revisión detallada de tolerancias para el completo funcionamiento de la mesa. Un problema importante a resolver fue también la correcta y precisa alineación de los rieles en cada eje de manera que se movieran perfectamente en línea recta además del correcto deslizamiento de las correderas sobre el riel.

El objetivo no alcanzado para la etapa de control fue la implementación del controlador de posición y velocidad de manera digital. También no se logró diseñar el controlador tipo PD ya que el diseño mecánico no se completó en su totalidad en el tiempo definido.

C.2 Alcances a Futuro

Este proyecto tiene muchos alcances a futuro. Empezando por lo básico, falta realizar la mesa de coordenadas en su totalidad con una mejor precisión en su funcionamiento. Se necesita volver a calcular los parámetros de los motores (planta mecánica) ya cuando los motores estén acoplados a la mesa funcional. De esta manera se puede diseñar e implementar un mejor control para la posición y velocidad para cada eje por medio de una generación de trayectorias y un controlador PD que considere el análisis mecánico en todo instante.

Un alcance próximo es la implementación y adaptación de la mesa funcional con la interfase. De esta manera una vez que se tenga el control de posición y velocidad, junto con el control de corriente, se puede verificar el funcionamiento con la interfase para realizar la mesa de manera automática, práctica y fácil de utilizar.

Un nuevo alcance a futuro es la realización de pistas. Este documento está hecho para poder generar perforaciones de una tarjeta de circuitos impresos, pero el material utilizado, así como la estructura mecánica nos permite hacer que el proyecto se pueda expandir a realizar las pistas del circuito en su totalidad.

C.3 Comentarios individuales

Alejandro (Diseño e implementación mecánica)

Quisiera mencionar que el proyecto es bastante amplio y la carga de trabajo es grande (Obtención de Plantas de los motores, Diseño e implementación del control, diseño e implementación de la etapa de potencia, Diseño e implementación de Fuentes de poder, Diseño de planos e implementación de la mesa de coordenadas, Diseño e implementación de la tarjeta de adquisición de datos para el microcontrolador, Programación, etc.), a diferencia de otros proyectos por lo que pienso que se deberían incorporar más miembros a algunos proyectos considerando su carga de trabajo y no tomar el número de integrantes igual, la apertura en este punto lograría una mejor calidad en los proyectos y un mejor cumplimiento de los objetivos.

Los problemas presentados en la parte mecánica fueron la incorrecta planeación del tiempo considerado para hacer la mesa debido a una falta de consideración de detalles importantes, además de la indisponibilidad en momentos de las máquinas y herramientas necesarias. Otro problema presentado también fue la indisponibilidad por parte del proveedor de los rieles y también un error al momento de la entrega de estos ya que no eran los de las medidas pedidas lo cual nos retrasó un poco.

La velocidad con la que se pueden operar las herramientas del laboratorio son muy bajas debido al tipo de material con que están fabricadas. Un punto a favor es la ayuda que se recibió para poder trabajar los sábados en el laboratorio y la ayuda de Milton, encargado del Laboratorio.

La realización de esta máquina es indispensable debido a que las máquinas del mercado tienen un alto costo como lo pudimos ver con la visita de LPKF ProtoMat cuya máquina más sencilla está cerca de los 10,000 dólares. Los objetivos no alcanzados en este semestre deben ser replanteados ahora que se cuenta con la experiencia por parte de los integrantes del equipo de manera que los tiempos y la planeación sean fijados de una manera más congruente y alcanzable. Se deben tomar en cuenta, dentro de la planeación, tiempos imprevistos que se puedan perder debido a la indisponibilidad de las herramientas de trabajo o problemas en la obtención de los materiales, además de tiempos debido a detalles no considerados dentro del diseño inicial. Otro punto importante es una mejor organización del equipo al momento de trabajar cada quien su parte pero no perder conexión con los demás procesos que se siguen para el desarrollo de la máquina, pienso que esta organización la podemos plantear de mejor manera dentro de Microsoft Project.

Los resultados a los que se llegaron, aunque fueron más lentos de lo planeado, fueron muy buenos ya que, por ejemplo, la parte de control quedó perfectamente detallada para continuar con su finalización el próximo semestre y poder hacer la ley de control en los microprocesadores. La parte mecánica finalizó con tolerancias entre $\pm 0.5\text{mm}$ y $\pm 0.1\text{mm}$ lo que muestra que se cumplieron con los objetivos de precisión esperados de la manufactura en CNC aunque los objetivos de tiempo no fueron alcanzados como ya mencioné debido a la planeación y a consideraciones no tomadas, sin embargo no se modificaron los objetivos de calidad para el recorte del tiempo, de haber sido así se hubiera invertido el cumplimiento de los objetivos teniendo una máquina más completa pero con mayores errores.

Una vez terminada por completo la manufactura y el control es importante replantear objetivos para llegar lo más lejos que se pueda con este proyecto de manera que se tenga una máquina totalmente automática con la interfaz en funcionamiento, esto con la ayuda de microcontroladores y programación además de poder contar con máquinas de tecnología mexicana que a la larga puedan resultar competitivas en el ámbito mundial.

Finalmente los conocimientos adquiridos durante la carrera dan las bases necesarias para la realización de este tipo de proyectos además de que reafirma los puntos importantes a considerar y ayuda a enfocar los conocimientos adquiridos y a darse cuenta de cómo se aplica finalmente la ingeniería a un proyecto, partiendo de unas bases teóricas bien fundamentadas para tener una buena visión de la realidad física. Este proyecto en especial es uno de los más enfocados a la Ingeniería Mecatrónica ya que abarca desde el diseño, la mecánica, la programación, la electrónica, hasta el control y planeación de procesos.

Carlos (Diseño e implementación de fuentes de energía)

Este proyecto siento que fue un poco diferente a cualquier otro, debido en primera instancia a que la conformación del equipo cambió de un semestre al otro, quedando del equipo original solamente Diego. Al integrarnos en este semestre Alejandro y yo al equipo, llegamos con ciertos objetivos, metas y diseños ya propuestos desde el semestre pasado por lo que nuestra tarea principal era desarrollarlos y aterrizarlos dentro de los límites de tiempo y económicos que se tenían sin abandonar la idea original por

completo. Aun así, el proyecto resulto igualmente retador que interesante, ya que nos obliga a integrar todas y cada una de las áreas cubiertas por nuestra carrera, desde la manufactura de los elementos de la mesa hasta la programación del microcontrolador que enviará las señales a la mesa. Sin olvidar la electrónica necesaria y el control de los motores, siendo esta última una de las partes mas importantes para el proyecto y para su funcionamiento deseado.

A pesar de que se dividieron las distintas etapas de este proyecto dentro de los integrantes, todos y cada uno estuvieron involucrados dentro del desarrollo de cada una de estas. Siendo imposible al final que uno solo pudiera realizar la parte mecánica, electrónica, eléctrica y de control.

En mi caso, me interesó mucho el proyecto y por el trabajo realizado durante todo el semestre me gustaría poder seguirlo desarrollando durante el semestre siguiente. Creo que Alejandro y yo nos involucramos en el proyecto al grado de que sería mucho mas fácil para nosotros continuar con la realización de la mesa hasta que se logre su funcionamiento total, que para cualquier otro equipo que tendría que descifrar el trabajo realizado durante ya un año de este proyecto.

Diego (Obtención de plantas, diseño e implementación de control)

Creo que este proyecto nos muestra un reflejo de nuestro aprendizaje durante la carrera. Es un proyecto muy ambicioso donde se abarcan todas las áreas de la Mecatrónica como tal. He aprendido mucho, no solo a diseñar el control para una máquina sino a implementar parte de ella. Además de esto, tuve que utilizar todas mis herramientas aprendidas durante mi carrera para poder realizar este trabajo.

Es interesante y satisfactorio cuando uno llega a realizar los objetivos. Para éste proyecto me propuse alcances muy altos, ya que el proyecto es muy ambicioso, pero los objetivos que he logrado han sido muy satisfactorios y me gustaría poder realizar el proyecto en su totalidad. El tiempo que se necesita para realizar este tipo de proyectos es mucho mayor al esperado, pero creo que se puede lograr.

La falta de tiempo y la desintegración del equipo durante el primer semestre, fue un factor que contribuyó a no poder completar la mesa en su totalidad. También creo que faltó más trabajo conjunto ya que nos dividimos el trabajo para cada integrante, pero faltó conjuntarlo todo en una implementación total. El trabajo en equipo no es fácil, sobre todo cuando se cambia de equipo, quizá faltó un poco más de entendimiento pero creo que en general trabajamos muy bien y logramos la mayoría de los objetivos para este semestre.

El proyecto tiene muchos alcances a futuro y voy a contribuir para realizarlos, ya que he aprendido mucho haciendo este proyecto y me sería muy grato verlo funcionando en su totalidad. También me gustaría agradecer a mis dos asesores Ernesto Olguín y Israel Macias, así como a mis compañeros Kpu Sandoval, Jerry Medina y Wally Sierra por haberme ayudado a realizar el control de la máquina, han sido un factor importante.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.A. Seireg. "Friction and Lubrication in Mechanical Design". Ed. Marcel Dekker: 1998.
- [2] John J. Craig. "Introduction to Robotics". Ed. Addison-Wesley: 1989.
- [3] Heineman, Stephen. "Machine Tools". Prentice Hall. USA pp.431.
- [4] Herbert Schildt. Manual de referencia de C#. Editorial McGraw Hill 2003.
- [5] Keneth G. Budinski. Egeineering Materials. Editorial Prentice Hall: 1992.
- [6] Luciano Chiang. "Análisis Dinámico de Sistemas Mecánicos". Segunda Edición, Editorial Alfaomega: 1999.
- [7] M.F. Spotts. "Design of Machine Elements". Séptima Edición, Editorial Prentice Hall: 1998.
- [8] Fuller. James. "Robotics, introduction, Programming and Projects". Prentice Hall. Ohio. pp. 487.
- [9] Ogata, Katsuhiko. "Modern Control Engineering", Prentice Hall. New Jersey. 2002.
- [10] Ogata, Katsuhiko. "Discrete-Time Control Systems", Prentice Hall. New Jersey. 1995.
- [11] Spong, Mark. "Robot Dynamis and Control", Wiley, New York, 1989
- [12] Roboprojects <http://web.mit.edu/kumpf/www/PCBMill.pdf>
- [13] PCB Milling Machine <http://www.roboshack.com/projects>
- [14] Adadm Kump. Innovative Projects. <http://web.mit.edu/kumpf/www/kumpf-projects.html>
- [15] Temposonics Commercial Sensors <http://www.commercial.mtslinearsensors.com/>
- [16] About Linear Potentiometers
http://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/linear_position_sensing/linear_potentiometers
- [17] Magnetostriction
<http://www.physics.hull.ac.uk/magnetics/Research/Facilities/Magnetostriction/magnetostriction.html>
- [18] C# Introduction and Overview <http://www.csharp-help.com/what.html>

- [19] Giga Techonolgy <http://www.gigatechnology.com/usbmodprod.html>
- [20] PCB Milling Machine <http://www.roboshack.com/projects>
- [21] Servo Control <http://www.euskalnet.net/shizuka/rs232.htm>
- [22] Dunkermotoren <http://www.dunkermotoren.de>
- [23] Pittman <http://www.pennmotion.com/>
- [24] Direct Industry <http://www.directindustry.com.mx>
- [25] Control https://www.ece.ubc.ca/~elec360/Kuo_OpAmps.pdf
- [26] Newark <http://www.newark.com>
- [27] National Semiconductors <http://www.national.com/>
- [28] Entrevista con el Profesor Sergio Horta, de la división de ingeniería del Campus Querétaro
- [29] Entrevista con Mario Quiroz y Patricia García de la empresa Parker
- [30] Clase de control de motores
- [31] Software Matlab v.61
- [32] Software PRO E
- [33] Allit Murguía Rubén, Angel Vázquez Miguel, “Circuit Driller”, Proyectos de Ingeniería, ITESM-CCM, 2004.

6. ANEXOS

A.1 Trabajo del Primer Semestre

Desarrollo Mecánico

2.1 Análisis

2.1.2 Diseño Mecánico

El proveedor de perfiles es Industrial Profile Systems IPS, el cual nos proporcionó sus catálogos para poder decidir cuáles serían exactamente los perfiles a utilizar en nuestra estructura, después de un análisis completo, guiándonos principalmente por el criterio geométrico y dimensional, optamos por perfil 11-080 que se muestra en la *Figura 4*.

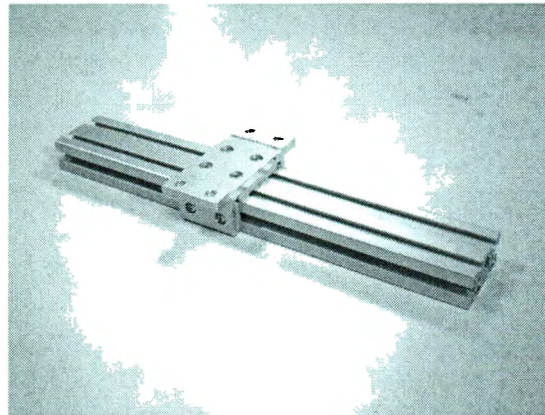
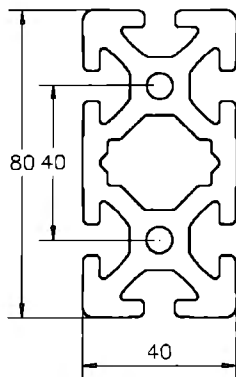


Figura 4. (Izq.) Sección transversal del Perfil de Aluminio. (Der.) Riel con deslizador acoplado

Ya seleccionado el perfil, resultaron estas las especificaciones del material:

- Material “Prime Aluminum” 6005-T5
- Fluencia 35,000 psi
- Tensión 38,000 psi
- Módulo de Elasticidad 10,150 psi
- Dureza Brinell 75 HB
- Tolerancia $\pm (0.2 - 0.4)$ mm

Se elaboraron diversos planos de cada una de las estructuras, los cuales se anexan en la parte final de este trabajo (Apéndice 1), con las dimensiones estándares y necesarias para poder desarrollar el proyecto. Las dimensiones máximas de las tarjetas a perforar en un principio fueron 30 x 30 cm, pero debido a que las tarjetas comerciales no llegan a esas dimensiones, se decidió recortar a 20 x 20 cm. Otro factor decisivo para realizar el cambio de las tarjetas a perforar fue el hecho de que entre mayor sea el tamaño, los rieles también aumentan su largo, y por consecuencia aumentan las masas en desplazamiento.

Finalmente, se elaboró un modelo con ayuda del programa Solid Edge™ para poder tener una mejor visión del proyecto. Las dimensiones establecidas en este modelo son reales y reflejan una coherente opción de ensamble que llevaría a una correcta distribución de pesos, así como se evitan las imprecisiones por vibraciones o posibles “juegos” entre las piezas que reducirían de manera significativa la calidad de los trabajos finales. En la *Figura 5* se puede apreciar el modelo final.

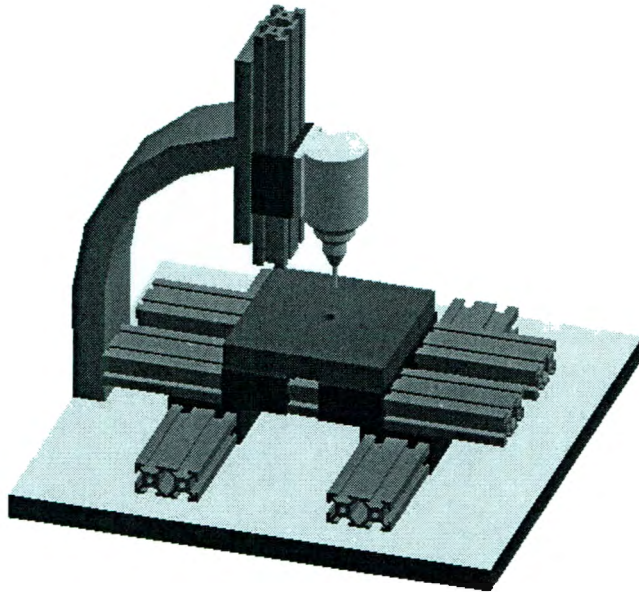


Figura 5. Modelo Final

2.1.2 Análisis Dinámico de Sistemas Mecánicos

Es de nuestro interés obtener un modelo del sistema mecánico del proyecto para conocer su comportamiento dinámico en cualquier instante. Mediante la mecánica analítica, acercamiento propuesto por Louis Lagrange en 1788, se pueden obtener las ecuaciones diferenciales del movimiento para el sistema mecánico, lo cual no siempre es posible empleando la mecánica clásica [3]. El método propuesto por Lagrange permite obtener estas ecuaciones diferenciales de manera sistemática y eficiente. A través del método propuesto de Lagrange podremos conocer la dinámica del sistema para cualquier instante [3].

Para comprender el análisis de Lagrange es necesario entender el concepto de coordenada generalizada. Una coordenada generalizada es un conjunto de variables cuya magnitud determina la posición absoluta de un sistema, es decir que si conocemos las coordenadas generalizadas de un sistema, seremos capaces de conocer la posición y orientación de los elementos del sistema. Se dice que un conjunto de coordenadas generalizadas está completo cuando permite especificar sin ambigüedades. Además un conjunto de coordenadas generalizadas es independiente cuando no tienen relación alguna entre sí.

Entonces si tenemos una partícula cuya posición \mathbf{r} respecto al origen es función de un conjunto de coordenadas generalizadas completo e independiente $\mathbf{q}=(q_1, \dots, q_n)$ entonces $\mathbf{r}(q_1, \dots, q_n)$, o sea que la posición de la partícula está descrita por el conjunto de coordenadas generalizadas (q_1, \dots, q_n) . La mecánica analítica de Lagrange propone un concepto llamado Lagrangiano, cuya expresión es $L=K-U$. De esta manera y empleando el Lagrangiano, podemos expresar la ecuación de las fuerzas generalizadas como:

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (2.1)$$

Esta ecuación se conoce como la formulación Euler-Lagrange, donde τ son las fuerzas generalizadas en la dirección de q .

Ahora aplicaremos el análisis de Lagrange a nuestro sistema. Nuestro sistema se divide en dos componentes. El primero es del que forma parte el taladro y que cubre la dirección z . El segundo esta compuesto por la mesa de posiciones, la cual cubre las direcciones “ x ” y “ y ”.

2.1.2.1 Análisis del eje Z

Conjunto de Coordenadas Generalizadas: $q=z$

El relación entre la velocidad lineal y la angular se define como: $n = z / \omega$

La energía cinética esta dada por:

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{2} m_t \dot{z}^2 + \frac{1}{2} J \omega^2 \\ k &= \frac{1}{2} \left(m_t + \frac{J}{n^2} \right) \dot{z}^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

donde m_t es la masa de del acoplamiento del taladro al riel y el taladro en sí y J es el momento de inercia. La energía potencial se compone de:

$$\begin{aligned} U &= m_t g(cte + z) + m_{\text{tornillo}} g(cte) + m_{\text{motor}} g(cte) \\ U &= m_t g z + U_o \end{aligned} \quad (2.3)$$

Si tomamos z positivo hacia arriba entonces:

$$z + \uparrow$$

$$z_{\max} = 0.02 \frac{m}{s}$$

El Lagrangiano sería:

$$L = K - U$$

$$L = \frac{1}{2} \left(m_i + \frac{J}{n^2} \right) \dot{z}^2 - m_i g z + U_o \quad (2.4)$$

Ahora de la ecuación de fuerzas generalizadas...

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (2.5)$$

...obtenemos los términos necesarios derivando con respecto a z y t.:

$$\frac{\partial L}{\partial q} = \frac{\partial L}{\partial z} = -m_i g$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = \left(m_i + \frac{J}{n^2} \right) \dot{z} = M \dot{z} \quad (2.6)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = M \ddot{z}$$

Sustituyendo cada término en la ecuación queda:

$$M \ddot{z} + m_i g = f_z \quad (2.7)$$

Además sabemos que:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F d}{t} = F v = \tau \omega \quad (2.8)$$

$$f_z \dot{z} = \tau_m \omega$$

$$f_z = \tau_m \frac{\omega}{\dot{z}} = \frac{1}{n} \tau_m$$

Y debemos de incluir un término que tome en cuenta la fricción viscosa, en este caso B, este término se resta a las fuerzas y la ecuación queda así:

$$M \ddot{z} + B \dot{z} + m_i g = \frac{1}{n} \tau_m \quad (2.9)$$

2.1.2.2 Análisis de los ejes x e y

Aquí la energía potencial es invariable por lo que el Lagrangiano se compone únicamente de la energía cinética.

$$\begin{aligned}
 L &= K - U \\
 U &= cte
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

$$L = K$$

Conjunto de coordenadas generalizadas:

$$q = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Las velocidades angulares en cada eje están determinadas por el paso de cada tornillo sin fin.

$$\begin{aligned}
 \omega_1 &= \dot{x} / P_x \\
 \omega_2 &= \dot{y} / P_y
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

La energía cinética queda así:

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2 \\
 K &= \frac{1}{2} \left(m_1 + m_2 + \frac{J_1}{P_x^2} \right) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \left(m_2 + \frac{J_2}{P_y^2} \right) \dot{y}^2
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

generalizando las inercias y los términos de esta ecuación quedan así:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial K}{\partial q} &= 0 \\
 \frac{\partial K}{\partial q} &= \begin{pmatrix} \frac{\partial K}{\partial q_1} \\ \frac{\partial K}{\partial q_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_1 \dot{q}_1 \\ M_2 \dot{q}_2 \end{pmatrix} ; \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} = \begin{pmatrix} M_1 \ddot{q}_1 \\ M_2 \ddot{q}_2 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_1 \ddot{q}_1 &= f_x = \tau_x / P_x - B_1 \dot{q}_1 \\
 M_2 \ddot{q}_2 &= f_y = \tau_y / P_y - B_2 \dot{q}_2
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

$$M_1 \ddot{q}_1 + B_1 \dot{q}_1 = \tau_x / P_x$$

$$M_2 \ddot{q}_2 + B_2 \dot{q}_2 = \tau_y / P_y$$

$$K = \frac{1}{2} (M_1 \dot{q}_1^2 + M_2 \dot{q}_2^2)$$

La ecuación...

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (2.14)$$

queda...

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial K}{\partial q} = \tau \quad (2.15)$$

2.1.3 Generación de Trayectorias

Una trayectoria se refiere a un historial de la posición, velocidad y aceleración para cada grado de libertad. Lo que se busca es simplificar al usuario la especificación de trayectorias, dando sencillas descripciones del movimiento a realizar, dejando al sistema calcular los detalles. Por ejemplo, el usuario puede definir una posición y orientación final, y dejar al sistema que decida la forma exacta de la trayectoria para llegar ese punto, así como la duración, el perfil de velocidad y otros detalles.

Un método de planeación de trayectoria es por medio de una función lineal con mezcla parabólica. Para esta se selecciona una trayectoria lineal de un punto inicial a un punto final. El problema aquí es que tomando esta función y derivándola, muestra una función de velocidad discontinua al inicio y final por lo que se tiene que mezclar con funciones parabólicas. Para que la velocidad en la parte parabólica tenga un comportamiento suave, se selecciona una aceleración constante durante este tiempo. Si se aplica una parábola al inicio y otra al final de la trayectoria, durante estos tiempos la aceleración va a tener un comportamiento constante.

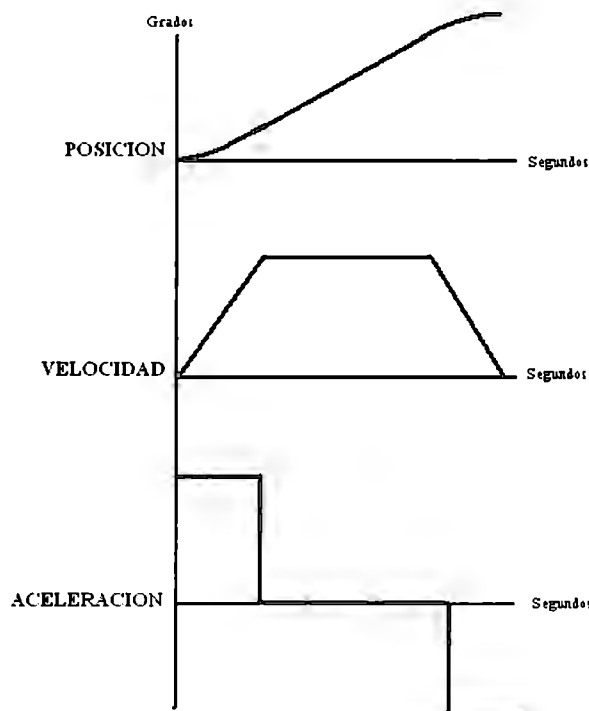


Figura 6. Planeación de Trayectorias con función lineal y parabólica

Considere el problema en que se conocen las posiciones iniciales y finales, así como el tiempo de la trayectoria. Al realizar un movimiento suave simple, al menos 4 restricciones en $\theta(t)$ son necesarias para poder realizar la interpolación entre ambos puntos. Dos de estas restricciones vienen de la selección inicial y final de valores:

$$\begin{aligned}\theta(0) &= \theta_0 \\ \theta(t_f) &= \theta_f\end{aligned}\tag{2.16}$$

Además se tienen las otras dos restricciones que tienen que ver con la condición de continuidad en la velocidad, que se traduce en que los valores inicial y final son cero:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}(0) &= 0 \\ \dot{\theta}(t_f) &= 0\end{aligned}\tag{2.17}$$

Estas cuatro restricciones únicamente pueden ser satisfechas por un polinomio de al menos grado tres. Como un polinomio cúbico tiene 4 coeficientes, puede ser construido para satisfacer las 4 restricciones anteriores. La forma cúbica es de la siguiente manera:

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3\tag{2.18}$$

De la misma forma la velocidad y la aceleración quedan así:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}(t) &= a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \\ \ddot{\theta}(t) &= 2a_2 + 6a_3t\end{aligned}\tag{2.19}$$

Cuando se quieren especificar los valores iniciales y finales de la posición, velocidad y aceleración, es necesario utilizar polinomios de un orden superior, en este caso de quinto orden:

$$\Theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5\tag{2.20}$$

En donde las condiciones quedan de esta manera:

$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_f \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta}_f \\ \ddot{\theta}_0 \\ \ddot{\theta}_f \end{pmatrix} \quad T = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 & t_f^4 & t_f^5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 & 4t_f^3 & 5t_f^4 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_f & 12t_f^2 & 20t_f^3 \end{vmatrix} \quad a = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix}$$

$$\theta = Ta\tag{2.21}$$

$$\begin{aligned}
\theta_0 &= a_0 \\
\theta_f &= a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 + a_4 t_f^4 + a_5 t_f^5 \\
\dot{\theta} &= a_1 \\
\dot{\theta}_f &= a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 + 4a_4 t_f^3 + 5a_5 t_f^4 \\
\ddot{\theta}_0 &= 2a_2 \\
\ddot{\theta}_f &= 2a_2 + 6a_3 t_f + 12a_4 t_f^2 + 20a_5 t_f^3
\end{aligned}$$

Estas restricciones dan como resultado un grupo de seis ecuaciones lineales con seis incógnitas, en las que se asignan valores de cero a las velocidades y aceleraciones tanto finales como iniciales, asegurando así trayectorias suaves y evitando picos de cualquier tipo en las variables, ya resueltas quedan de la siguiente manera:

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{20\theta_f - 20\theta_0}{2t_f^3} \\ \frac{30\theta_0 - 30\theta_f}{2t_f^4} \\ \frac{12\theta_f - 12\theta_0}{2t_f^5} \end{pmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{?} \quad (2.22)$$

2.2 Simulación

2.2.1 Potencia del Motor

2.2.1.1 Eje Z

Despejando el torque de la fórmula que se obtuvo en el análisis dinámico del sistema en el eje Z queda de la siguiente manera:

$$\tau_z = (M_z \ddot{z} + B_z \dot{z} + m_z) n_z \quad (2.23)$$

Este valor de torque es lo que necesita el motor en el eje. Para esto se realizaron los cálculos en Simulink para obtener el valor máximo en un tiempo dado. Este sistema tiene como entrada el valor inicial y final de la posición que se desea mover. De salida se tiene el tiempo de muestra (solo útil para los parámetros de muestreo de Simulink), la posición, velocidad, aceleración y torque del movimiento de masa. Si este torque se

multiplícala por la velocidad angular del motor, se obtiene la potencia en Watts que el motor necesita, por lo tanto, las especificaciones necesarias del motor.

Función en Simulink (Cálculo de la Potencia del motor):

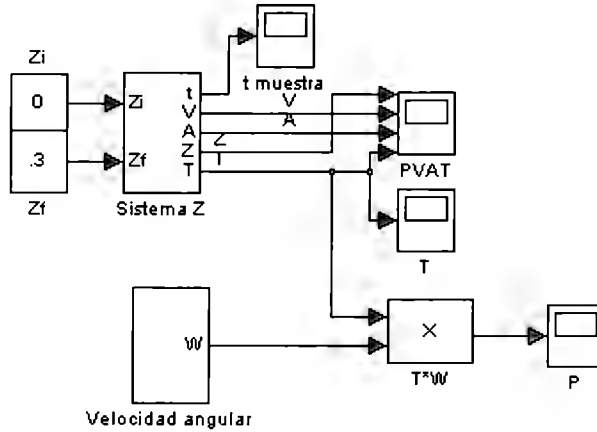


Figura 7. Función de potencia (eje Z)

Dentro de Sistema Z (figura 6) se tienen dos funciones. La función ZVA (figura 7) tiene como entrada la posición inicial y final, así como un reloj para cuestiones de muestreo en Simulink. La función ZVA calcula el tiempo de muestreo, posición, velocidad y aceleración. La función Torque (figura 7) tiene como entrada la velocidad y la aceleración y como salida nos da el torque.

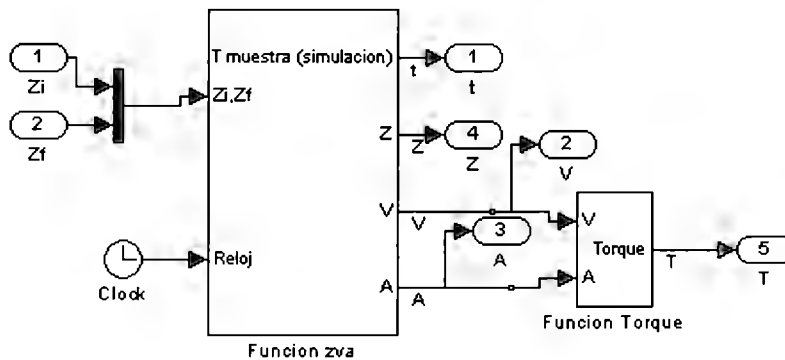


Figura 8. Sistema Z de posición, velocidad, aceleración y torque

La figura 8 nos muestra como esta compuesta la Función ZVA (figura 7). Esta tiene como entrada la posición inicial y final las cuales son evaluadas en una función de Matlab (tipo M-File, Apéndice 1.3) la cual calcula, por medio de las ecuaciones de la generación de trayectoria, las constantes necesarias. Estas constantes entran en forma de vector dentro de las funciones de posición, velocidad y aceleración las cuales calculan sus valores dentro de un tiempo dado. Las funciones de Posición, Velocidad y Aceleración solo evalúan las constantes obtenidas en las ecuaciones de generación de trayectorias.

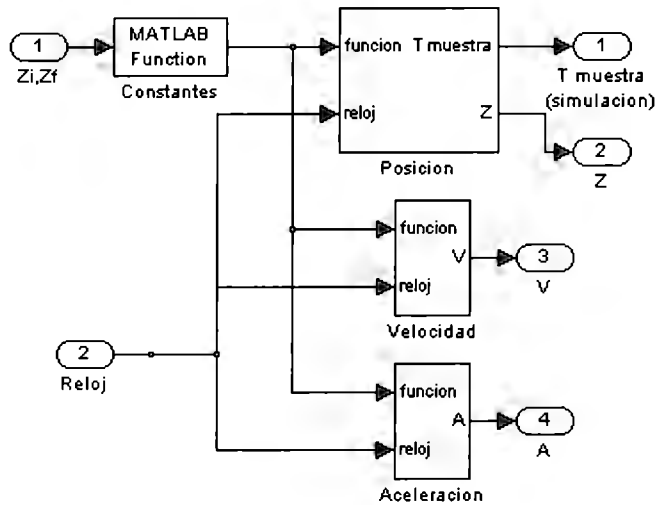


Figura 9. Función ZVA para posición, velocidad y aceleración

En la figura 9 se observa como esta compuesta la Función Torque (figura 7). La figura 9 nos representa la ecuación de análisis dinámico representado en bloques donde está en función de las variables fricción, masa, gravedad, momento de inercia y el paso. Una vez evaluada esta función, la salida nos va a dar el torque en Nm.

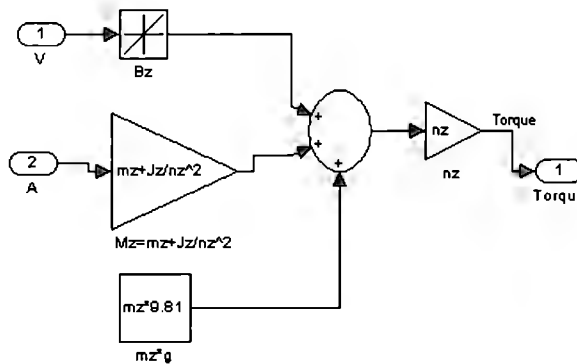


Figura 10. Función Torque para Z

La función de velocidad angular (figura 10) es tan solo la velocidad lineal multiplicada por una constante la cual depende del paso del tornillo sin fin. La velocidad angular es multiplicada por el torque para obtener la Potencia del motor. Utilizando los siguientes valores teóricos para Z tomando como distancia máxima a recorrer de 30cm (altura), una masa de 1kg, momento de inercia de 1.4063e-005 kg*m², paso de 1/500 m, y una fricción viscosa de 0.2 Pa*s (Apéndice 1.4), se obtienen las siguientes gráficas para posición, velocidad, aceleración y torque.

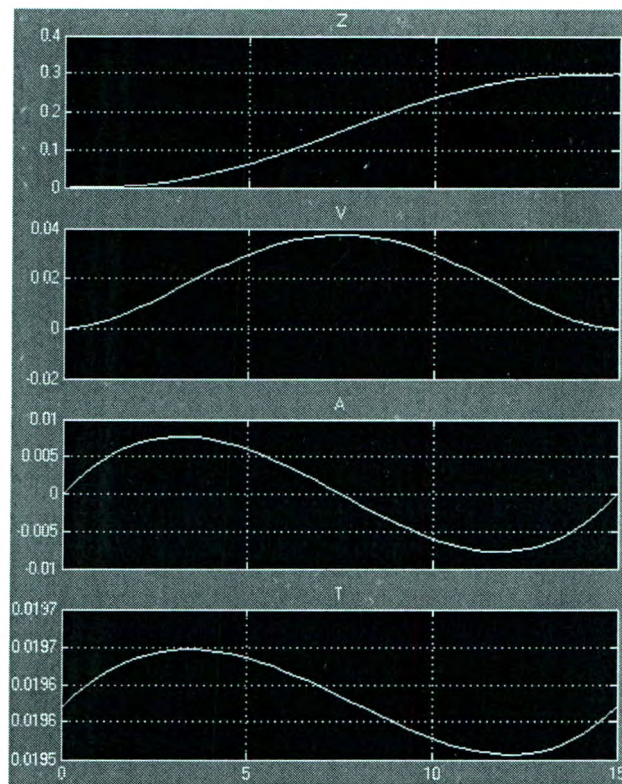


Figura 11. Gráfica de Z,V,A y T

La posición va de 0 a 0.3m que es la distancia a recorrer por medio de una función cúbica. La velocidad tiene una forma parabólica continua con un máximo de aproximadamente 0.04 m/s. La aceleración también es continua aunque tiene valores positivos y negativos ya que comienza acelerando y luego tiene que desacelerar para llegar al punto deseado. El torque no comienza ni termina en 0 ya que la fuerza de la gravedad siempre va a estar presente, por lo que el valor inicial y final de este torque va a ser la masa por la gravedad multiplicada por el paso.

Multiplicando el torque por la velocidad angular se obtiene la gráfica de la figura 11 la cual es la potencia para el motor. Su valor máximo es de 130W por lo que el motor tiene que soportar un mínimo de 130W.

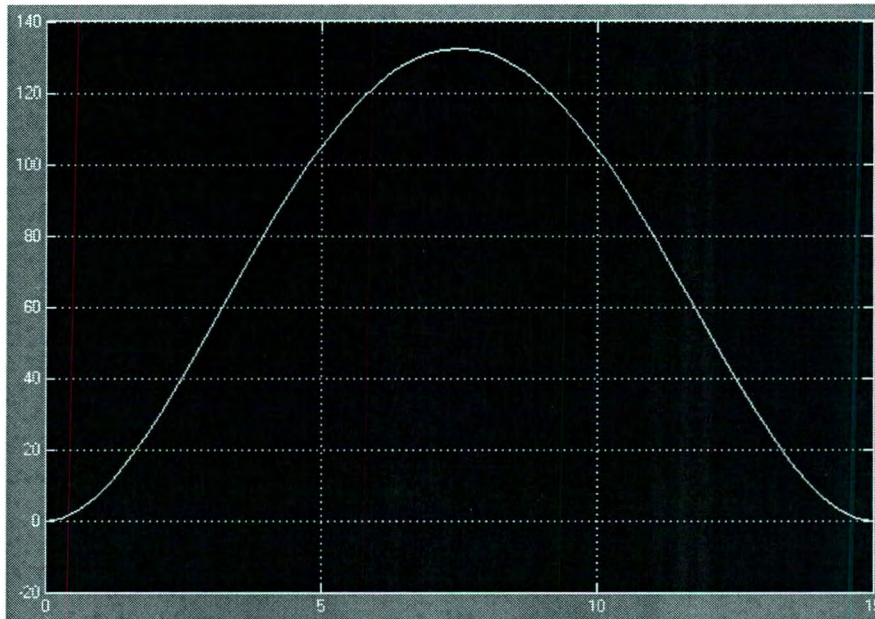


Figura 12. Gráfica de Potencia del motor Z

2.2.1.2 Eje X

Despejando el torque de la fórmula obtenida en el análisis dinámico del sistema en el eje X queda de la siguiente manera:

$$\tau_x = (M_x z + B_x z) n_x \quad (2.24)$$

Para obtener la potencia del motor en el eje X, se analiza de la misma manera que en el eje Z vistas en las figuras 6, 7 y 8. La única diferencia que existe es en la función de torque donde la ecuación es diferente. Para esto se siguió el siguiente diagrama de bloques.

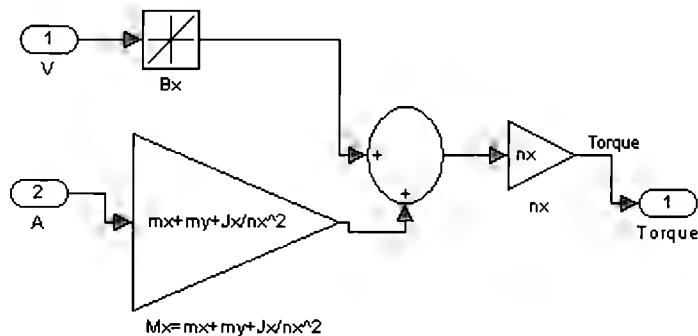


Figura 13. Función Torque para X

Utilizando los siguientes valores teóricos para X tomando como distancia máxima a recorrer de 30cm, una masa total de 7.5kg, momento de inercia de 1.4063e-005 kg*m², paso de 1/500 m, y una fricción viscosa de 0.3 Pa*s (Apéndice 1.4), se obtienen las siguientes gráficas para posición, velocidad, aceleración y torque.

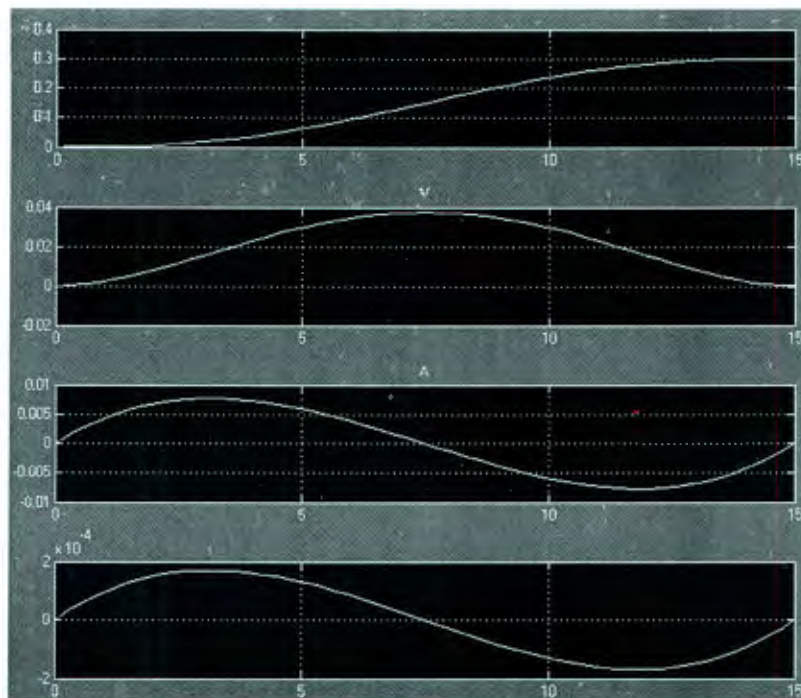


Figura 14. Gráfica de X,V,A y T

La gráfica de posición, velocidad y aceleración son iguales a las del eje Z. Donde existe una diferencia es en el torque ya que este si comienza *desde* 0 y termina en 0 ya que no tiene gravedad la cual este siempre aplicando una fuerza como en el eje Z. El torque sigue una trayectoria parecida a la aceleración ya que las fuerzas de fricción son muy pequeñas comparadas a las de la masa.

Multiplicando el torque por la velocidad angular tenemos la siguiente gráfica, donde se puede observar que la potencia máxima es de 5.2 Watts aproximadamente.

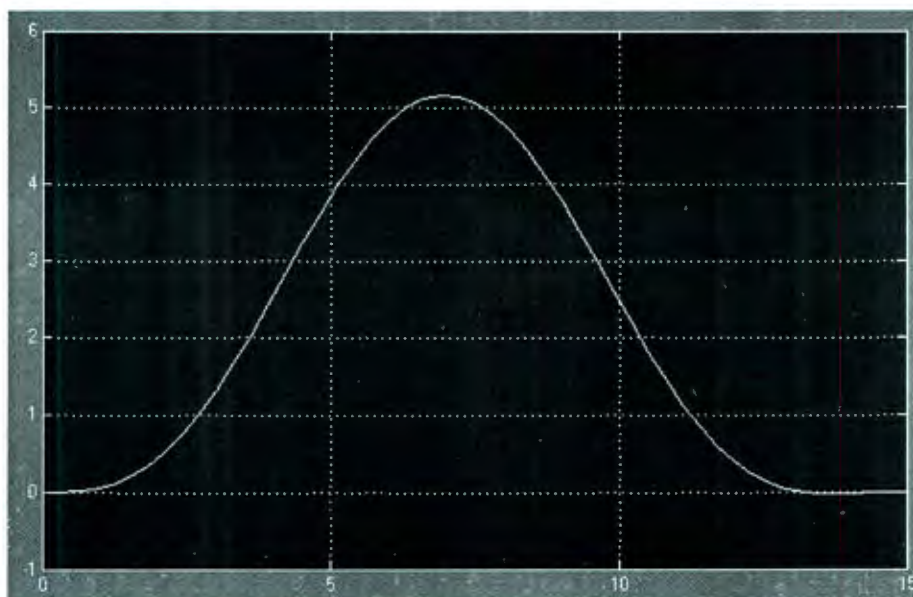


Figura 15. Gráfica de potencia del motor X

2.2.1.3 Eje Y

Despejando el torque de la fórmula obtenida en el análisis dinámico del sistema en el eje Y queda de la siguiente manera:

$$\tau_y = (M_y z + B_y z) n_y \quad (2.25)$$

Para obtener la potencia del motor en el eje Y, se analiza de la misma manera que en el eje Z vistas en las figuras 2,3 y 4. La única diferencia que existe es en la función de torque donde la ecuación es diferente. Para esto se siguió el siguiente diagrama de bloques.

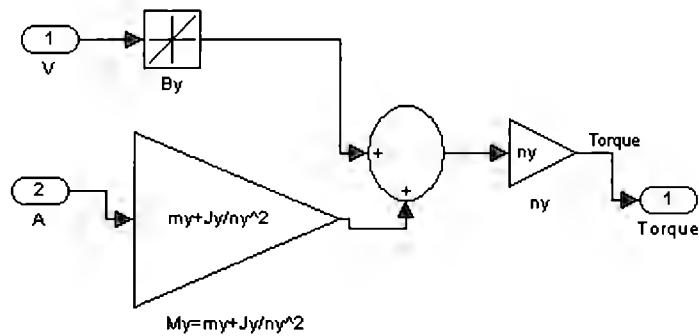


Figura 16. Función Torque para Y

Utilizando los siguientes valores teóricos para Y tomando como distancia máxima a recorrer de 30cm, una masa total de 1.5kg, momento de inercia de 1.4063e-005 kg*m², paso de 1/500 m, y una fricción viscosa de 0.1 Pa*s (apéndice III muestra el cálculo de los valores), se obtienen las siguientes gráficas para posición, velocidad, aceleración y torque.

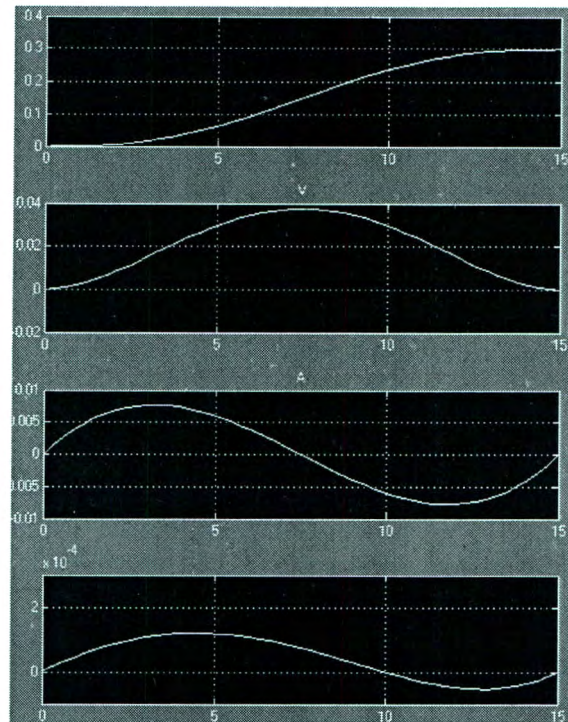


Figura 17. Gráfica de Y,V,A y T

Las gráficas de posición, velocidad y aceleración son las mismas que las analizadas en el eje Z y eje X. El torque comienza en 0 y termina en 0 siguiendo una trayectoria parecida a la aceleración debido a que la fuerza de fricción es pequeña comparada a la masa en el eje Y. La mayor diferencia entre el eje X y Y es la masa. Para la potencia, se multiplica el torque por la velocidad angular y da la siguiente gráfica donde la potencia máxima del motor es de 1.1 Watts aproximadamente.

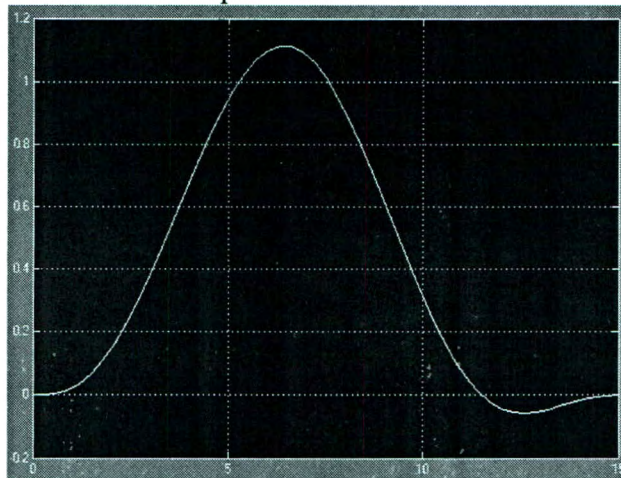


Figura 18. Gráfica de potencia del motor Y

Resultados conjuntos

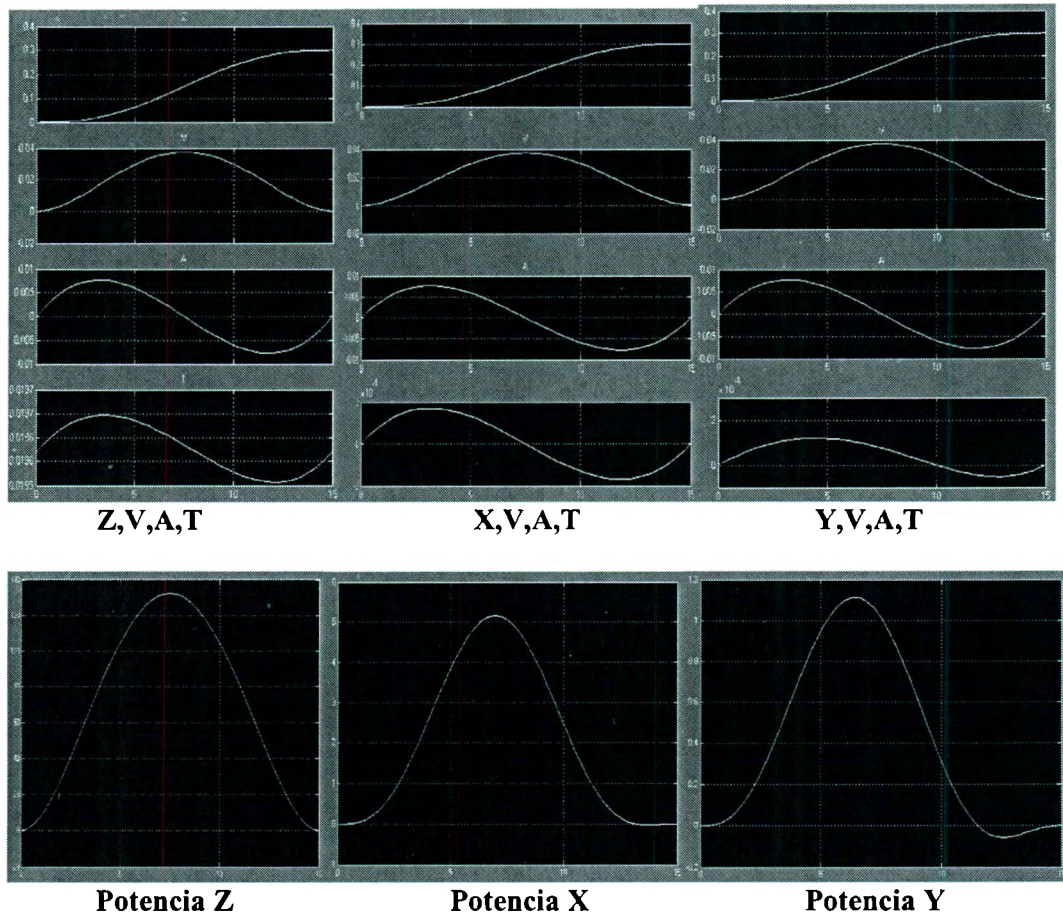


Figura 19. Gráficas de Resultados

2.3 Sensores

Para retroalimentar el lazo de control es necesario contar con un sensor que permita conocer la posición real de algún punto de referencia del sistema mecánico. Existen en el mercado un sin número de opciones con diferentes costos y configuraciones. La característica principal que diferencia a cada uno de los sensores disponibles es el principio físico que emplean para medir la posición (o el desplazamiento) de un elemento. Asimismo, este principio determina las capacidades del sensor así como su posible costo. Por ejemplo, se puede emplear una resistencia lineal que permita conocer la posición de un elemento dependiendo del voltaje que la posición de éste provoque. Es decir que el elemento varía una resistencia (por ende el voltaje en un circuito) dependiendo de la posición en la que se encuentre. Este principio es ampliamente utilizado en la industria desde hace tiempo y el costo de los sensores comerciales es relativamente bajo.

Existen principios algo más sofisticados y precisos para medir la posición de un elemento, como el principio de la magnetostricción. La magnetostricción es una propiedad encontrada en materiales magnéticos donde el material cambia su forma cuando se le aplica un campo magnético. Los materiales magnetostrictivos tienen la propiedad de convertir energía magnética en energía mecánica. Cuando un material magnetostrictivo se magnetiza, éste se deforma y esa deformación viaja en forma de un pulso a velocidades sónicas. En un sensor magnetostrictivo se induce un pulso sónico deformativo por la interacción momentánea de dos campos magnéticos. Uno de los campos proviene de un imán permanente móvil que puede ir unido a la pieza de la cual se desea conocer su posición. El pulso provocado por la interacción de los campos es sentido y la posición del imán es determinada con gran precisión midiendo el tiempo que transcurrió entre la aplicación del pulso y su llegada al sensor. El gran inconveniente de este tipo de sentido es que por el momento resulta altamente costoso.

Debido a esta gran variedad de métodos de sentido es difícil tomar una decisión en cuanto a cual debe de ser el sensor adecuado para la aplicación siendo que ésta no se encuentra construida en este momento. Debido a esto es necesario hacer un análisis de los métodos de sentido disponibles antes de tomar cualquier decisión cuando el prototipo esté construido. En la *Tabla 1se* comparan los aspectos más importantes de los diferentes métodos de sentido de posición y pretende ser una guía de selección para la elección del tipo de sensor que deberá ser implementado en el prototipo:

Tabla 1. Características y desempeño de diferentes sensores lineales de posición [17]

	MTS Temponsonics	LVDT	Otros Magnetostrictivos	Encoder Óptico	Potenciomet
Mecánica de sensado	Sin contacto	Sin contacto	Sin contacto	Sin contacto (1)	Principalmen contacto
Tipo de sensado	Absoluto	Absoluto	Absoluto	Principalmente Incremental	Absoluto
Durabilidad	Alta	Alta	Alta	Mediana	Baja
Resolución	0.002mm	"Infinita"(2)	0.005-0.025mm	0.0001-0.001mm(3)	"Infinita"(3)
No-linealidad	±40µm a 0.01% FS	±0.1%-1%	±0.02%	±0.01%	±0.05%
Carrera	5 a 20,000mm	1 a 100mm	10 a 5000mm	50 a 2000mm	50 a 1500mm
Opciones de salida	Analógica, Digital, Pulsos, Bus de campo, Posición+Velocidad o Posición múltiple	Típicamente analógica	Analógica, Digital Pulsos o Bus de campo	Cuadratura incremental o absoluta	Analógica
Costo	Mediano	Mediano	Mediano	Alto	Bajo

(1) La cabeza de sensado es independiente del elemento de sensado. Se requiere de un cable largo flexible desde la cabeza de sensado a la electrónica.

(2) Depende del ruido de la señal y del rizado del sistema.

(3) Para una mayor resolución se requiere de interpoladores que acondicionen la señal.

3. Interfases

El proyecto tiene como ambición poder interpretar los archivos generados por software de diseño de circuitos electrónicos (como Protel) y que la máquina sea capaz de realizar automáticamente las perforaciones necesarias. Para esto es necesario crear una aplicación que lea los archivos generados por este tipo de software (como los archivos Gerber). Además de esta interfase con el usuario, es necesario crear una interfase entre la computadora y la electrónica que será empleada para el control de los motores. Esto significa que el software se encargará de interpretar las coordenadas proveídas por el archivo del circuito y mandará las señales eléctricas necesarias a la electrónica que controlara el movimiento de la máquina.

Las posibilidades en cuanto a estas dos interfases son variadas. En cuanto a la aplicación encargada de interpretar los archivos de diseño se propone programarla en el lenguaje C#. Este es un lenguaje considerado como la evolución de C++. Se debe recordar que C++ es la versión orientada a objetos de C. C# es una evolución en el sentido de que tiene todos los elementos de C++ pero incorpora una serie de mejoras. Estas mejoras incluyen la creación de aplicaciones con una sencillez similar a la que proporciona VisualBASIC, mayor portabilidad entre sistemas operativos y una orientación hacia la plataforma .NET de Microsoft. Otra razón para programar la interfase en este lenguaje es que es lo último que se está desarrollando, por lo que se estaría trabajando con tecnología de estado del arte.

En cuanto a la interfase entre la computadora y la electrónica del control de la máquina, lo más conveniente sería emplear el puerto USB. Esto debido a la tendencia de las computadoras a ya no incluir un puerto paralelo, además de que todos los periféricos que van surgiendo en la actualidad emplean el puerto USB como puerto de comunicaciones. De esta manera se estaría empleando tecnología de estado del arte para la creación de esta interfase. Para esto, existen módulos que permiten una conversión del protocolo USB a serial lo que nos permitiría comunicarnos directamente con un microcontrolador. Estos módulos tienen un costo aproximado de \$50 dólares americanos más gastos de envío.

La creación de la interfase es una parte importante del proyecto. Empleando tecnologías del estado del arte se pretende que el proyecto utilice la última tecnología disponible para garantizar su funcionalidad además de permitir que pueda ser escalado en proyectos posteriores.

Conclusiones

Resumen de resultados

El trabajo realizado durante este semestre arrojó diferentes resultados. El propósito al inicio era el de tener construido el prototipo de la máquina al finalizar el semestre. Una de las razones más importantes que impidieron la construcción del prototipo este semestre fue el aspecto económico ya que los diferentes materiales y componentes de materiales se salen del presupuesto previsto para el proyecto.

De esta manera, los resultados que se entregan son el diseño de la máquina y la selección de los motores. Se incluye también la cotización de los diferentes elementos requeridos para la construcción de la máquina. El material a utilizar para los rieles es el Aluminio con Nylamid gracias a su baja fricción y bajo peso. El peso total del mecanismo va a ser de 8.5Kg. Las dimensiones del mecanismo XY son de 20cm x 20cm. Los motores a utilizar van a ser de corriente directa con una potencia de 1.1, 5.2 y 130 Watts como mínimo (motores de 1/8HP y 600rpm). Se va a utilizar una relación de velocidad lineal con angular de 0.002 así como una planeación de trayectoria por medio de control digital. El costo total para la construcción del mecanismo con los motores es de aproximado es de \$15,000 pesos.

Propuestas de trabajo a futuro

Para el siguiente periodo, se tiene como objetivo principal construir la mesa de posiciones X-Y, así como el eje Z. Además, se pretende diseñar e implementar las interfases requeridas para comandar los motores que darán el movimiento a la mesa. Como se menciona en el apartado de Interfases, esta planeado crear una aplicación en el lenguaje C# y realizar la interacción de la computadora hacia la electrónica mediante el puerto USB. Las etapas a desarrollar son la construcción física del mecanismo, Interfase, Electrónica de Potencia, Control de Motores, Comunicación Humano-Computadora y la integración de todo esto. En concreto, al final del siguiente semestre se va a realizar una máquina capaz de posicionarse en coordenadas específicas tanto en el plano X-Y como en el eje Z.

Comentario

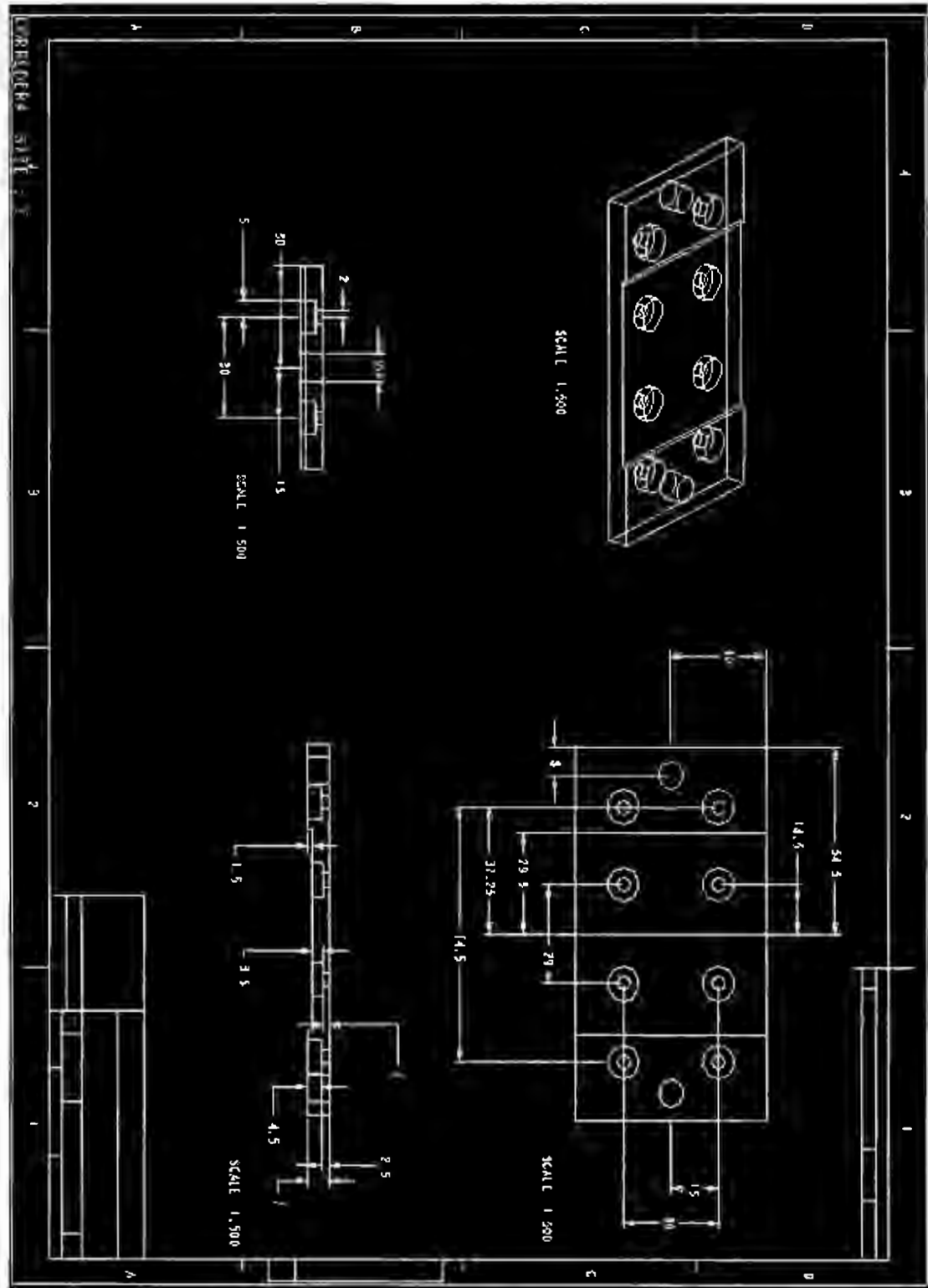
Durante el desarrollo de este proyecto surgieron varios cuestionamientos entre los miembros del equipo. Las inquietudes de cada uno de los miembros van más allá de los conocimientos técnicos empleados o aprendidos a lo largo del semestre. El primer obstáculo que apareció, fue el de la organización del proyecto, para lo que fue necesario desglosarlo en sus diferentes partes y delimitar el alcance que se deseaba tener en cada una de estas partes. Esto no significa que no hubiera cambios de planeación sobre la marcha, al contrario, estos fueron numerosos. Una vez establecida una línea de trabajo, fue más sencillo orientar nuestros esfuerzos.

Uno de los mayores obstáculos fue la falta del conocimiento de alguna metodología de diseño mecánico. Nuestros conocimientos al respecto se limitaban a los adquiridos durante la materia de Diseño de Elementos de Máquinas, pero no conocíamos ningún método para obtener un modelo matemático del comportamiento dinámico del sistema. Para esto empleamos la mecánica analítica y una vez diseñado un prototipo pudimos dimensionarlo apropiadamente. Posteriormente pudimos calcular la potencia que requeriríamos de los motores mediante la simulación en MATLAB , empleando aquí el trabajo hecho con el análisis dinámico y la planeación de trayectorias.

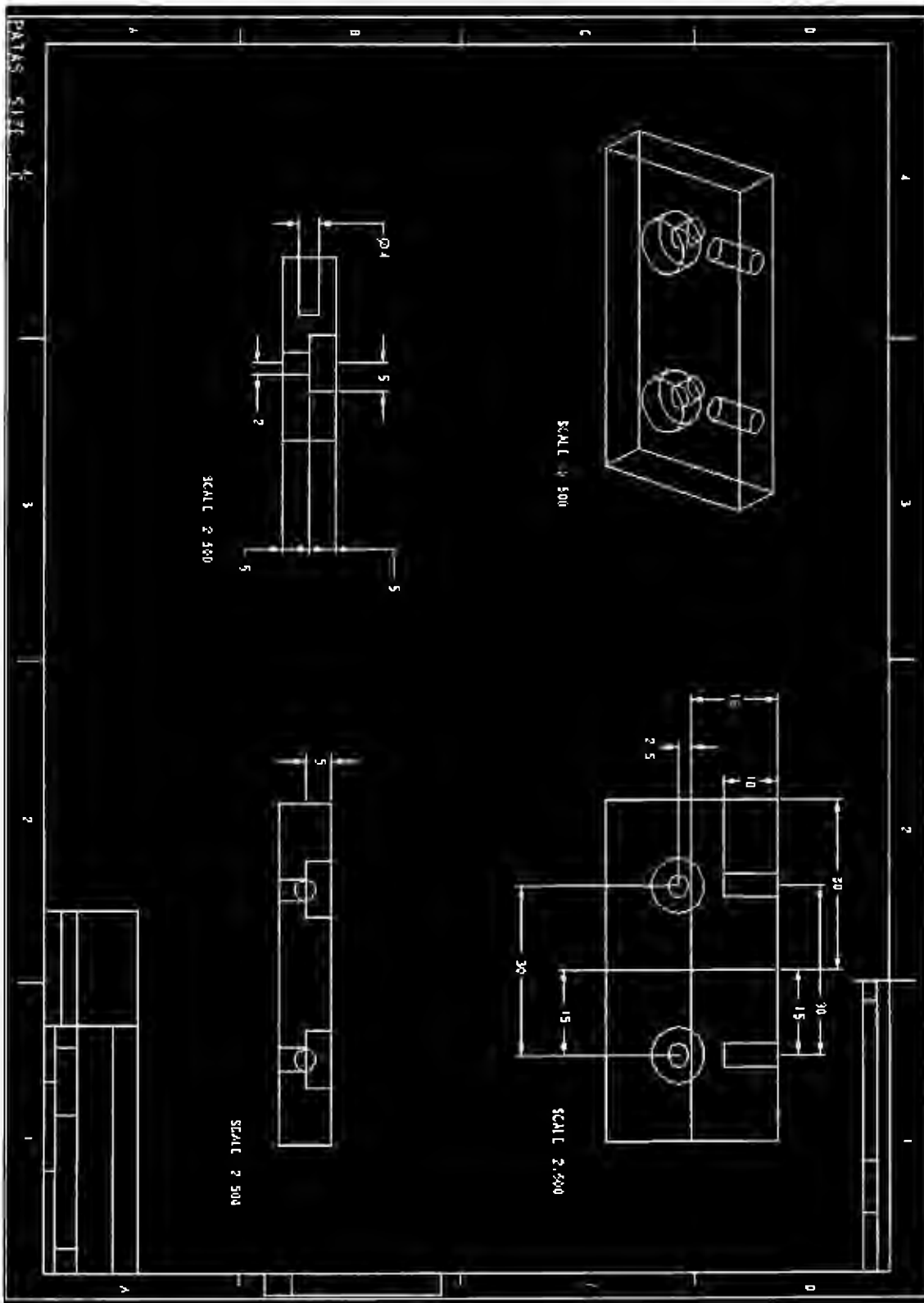
Otros aspectos del proyecto se tuvieron que pasar a segundo plano debido a que sin la construcción física de éste, no sería posible avanzar en su desarrollo. Este es el caso de los sensores que se emplearan para la retroalimentación del lazo de control. Asimismo, otros aspectos como el desarrollo de las interfases tanto usuario/PC como PC/máquina han sido únicamente planeados para su desarrollo posterior, poniendo cuidado en emplear la tecnología más nueva disponible para que el proyecto sea lo más apegado posible con el estado del arte de las diferentes tecnologías empleadas.

A.2 Mecánica (Planos)

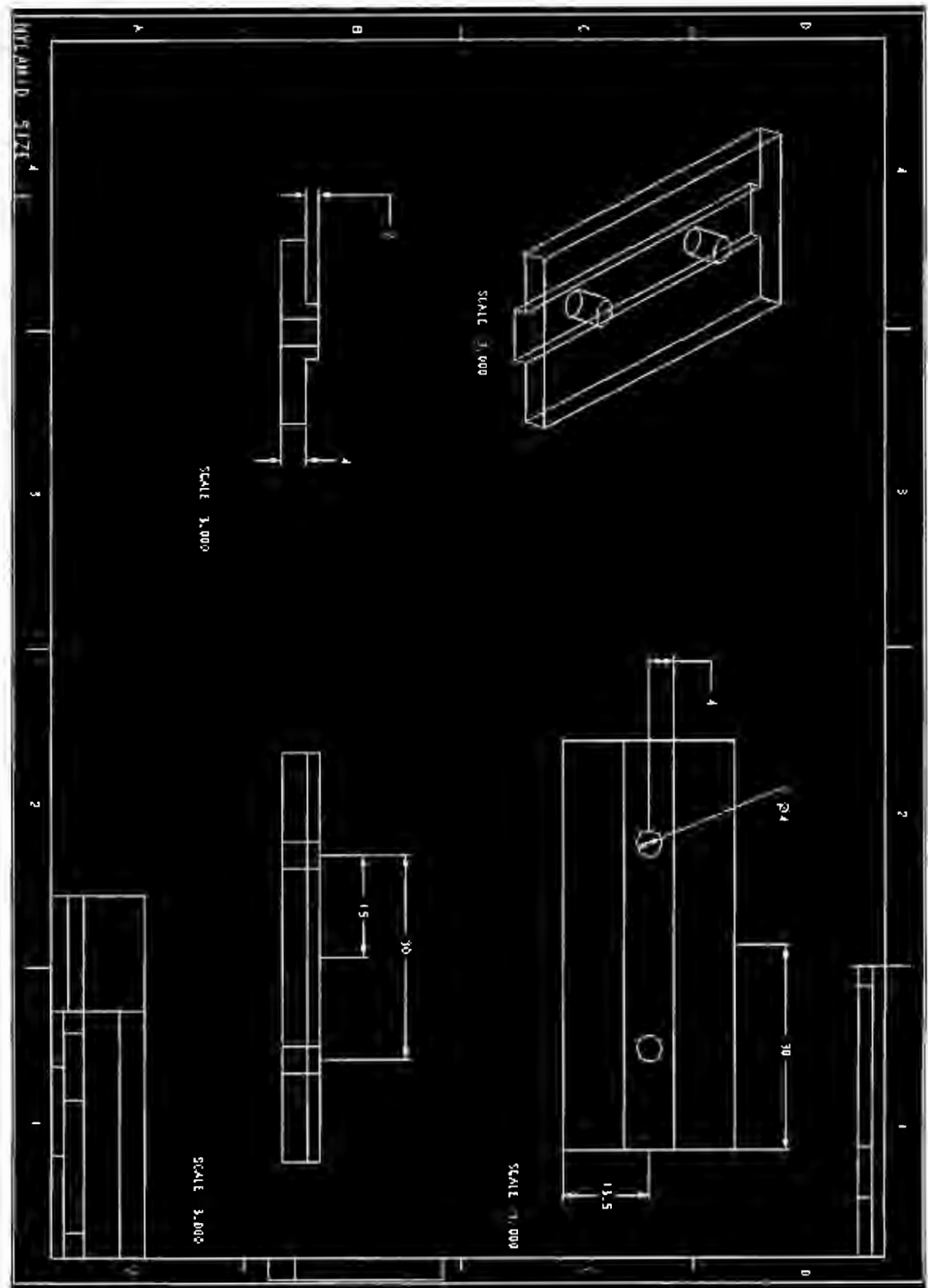
Placa Principal



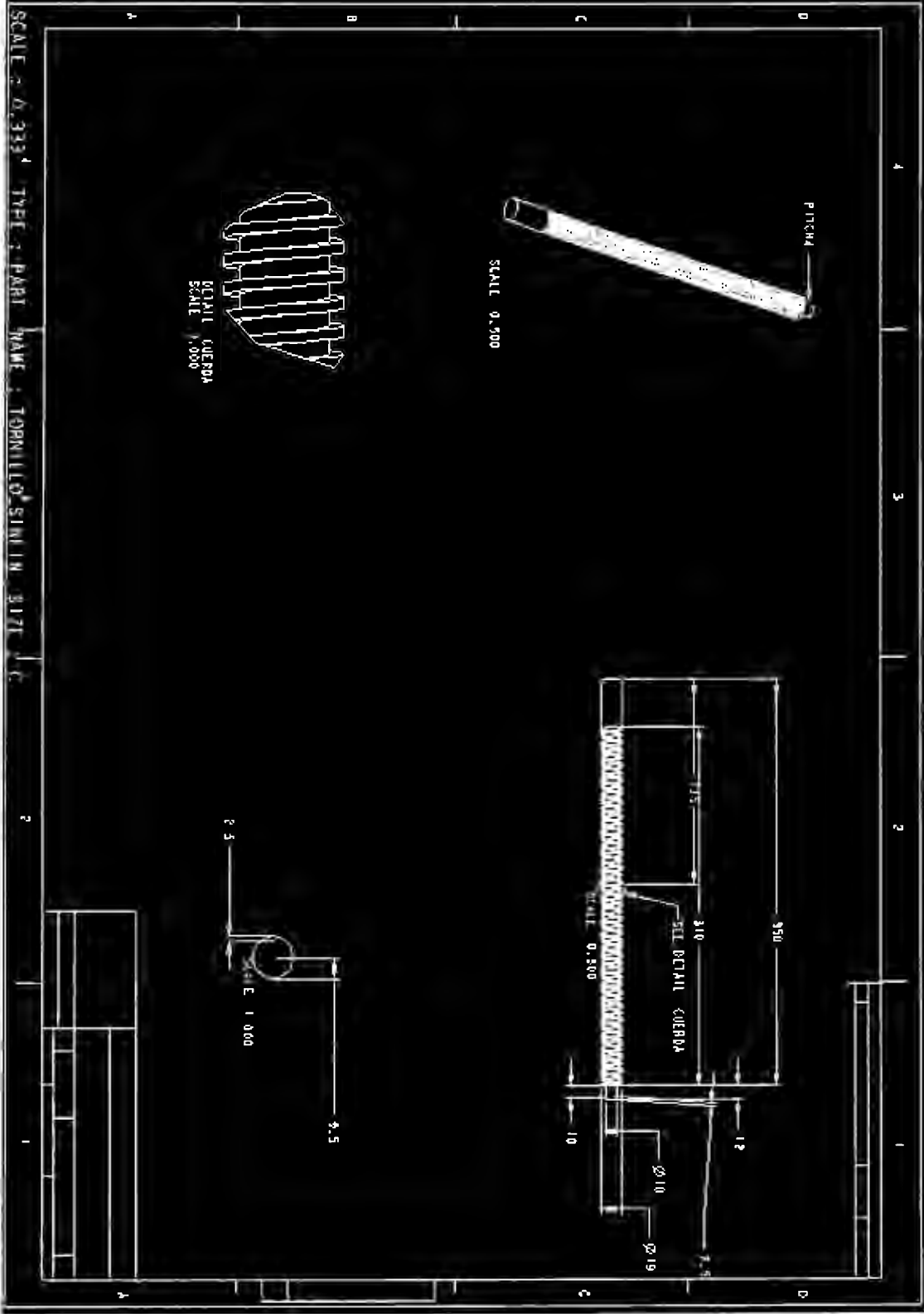
Abrazadera



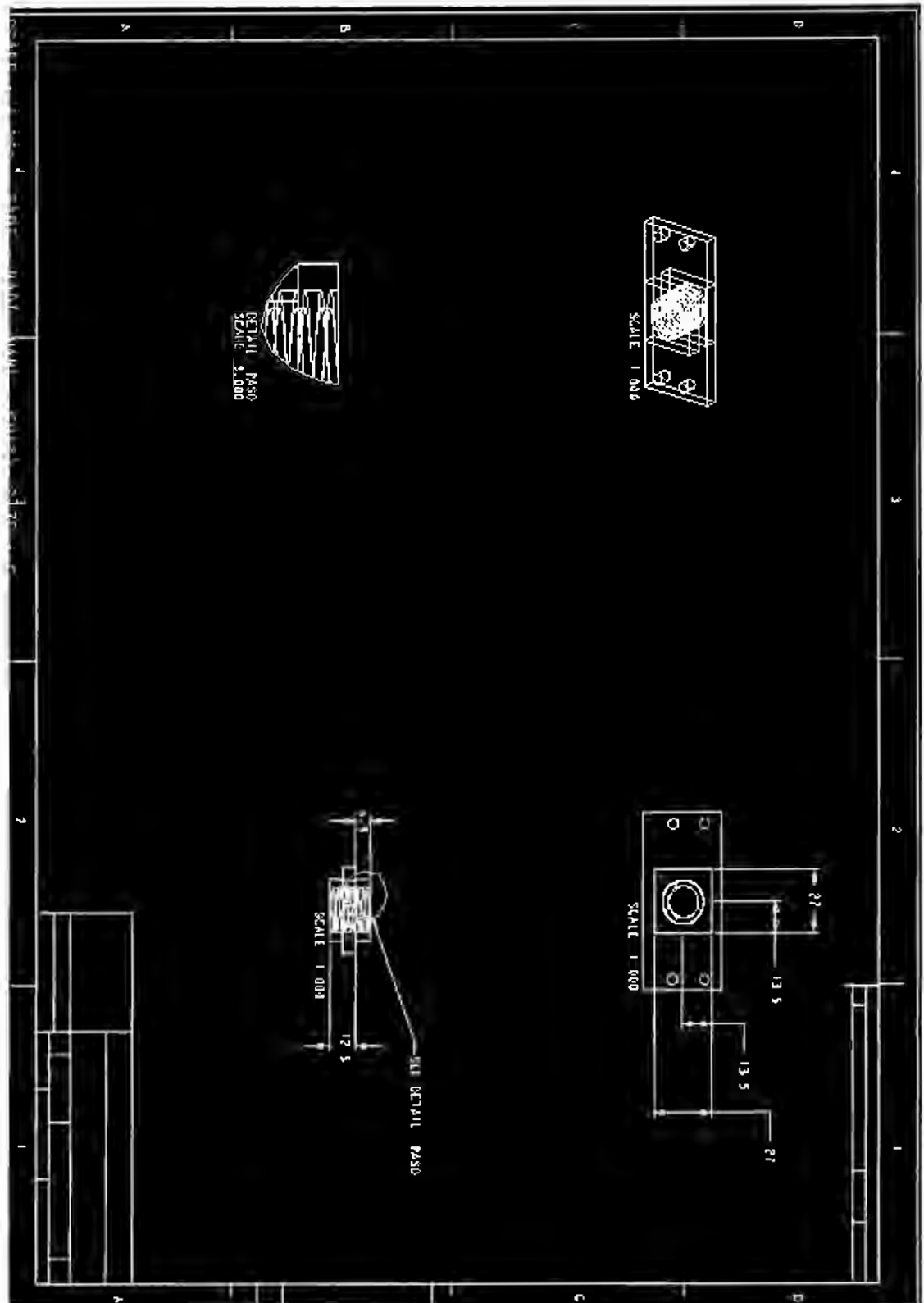
Nylamid



Tornillo Sinfin



Placa de Transmisión



Mesa de trabajo



A.3 Códigos G

O0056 ;Barrenado

Placa
 N010 G28 G90;
 N020 G21 G56;
 N030 M03 S1200;
 N040 G00 X0. Y0. F120.;
 N050 G00 Z5.;
 N060 G00 X17.25 Y15.;
 N065 M08;
 N070 G01 Z-11.;
 N080 G00 Z2.;
 N090 G00 X40.5 Y15.;
 N100 G01 Z-11.;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X40.5 Y45.;
 N130 G01 Z-11.;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X17.25 Y45.;
 N130 G01 Z-11.;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X68.5 Y45.;
 N130 G01 Z-11.;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X91.75 Y45.;
 N130 G01 Z-11.;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X68.5 Y15.;
 N130 G01 Z-11.;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X6. Y30.;
 N130 G01 Z-11.;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X103. Y30.;
 N130 G01 Z-11.;
 N135 M09;
 N140 G00 Z20.;
 N150 M05;
 N160 G28;

O0057

;Fresado Placa

N010 G28 G90;
 N020 G21 G57;
 N030 M03 S800;
 N040 G00 X0. Y0. F20.;
 N050 G00 Z5.;
 N060 G00 X17.25 Y15.;
 N065 M08;
 N070 G01 Z-4.5;
 N080 G00 Z2.;
 N090 G00 X40.5 Y15.;
 N100 G01 Z-4.5;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X40.5 Y45.;
 N130 G01 Z-4.5;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X17.25 Y45.;
 N130 G01 Z-4.5;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X68.5 Y45.;
 N130 G01 Z-4.5;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X91.75 Y45.;
 N130 G01 Z-4.5;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X91.75 Y15.;

N130 G01 Z-4.5;
 N110 G00 Z2.;
 N120 G00 X68.5 Y15.;
 N130 G01 Z-4.5;
 N110 G00 Z2.;
 N135 M09;
 N140 G00 Z20.;
 N150 M05;
 N160 G28;

O0058 ;Barrenado

abrazaderas
 N010 G28 G90;
 N020 G21 G58;
 N030 M03 S1200;
 N040 G00 X0. Y0. F120.;
 N050 G00 Z5.;
 N055 M08;
 N060 G00 X17.9 Y15.;
 N070 G01 Z-12.;
 N080 G00 Z2.;
 N090 G00 X17.9 Y45.;
 N100 G01 Z-12.
 N110 G00 Z2.;
 N135 M09;
 N140 G00 Z20.;
 N150 M05;
 N160 G28;

O0059 ;Fresado

abrazaderas
 N010 G28 G90;
 N020 G21 G59;
 N030 M03 S800;
 N040 G00 X0. Y0. F20.;
 N050 G00 Z5.;
 N055 M08;
 N060 G00 X13.1 Y15.;
 N070 G01 Z-4.5;
 N080 G00 Z2.;
 N090 G00 X13.1 Y45.;
 N100 G01 Z-4.5
 N110 G00 Z2.;
 N135 M09;
 N140 G00 Z20.;
 N150 M05;
 N160 G28;

O0060 ;Barrenado

Superior
 N010 G28 G90;
 N020 G21 G58;
 N030 M03 S1200;
 N040 G00 X0. Y0. F100.;
 N945 M08;
 N050 G00 Z5.;
 N060 G00 X5. Y15.;
 N070 G01 Z-13.5;
 N080 G00 Z2.;
 N090 G00 X5. Y45.;
 N100 G01 Z-13.5
 N110 G00 Z2.;
 N135 M09;
 N140 G00 Z20.;
 N150 M05;
 N160 G28;

O0061

;Corte de Nylamid

N010 G28 G90;
 N020 G21 G59;
 N030 M03 S800;
 N040 G00 X0. Y0. F20.;
 N050 G00 Z5.;
 N055 M08;
 N060 G00 X17.9 Y15.;
 N070 G01 Z-4.5;
 N080 G00 Z2.;
 N090 G00 X17.9 Y45.;
 N100 G01 Z-4.5
 N110 G00 Z2.;
 N135 M09;
 N140 G00 Z20.;
 N150 M05;
 N160 G28;O0057
 N010 G28 G90;
 N020 G21 G57;
 N030 M03 S2000;
 N040 G00 X0. Y0. F50.;
 N045 M08;
 N050 G00 Z-3.;
 N060 G01 Z-7.;
 N070 G01 Y79.;
 N080 G01 X61.6;
 N090 G01 Y-2.;
 N100 G00 Y79.;
 N110 G01 X123.2;
 N120 G01 Y-2.;
 N130 G00 Y79.;
 N140 G01 X184.8;
 N150 G01 Y-2.;
 N165 G00 Z30.;
 N166 G00 X246.4 Y52.4;
 N167 G00 Z-3.;
 N168 G01 Z-7.;
 N090 G01 Y0.;
 N100 G00 Z30.;
 N101 G00 X308. Y79.;
 N102 G00 Z-3.;
 N110 G01 Z-7.;
 N120 G01 Y-2.;
 N130 G00 Y79.;
 N140 G01 X369.6;
 N150 G01 Y-2.;
 N160 G00 Y79.;
 N170 G01 X431.2;
 N090 G01 Y-2.;
 N100 G00 Y79.;
 N110 G01 X492.8;
 N120 G01 Y-2.;
 N130 G00 Y79.;
 N140 G01 X554.4;
 N150 G01 Y-2.;
 N160 G00 Z30.;
 N170 G00 X0. Y25.8;
 N180 G00 Z-3.;
 N190 G01 Z-7.;
 N200 G01 X554.4;
 N210 G00 Z30.;
 N220 G00 Y52.4;
 N230 G00 Z-3.;
 N240 G01 Z-7.;
 N250 G01 X0.;
 N260 G00 Z30.;
 N270 M09;
 N280 M05;
 N290 G28;O0057
 N010 G28 G90;

N020 G21 G57;
N030 M03 S1500;
N040 G00 X0. Y0. F200.;
N945 M08;
N050 G00 Y8.55 Z5.;
N060 G01 Z-1.;
N070 G01 X555.;
N080 G01 Z-2.;
N090 G01 X0.;
N100 G01 Z-3.;
N110 G01 X555.;
N120 G01 Z-3.7;
N130 G01 X0.;
N140 G00 Z-1.7;
N150 G01 Y16.45;
N160 G01 X555.;
N170 G00 Z-1.;
N180 G01 Y25.98;
N190 G01 X0.;
N200 G01 Z-2.;
N210 G01 X555.;
N220 G01 Z-3.;
N230 G01 X0.;
N240 G01 Z-3.7;
N250 G01 X555.;
N260 G00 Z-1.;
N270 G01 Y35.15;
N280 G01 X0.;
N290 G01 Z-2.;
N300 G01 X555.;
N310 G01 Z-3.;
N320 G01 X0.;
N330 G01 Z-3.7;
N340 G01 X555.;
N350 G00 Z-1.7;
N360 G01 Y43.05;
N370 G01 X0.;
N380 G01 Y52.58;
N385 G01 X555.
N390 G01 Z-2.7;
N400 G01 X0.;
N410 G01 Z-3.7;
N420 G01 X555.;
N430 G00 Z-1.;
N440 G01 Y61.75;
N450 G01 X305.;
N460 G00 Z30.;
N470 G00 X236.;
N480 G00 Z0.;

N490 G01 Z-1.;
N500 G01 X0.
N510 G01 Z-2.;
N520 G01 X236.;
N530 G00 Z30.;
N540 G00 X305.;
N550 G00 Z0.;
N560 G01 Z-2.;
N570 G01 X555.;
N580 G01 Z-3.7;
N590 G01 X305.;
N560 G00 Z30.;
N570 G00 X236.;
N580 G00 Z0.;
N590 G01 Z-3.7;
N600 G01 X0.;
N610 G00 Z-1.7;
N620 G01 Y69.65;
N630 G01 X236.;
N640 G00 Z30.;
N650 G00 X305.;
N660 G00 Z0.;
N670 G01 Z-1.7;
N680 G01 X555.;
N690 G01 Y79.18;
N700 G01 X305.;
N710 G00 Z30.;
N720 G00 X236.;
N730 G00 Z0.;
N740 G01 Z-1.7;
N750 G01 X0.;
N760 G01 Z-2.7;
N770 G01 X236.;
N780 G00 Z30.;
N790 G00 X305.;
N800 G00 Z0.;
N810 G01 Z-2.7;
N820 G01 X555.;
N830 G01 Z-3.7;
N840 G01 X305.;
N850 G00 Z30.;
N860 G00 X236.;
N870 G00 Z0.;
N880 G01 Z-3.7;
N890 G01 X0.;
N900 G00 Z20.;
N910 M05;
N920 G28;

O0062
;Barrenado Nylamid
N010 G28 G90;
N020 G21 G58;
N030 M03 S1200;
N040 G00 X0. Y0. F80.;
N945 M08;
N050 G00 Z5.;
N060 G01 Z-1.;
N070 G01 X16.47;
N080 G01 Y16.47;
N090 G01 X0.;
N100 G01 Y0.;
N110 G01 Z-2.
N070 G01 X16.47;
N080 G01 Y16.47;
N090 G01 X0.;
N100 G01 Y0.;
N110 G01 Z-3.
N070 G01 X16.47;
N080 G01 Y16.47;
N090 G01 X0.;
N100 G01 Y0.;
N110 G01 Z-4.
N070 G01 X16.47;
N080 G01 Y16.47;
N090 G01 X0.;
N100 G01 Y0.;
N110 G01 Z-5.
N070 G01 X16.47;
N080 G01 Y16.47;
N090 G01 X0.;
N100 G01 Y0.;
N110 G01 Z-6.
N070 G01 X16.47;
N080 G01 Y16.47;
N090 G01 X0.;
N100 G01 Y0.;
N110 G01 Z-7.
N070 G01 X16.47;
N080 G01 Y16.47;
N090 G01 X0.;
N100 G01 Y0.;
N135 M09;
N140 G00 Z20.;
N150 M05;
N160 G28;

A.4 Motores y Encoders

Voltaje nominal de 38.2V

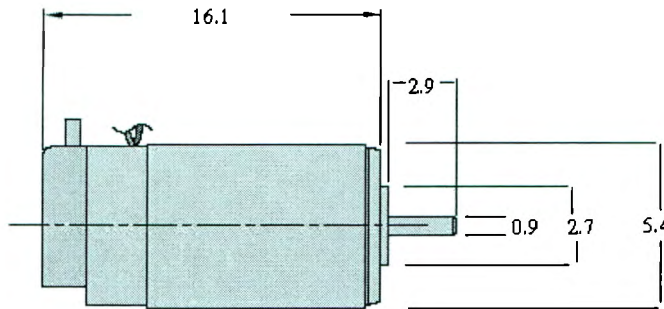
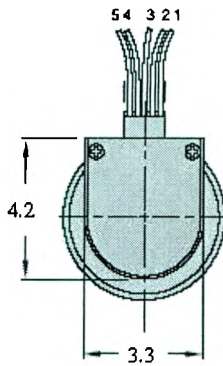
Velocidad nominal 3500rpm

Corriente nominal 1.9A

Corriente sin carga 0.125 A

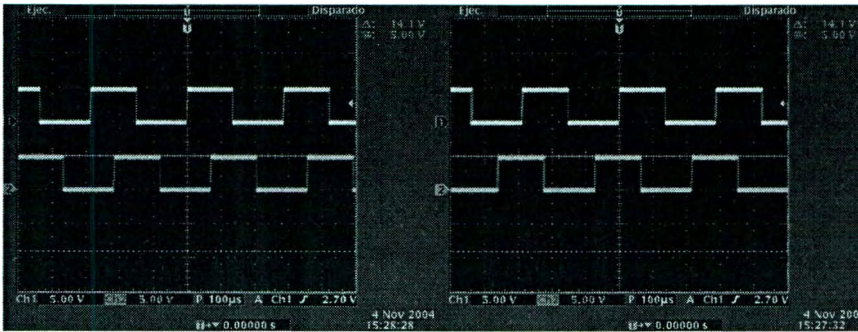
Encoder (Heds 9100) incluido a 500 pulsos por vuelta con 2 señales de salida desfasadas.

MEDICIONES EN CM



Encoder Connection Chart

Pin No.	Color	Connection
1	Black	Ground
2	Green	Index/NC
3	Yellow	Channel A
4	Red	Vcc
5	Blue	Channel B



A.5 Sensores y Componentes [24]

Opto Acoplador

APPROVALS

- UL recognised, File No. E91231

'X' SPECIFICATION APPROVALS

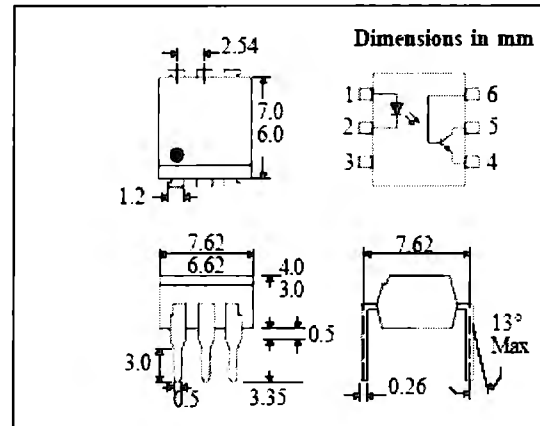
- VDE 0884 in 3 available lead form :-
- STD
- G form
- SMD approved to CECC 00802
- Certified to EN60950 by the following Test Bodies :-
Nemko - Certificate No. P01102464
Fimko - Certificate No. F118166
Semko - Reference No. 0202037/01-22
Demko - Certificate No. 311158-01
- BSI approved - Certificate No. 8001

DESCRIPTION

The 4N25, 4N26, 4N27, 4N28 series of optically coupled isolators consist of infrared light emitting diode and NPN silicon photo transistor in a standard 6 pin dual in line plastic package.

FEATURES

- Options :-
10mm lead spread - add G after part no.
Surface mount - add SM after part no.
Tape&reel - add SMT&R after part no.
- High Isolation Voltage (5.3kV_{RMS}, 7.5kV_{PK})
- All electrical parameters 100% tested
- Custom electrical selections available



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

(25°C unless otherwise specified)

Storage Temperature	-55°C to + 150°C
Operating Temperature	-55°C to + 100°C
Lead Soldering Temperature	(1/16 inch (1.6mm) from case for 10 secs) 260°C

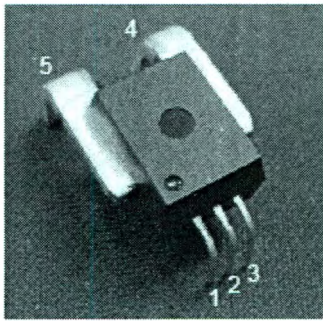
INPUT DIODE

Forward Current	60mA
Reverse Voltage	6V
Power Dissipation	105mW

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ Unless otherwise noted)

PARAMETER		MIN	TYP	MAX	UNITS	TEST CONDITION
Input	Forward Voltage (V_f)		1.2	1.5	V	$I_f = 10\text{mA}$
	Reverse Current (I_R)			10	μA	$V_R = 6\text{V}$
Output	Collector-emitter Breakdown (BV_{CEO}) (Note 2)	30			V	$I_C = 1\text{mA}$
	Collector-base Breakdown (BV_{CBO})	70			V	$I_C = 100\mu\text{A}$
	Emitter-collector Breakdown (BV_{ECO})	6			V	$I_E = 100\mu\text{A}$
	Collector-emitter Dark Current (I_{CEO})			50	nA	$V_{CE} = 10\text{V}$
	Collector-base Dark Current (I_{CBO})			20	nA	$V_{CE} = 10\text{V}$
Coupled	Current Transfer Ratio (CTR) 4N25, 4N26	20			%	$10\text{mA } I_f, 10\text{V } V_{CE}$
	4N27, 4N28	10			%	$10\text{mA } I_f, 10\text{V } V_{CE}$
	Collector-emitter Saturation Voltage $V_{CE(SAT)}$			0.5	V	$50\text{mA } I_f, 2\text{mA } I_C$
	Input to Output Isolation Voltage V_{ISO}	5300 7500			V_{RMS} V_{PK}	See note 1 See note 1
	Input-output Isolation Resistance R_{ISO}	5×10^{10}			Ω	$V_{IO} = 500\text{V}$ (note 1)
	Turn-on Time t_{on}		4		μs	$V_{CC} = 10\text{V}$, $I_f = 10\text{mA}$, $R_L = 100\Omega$
	Turn-off Time t_{off}		3		μs	(FIG 1)
Output Rise Time t_r		2		μs		
Output Fall Time t_f		2		μs		

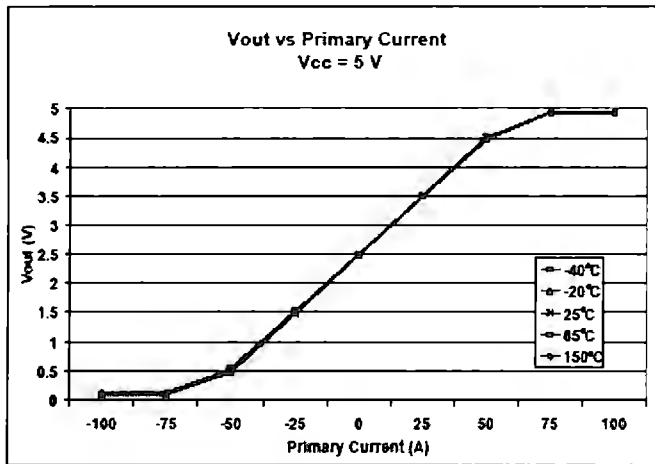
Sensor de Corriente



Pin 1: V_{CC} Terminal 4: I_{p+}
 Pin 2: Gnd Terminal 5: I_{p-}
 Pin 3: Output

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

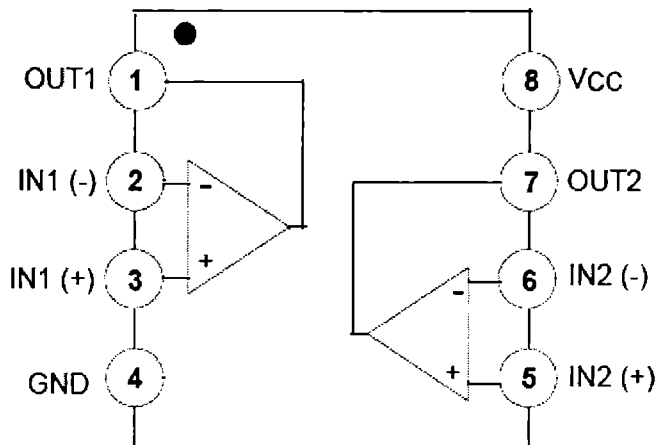
Operating Temperature
 S -20 to +85°C
 L -40 to +150°C
 Supply Voltage, V_{CC} 16 V
 Output Voltage 16 V
 Output Current Source 3 mA
 Output Current Sink 10 mA
 Maximum Storage Temperature 170°C
 Maximum Junction Temperature 165°C



LM358

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	LM258/LM258A	LM358/LM358A	LM2904	Unit
Supply Voltage	VCC	±16 or 32	±16 or 32	±13 or 26	V
Differential Input Voltage	VI(DIFF)	32	32	26	V
Input Voltage	VI	-0.3 to +32	-0.3 to +32	-0.3 to +26	V
Output Short Circuit to GND VCCs15V, TA = 25°C(One Amp)	-	Continuous	Continuous	Continuous	-
Operating Temperature Range	TOPR	-25 ~ +85	0 ~ +70	-40 ~ +85	°C
Storage Temperature Range	TSTG	-65 ~ +150	-65 ~ +150	-65 ~ +150	°C



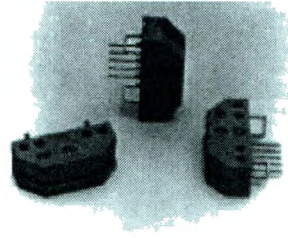
HEDS 9100

Features

- High Performance
- High Resolution
- Low Cost
- Easy to Mount
- No Signal Adjustment Required
- Small Size
- -40°C to 100 °C Operating Temperature
- Two Channel Quadrature Output
- TTL Compatible
- Single 5 V Supply

Description

The HEDS-9000 and the HEDS-9100 series are high performance, low cost, optical incremental encoder modules. When used with a codewheel, these modules detect rotary position. The modules consist of a lensed (LED) source and a detector IC enclosed in a small C-shaped plastic package. Due to a highly collimated light source and unique photodetector array, these modules are extremely tolerant to mounting misalignment.

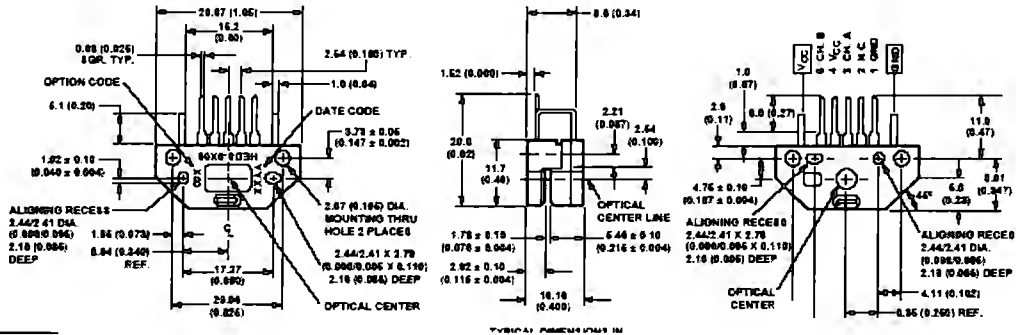


inch square pins located on 0.1 inch centers.

Standard resolutions for the HEDS-9000 are 500 CPR and 1000 CPR for use with a HEDS-6100 codewheel or equivalent.

The two channel digital outputs and the single 5 V supply input are accessed through five 0.025

Package Dimensions



Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Notes
Temperature	T	-40		100	°C	
Supply Voltage	V _{CC}	4.5		5.5	Volts	Ripple < 100 mV _{p-p}
Load Capacitance	C _L			100	pF	3.3 kΩ pull-up resistor
Count Frequency	f			100	kHz	Velocity (rpm) x N 60

Notes: The module performance is guaranteed to 100 kHz but can operate at higher frequencies.

Encoding Characteristics

Encoding Characteristics over Recommended Operating Range and Recommended Mounting Tolerances. These Characteristics do not include codewheel/codestrip contribution.

Description	Sym.	Typ.	Case 1 Max.	Case 2 Max.	Units	Notes
Pulse Width Error	ΔP	30	40		°e	
Logic State Width Error	ΔS	30	40		°e	
Phase Error	Δφ	2	10	105	°e	

A.6 Microcontrolador y D/A

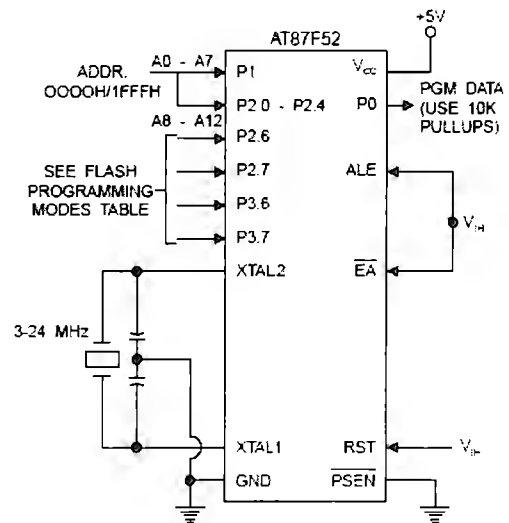
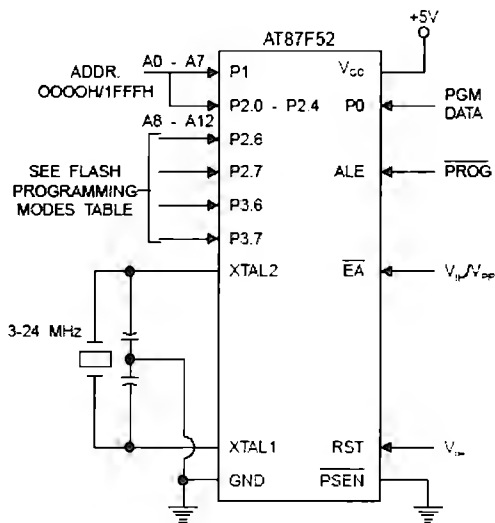


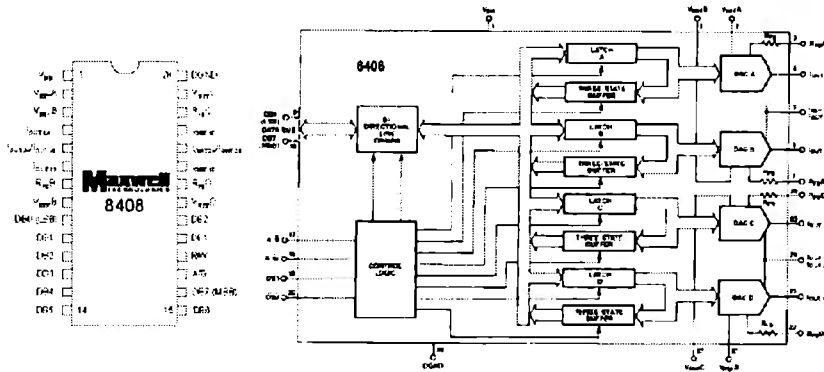
8-bit
Microcontroller
with 8K Bytes
Flash

AT89C52

PDIP

(T2) P1.0	1	40	V _{CC}
(T2 EX) P1.1	2	39	P0.0 (ADC)
P1.2	3	38	P0.1 (AD0)
P1.3	4	37	P0.2 (AD1)
P1.4	5	36	P0.3 (AD2)
P1.5	6	35	P0.4 (AD3)
P1.6	7	34	P0.5 (AD4)
P1.7	8	33	P0.6 (AD5)
RST	9	32	P0.7 (AD7)
(RXD) P3.0	10	31	EA/VPP
(TXD) P3.1	11	30	ALE/PROG
(INT0) P3.2	12	29	RESET
(INT1) P3.3	13	28	P2.7 (A15)
(T0) P3.4	14	27	P2.6 (A14)
(T1) P3.5	15	26	P2.5 (A13)
(WR) P3.6	16	25	P2.4 (A12)
(RD) P3.7	17	24	P2.3 (A11)
XTAL2	18	23	P2.2 (A10)
XTAL1	19	22	P2.1 (A9)
GND	20	21	P2.0 (A8)





Logic Diagram

PIN	SYMBOL	DESCRIPTION
1	V_{DD}	Supply Voltage
2	$V_{REF A}$	REF Voltage (A)
3	$R_{FB A}$	REF Feedback (A)
4	$I_{OUT 1A}$	Current Output (1A)
5	$I_{OUT 2A}/I_{OUT 2B}$	Current Output (2A/2B)
6	$I_{OUT 1B}$	Current Output (1B)
7	$R_{FB B}$	REF Feedback (B)
8	$V_{REF B}$	REF Voltage (B)
9	DB0 (LSB)	Data Bit 0, least significant bit
10 - 15	DB 1 - 6	Data bits 1-6
16	DB 7 (MSB)	Data Bit 7, most significant bit
17	A/B	A/B
18	R/W	Read/Write
19 - 20	DS1 - 2	Data Strokes
21	$V_{REF D}$	REF Voltage (D)
22	$R_{FB D}$	REF Feedback (D)
23	$I_{OUT 1D}$	Current Output (1D)
24	$I_{OUT 2C}/I_{OUT 2D}$	Current Output (2C/2D)
25	$I_{OUT 1C}$	Current Output (1C)
26	$R_{FB C}$	REF Feedback (C)
27	$V_{REF C}$	REF Voltage (C)
28	DGND	Digital Ground

A.7 Interfase [33]

Realizado por:

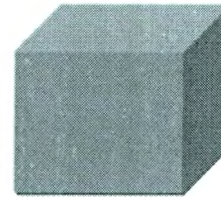
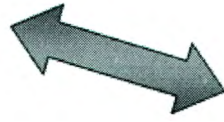
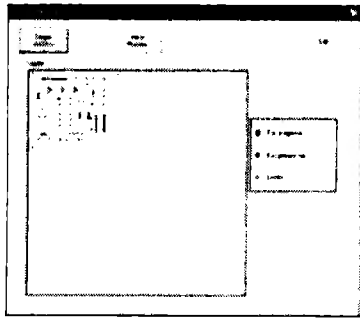
Rubén Allit Murguía Cruz

Miguel Angel Vázquez Castillo

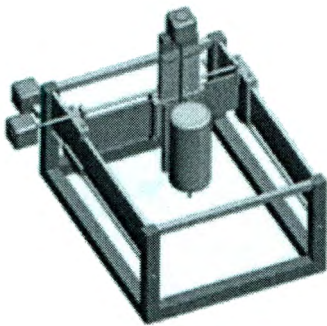
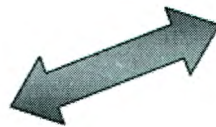
DESCRIPCIÓN

- Cargar a memoria el archivo excellon.
- Revisar que el formato esté correcto.
- Leer los diámetros de las brocas y almacenar dicha medida.
- Leer las coordenadas de los orificios.
- Hacer la conversión a la unidad perf.
- Mandar las coordenadas a la interfaz cuando la perforadora se lo indique.
- Presentar un dibujo con el estado de la perforadora.

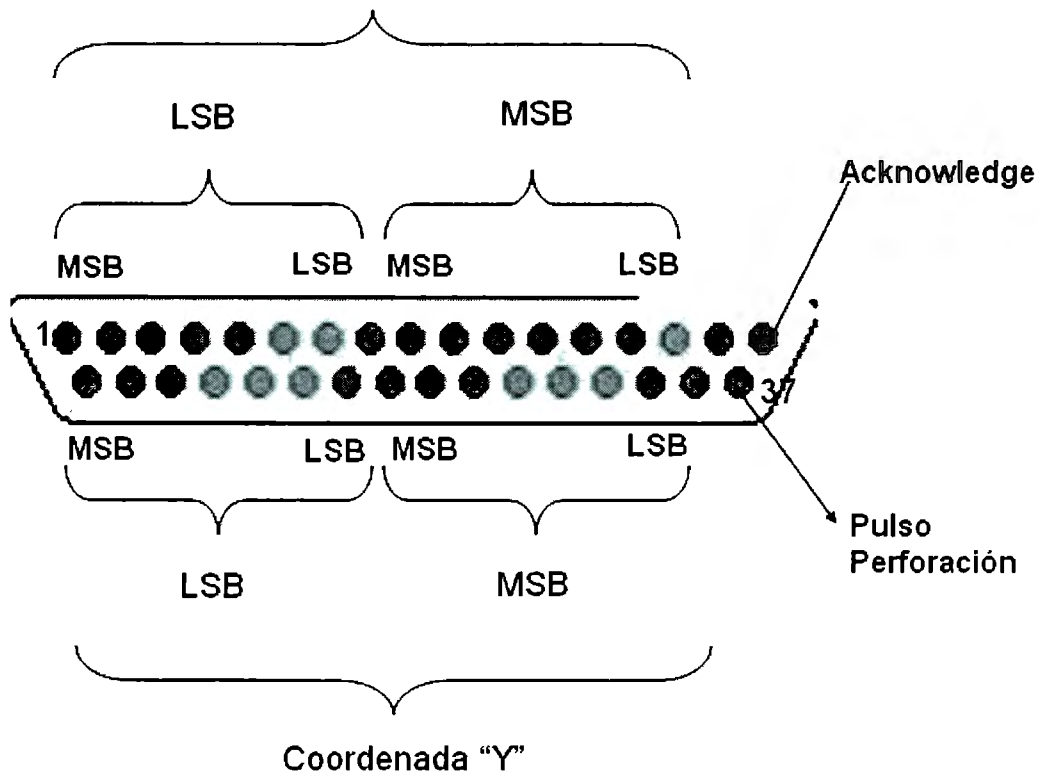
Computadora - Circuit Driller



Interfaz



Coordenada "X"



A.8 LM2678

La serie de reguladores LM2678 son circuitos integrados monolíticos que proveen todas las funciones para un regulador buck, ofreciendo hasta 5A de corriente de salida. Para el desarrollo de las fuentes de alimentación de los motores se escogió el LM2678T-12 dado que este circuito integrado nos ofrece 12 VCD de salida fija. El CI funciona como el interruptor del convertidor buck presentado anteriormente.

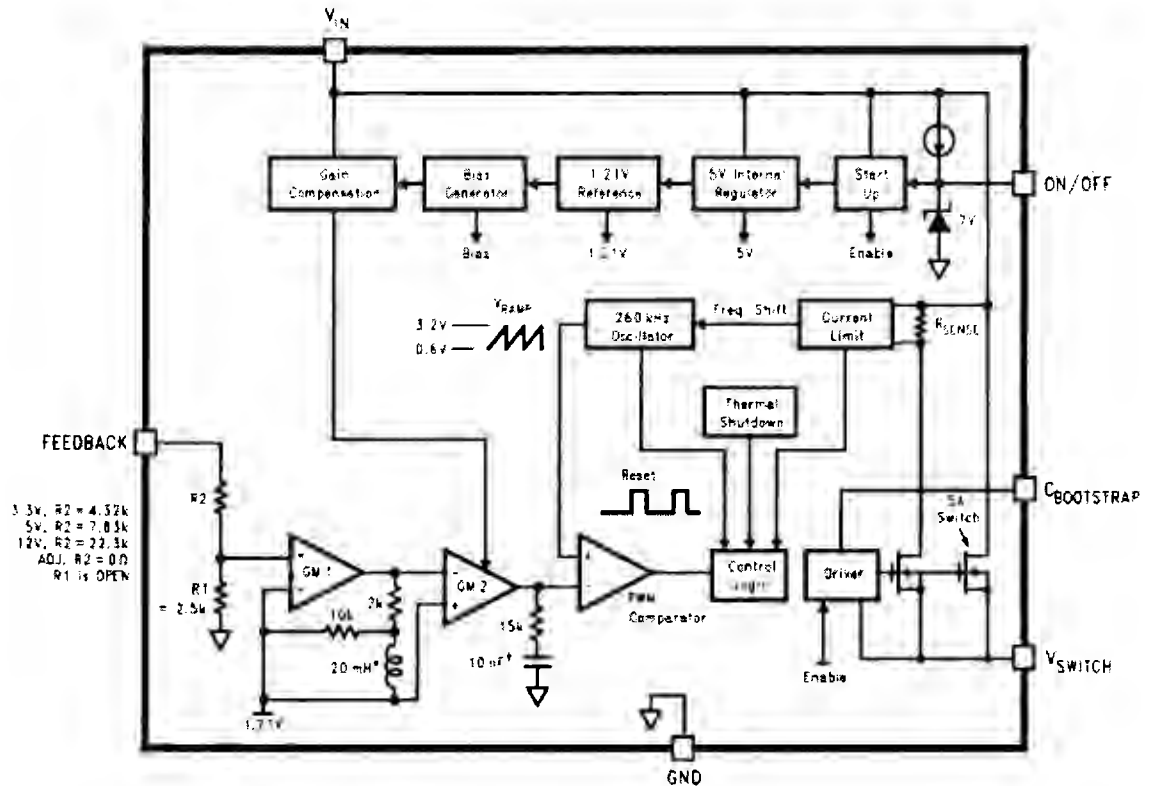


Figura 2.3.2.a "Diagrama de Bloques LM2678"

En la figura 2.3.2.a se presenta el diagrama de bloques del CI LM2678 donde se observa que cuenta con un pin de encendido y apagado, el cual cuando se encuentra apagado limita la corriente de salida a 100 μ A y el voltaje a 0V sea cual sea su entrada. Dentro de las medidas de seguridad del CI se encuentra también un apagado térmico lo cual es muy conveniente si se espera manejar corrientes de aproximadamente 5A.