



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y construcción de control
de servo válvulas para cabezal
de turbina COPPUS tipo RLA

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA

César Millán Rosas

DIRECTOR DE TESIS

M.I Humberto Mancilla Alonso



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Introducción

Objetivo

1. Levantamiento	6
1.1. Necesidades y requerimientos.....	6
1.2. Antecedentes.....	6
1.2.1. Ciclo Rankine.....	7
1.2.2. Turbina.....	8
1.2.3. Elemento mecánico de servo-válvula.....	9
1.2.4. Teoría de control.....	10
1.2.4.1. Diseño de sistemas de control.....	10
1.2.4.2. Control en espacio de estados.....	11
2. Selección de ley control	12
3. Modelado	13
3.1. Consideraciones.....	13
3.2. Selección de variables y obtención de ecuaciones de comportamiento.....	13
3.3. Traslado al espacio de estados	14
4. Caracterización de motor	15
4.1. Prueba a rotor bloqueado.....	15
4.1.1. Resultados.....	16
4.2. Prueba a rotor libre.....	17
4.2.1. Resultados.....	18
5. Calculo de control	20
5.1. Estabilidad.....	20
5.2. Controlabilidad.....	20
5.3. Calculo de constantes de retroalimentación y escalamiento.....	21
5.4. Simulación.....	21
5.4.1. Tren de pulsos.....	22
5.4.2. Sinusoidal.....	23
5.4.3. Simulación de control digital.....	25
6. Diseño de tarjeta de control	26
6.1. Selección de microcontrolador.....	26
6.2. Algoritmo de lógica de comportamiento.....	27
6.3. Comunicación.....	28
6.3.1. protocolo RS232.....	28
6.3.2. max233.....	29
6.4. Instrumentación.....	31
6.4.1. Interrupciones externas.....	31
6.4.2. Sensor de corriente.....	32
6.5. programación de microcontrolador.....	33
6.5.1. Posición.....	34
6.5.2. Velocidad.....	34

6.5.3. Corriente.....	34
6.5.4. Jerarquía de funcionamiento.....	35
6.5.5. Demultiplexores.....	36
6.5.6. Etapa de potencia.....	37
6.5.7. Paro de emergencia.....	38
6.6. Diseño PCB.....	38
6.6.1. Simulación de circuito.....	38
6.6.2. Implementación de protoboard.....	39
6.6.3. Construcción.....	40
6.6.4. Consideraciones.....	44
6.6.5. Calculo de pistas para placa de potencia.....	44
6.6.6. Selección de fusible.....	48
6.6.7. Tarjetas finales.....	49
7. Interface LabVIEW.....	50
7.1. Comunicación PC-PIC.....	50
7.2. Interface y variables de control.....	51
8. Pruebas y validación.....	52
8.1. Laboratorio.....	52
8.1.1. Repetición.....	52
8.1.2. Posicionamiento.....	53
9. Modificaciones válvula.....	55
10. Pruebas en sitio.....	58
11. Conclusiones.....	60
12. Bibliografía.....	61
13. Apéndices.....	62

Introducción

El presente escrito muestra el proceso de diseño y construcción de una tarjeta de control para 4 servo-válvulas del cabezal de una turbina Coppus tipo RLA, encargada de la toma de decisiones sobre el flujo de vapor que pasará a través de los álabes, controlando por consecuencia las revoluciones generadas. Este proyecto surge de la necesidad de complementar e integrar 2 proyectos previamente desarrollados, el sistema de adquisición de datos instalado en el ciclo de Rankine del laboratorio de térmicas de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, que tiene por comisión su instrumentación y monitorización a distancia, además del diseño mecánico de la válvula controlada por un motor de corriente directa, para que posteriormente se pueda ofrecer prácticas de laboratorio de mejor calidad en las cuales la operación de la turbina fuese más sencilla y segura para los estudiantes y docentes.

Se realizó un estudio de mercado sobre tarjeta de control de posición compatible con el encoder incremental dispuesto en el motor y se determinó que la mejor alternativa era diseñar y construir el módulo de control para que fuera 100% compatible con el motor y la interface desarrollada en LabVIEW y con ello disminuir los costos.

El presente documento mostrará el desglose del proyecto, exponiendo la justificación de su desarrollo, agregando los antecedentes de los proyectos previos y los temas necesarios para mejor comprensión del lector. El diseño nacerá de los elementos teóricos, como son el modelado, la selección de la ley de control, cálculo de control y caracterización del motor a fin de reconocer y con ello poder analizar el sistema a tratar. Una vez analizado el sistema se formulará el método para el diseño y selección de los módulos del hardware, mostrándonos su completa lógica de funcionamiento, su construcción y el diseño de la interface que funcionara a la par para poder comunicar con la PC. Finalmente se anexarán las modificaciones en la válvula que fueron necesarias para poder tener pruebas en sitio y con ello cumplir con el objetivo deseado.

Dichas pruebas en sitio del funcionamiento del sistema fueron satisfactorias, dando resultados esperados, dado que las revoluciones de la turbina fueron reguladas y estabilizadas, exponiendo como resultado un modelo de comportamiento afín al porcentaje de apertura de la válvula y las revoluciones obtenidas, además de que este modelo nos muestra resultados repetibles bajo condiciones similares.

Objetivo:

Diseñar y construir tarjeta de control para servo válvulas de una turbina Coppus tipo RLA, que regule y estabilice el flujo de vapor que pasará a través de los álabes mediante la programación de una lógica de funcionamiento basada en control en espacio de estados. Con el propósito de ayudar a los alumnos de la Facultad de Estudios Superiores Aragón de manera práctica y didáctica sobre el entendimiento de los procesos involucrados en la generación de energía termoeléctrica de un ciclo de Rankine

1. Levantamiento

1.1. Necesidades y requerimientos

En la actualidad la mayoría de las plantas de generación eléctrica en México están basadas en un mismo ciclo básico; potencia de vapor, independientemente de que la fuente de energía de combustibles fósiles o procesos de fisión en un reactor nuclear, estos se encuentran auxiliados con sistemas de control digitales que tienen por misión el mejoramiento de las condiciones de los trabajadores encargados de dichos ciclos, así como tener una mayor rapidez y eficiencia en la respuesta ante situaciones extremas.

La Facultad de Estudios Superiores Aragón cuenta con un ciclo de Rankine para el fin de desarrollar prácticas propias a la generación termoeléctrica, las que en la actualidad se desarrollan de manera convencional manipulando los equipos directamente con las manos, además de que las lecturas de las variables pertinentes se toman con cronómetros manuales y termómetros de mercurio, promoviendo que los errores de paralaje o mala interpretación de los instrumentos aumente de manera importante. Además de que posibles distracciones de los alumnos podrían exponerlos a situaciones que les provoquen lesiones, todo esto sumado a la poca semejanza en cuanto a los sistemas de control con los que se encontrará cuando se desempeñe laboralmente, es por ello que se ha decidido automatizar el ciclo, añadiendo un sistema de instrumentación y control gestionado por tarjetas de adquisición de datos.

Para el desarrollo del control de las revoluciones se diseñó una válvula capaz de ser manipulada por un motor de corriente directa de alta potencia [2], que consta de un encoder incremental, es por ello que es necesario la implementación de algún método para gobernar la posición de dicha válvula convirtiéndola en un servo sistema.

El surgimiento de la necesidad de un control bien estructurado que cuide, regule y estabilice la energía generada por una turbina Copus de manera remota y automatizada yace de la importancia del cuidado e integridad del alumnado y personal encargado del ciclo de Rankine a automatizar, consecuente del objetivo principal del programa PAPIME (PE101614), que es el mejoramiento de la enseñanza de la ingeniería por parte de nuestra institución.

El desarrollo del proyecto implica el planteamiento y construcción de una tarjeta de control encargada de la toma de decisiones sobre el cierre, apertura y regulación de una serie de válvulas que se encuentran en un arreglo secuencial, dicha tarjeta implica varias etapas, desde la planeación, cálculo y simulación del control, su implementación en un microcontrolador, el diseño electrónico y eléctrico, hasta la interfaz de comunicación con el programa previamente desarrollado, que tiene por comisión la instrumentación de la turbina [1], debido al necesario conocimiento de las revoluciones obtenidas por la turbina, como posibles situaciones de emergencia con el fin de crear una subrutina para que el sistema pare en su totalidad.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Ciclo de Rankine

El ciclo de Rankine es el ciclo ideal que sirve de base al funcionamiento de las centrales térmicas con turbinas de vapor, las cuales producen actualmente la mayor parte de la energía eléctrica que se consume en el mundo. La evolución de las centrales térmicas ha estado condicionada por la búsqueda de mejoras en el rendimiento térmico del ciclo termodinámico, ya que incluso pequeñas mejoras en el rendimiento significan grandes ahorros en los requerimientos del combustible.

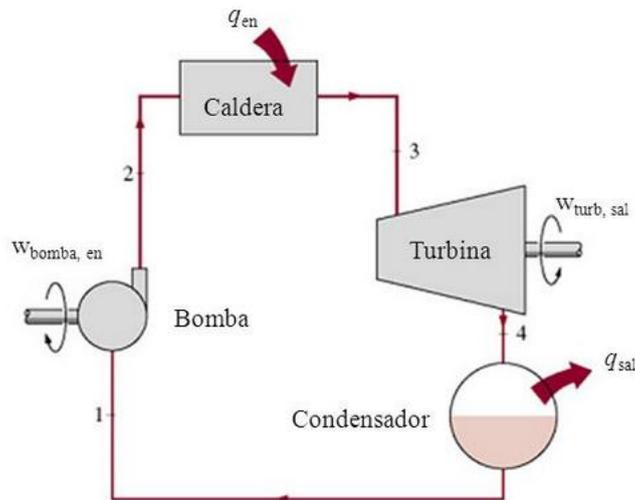


Ilustración 1 ciclo de Rankine simplificado

Derechos reservados © McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. FIGURA 9-2 Ciclo Rankine simple ideal.

El ciclo ideal de potencia de vapor Rankine simple consiste en:

- Compresión isentrópica en una bomba.
- Adición de calor a presión constante en una caldera.
- Expansión isentrópica en una turbina.
- Extracción de calor a presión constante en un condensador.

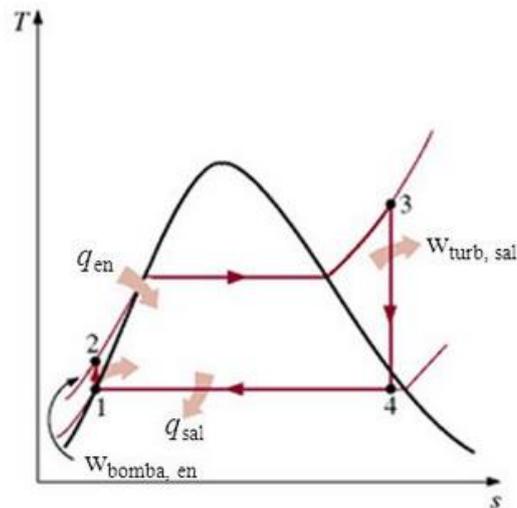


Ilustración 2 diagrama T-s ciclo Rankine

Derechos reservados © McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. FIGURA 9-2 Ciclo Rankine simple ideal.

acoplada a un generador de corriente continua, la turbina gira su eje debido al vapor que fluye por sus álabes, este vapor es proporcionado por el generador de vapor, éste es regulado por 4 válvulas manuales, permitiendo un funcionamiento flexible y hasta cierto punto controlable.

1.2.3. Elemento mecánico de servo válvula

La válvula fue previamente diseñada, siendo tema de tesis para titulación, la cual contaba con un obturador idéntico a la válvula manual que tenía por defecto la turbina, con el fin de mantener el mismo comportamiento del vapor tal y como fue diseñado, debido a que se esperaba que dicho proyecto fuera lo menos intrusivo posible en cuanto la estructura interna, manteniendo las funciones de su predecesor.



Ilustración 4 válvula

La conexión roscada de la turbina se reutilizó para no tener grandes modificaciones y que el remplazó fuera de manera rápida y sin complicaciones.

Dicha válvula tiene por sistema de control de posición, un motor de corriente directa acoplado a un encoder incremental, el eje del motor se encuentra conectado en forma concéntrica al vástago de la válvula, permitiendo el movimiento axial del obturador.

Internamente cuenta con una cuerda que proporciona el movimiento axial, además de tener una segunda cuerda sólo para permitir el movimiento del vástago a fin de no empalmar funciones; la transmisión de este tipo puede provocar Backlash debido al espacio entre cuerda interna y externa, el cual podría causar movimientos bruscos en el vástago al comenzar la operación de movimiento, y durante los cambios de dirección, para ello se colocó un resorte a fin de aplicar cierta presión sobre estos elementos.

El motor tiene como alimentación máxima en polaridad de 9 [V] y un stall current de 6500 [mA], su reductor es de 74.83:1 el cual proporciona 150 [oz·in] de par, el encoder incremental doble puede alimentarse de 3.5 [V] hasta 20[V] y un máximo de 10 [mA], estos encoders se encuentran desfasados aproximadamente por 90[°]

dándonos 48 conteos por revolución en forma de tren de pulsos, consecuentemente a la salida de la caja reductora obtendremos un total de 3492 posibles conteos por revolución, proporcionándonos una resolución suficiente para el control.



Pololu

Ilustración 5 encoder

1.2.4. Teoría de control

El control ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería, debido a su altísima importancia en sistemas como lo son automóviles, la robótica y por supuesto se ha vuelto parte fundamental e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura; debido a que los avances en la teoría y práctica del control aportan los medios para obtener un desempeño óptimo en los sistemas dinámicos, mejoran producción, aligeran cargas en operación manuales repetitivas y rutinarias.

Para analizar los sistemas de control se deben definir ciertos términos básicos:

Variable controlada y manipulada: la variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla, la variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable a controlar. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada del sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado.

Plantas: una planta puede ser parte de un equipo, tal vez un conjunto de partes de una máquina que funcionan juntas, el propósito de la cual es ejecutar una operación particular, es decir cualquier objeto físico que se puede controlar.

Perturbaciones: una perturbación es una señal que se tiende a afectar negativamente al valor de la salida del sistema.

Control retroalimentado: el control retroalimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base en esta diferencia.

Sistemas de control de lazo cerrado: el sistema de control de lazo cerrado es aquel que alimenta al controlador con la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada (referencia) y la señal de retroalimentación, a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente.

1.2.4.1. Diseño de sistemas de control

Las plantas son, en gran proporción, no lineales. Sin embargo, es posible aproximarlas mediante modelos matemáticos lineales, podemos usar métodos de diseño bien desarrollados. Si se presenta el desempeño en términos de las características de la respuesta transitoria y/o las medidas de desempeño en el dominio de la frecuencia, se usaran sistemas de control clásico; si estas se encuentran en términos de variables de estado, deben usarse los enfoques de control moderno.

Los sistemas de control que pueden diseñarse mediante un enfoque convencional están por lo general limitados a una entrada y una salida, y son lineales e invariantes en el tiempo. El diseñador busca satisfacer todas las especificaciones de desempeño mediante la repetición estudiada de prueba y

error. Después de diseñar un sistema, el diseñador verifica si satisfacen todas las especificaciones de desempeño, aunque el diseño se basa en un procedimiento de prueba y error, el ingenio y los conocimientos del diseñador cumplen una función importante en un exitoso diseño. Un diseñador experimentado será capaz de diseñar un sistema aceptable sin realizar muchas pruebas.

Por lo general, es conveniente que el sistema diseñado exhiba la menor cantidad posible de errores, en respuesta a la señal de entrada. A este respecto, debe ser razonable el amortiguamiento del sistema. La dinámica del sistema debe ser relativamente insensible a variaciones pequeñas en sus parámetros. Las perturbaciones no deseadas deben estar bien atenuadas.

1.2.4.2. Control en espacio de estados

La teoría de control convencional está basada en la relación entrada salida, o función de transferencia, la teoría de control moderna se basa en la descripción de ecuaciones de un sistema en términos de n ecuaciones de primer orden, que se combina en una ecuación diferencial matricial de primer orden. El uso de la notación matricial simplifica enormemente la representación matemática de los sistemas de ecuaciones, el incremento de la cantidad de variables de estado, de entradas o salidas no aumenta la complejidad de las ecuaciones. De hecho, el análisis de los sistemas complicados con entradas y salidas múltiples se realiza mediante procedimientos ligeramente más complicados.

La base del sistema es considerar que la planta en el espacio de estados está representada por:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

En el cual se realimentan todas las variables de estado por medio de n ganancias K_n que podían ajustar para obtener los valores requeridos de polo en lazo cerrado determinando las ecuaciones de estado como:

$$\dot{x} = Ax + Bu = Ax + B(-Kx + r) = (A - BK)x + Br$$

$$y = Cx$$

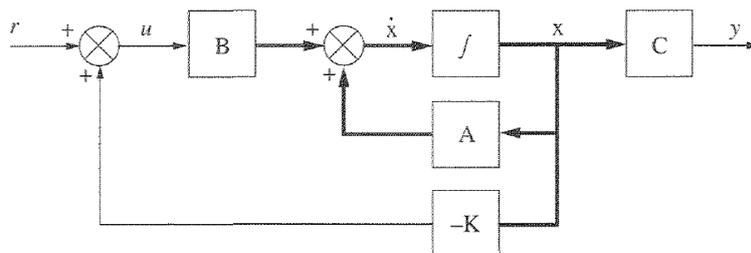


Ilustración 5 diagrama de bloques de control

2. Selección de ley de control

Algunos de los elementos a considerar para la elección de método de control son:

1. La variable de control será necesariamente la posición angular de las cuatro válvulas, auxiliadas por el encoder incremental con el que cuentan cada una de ellas, y por consecuencia tenemos como variable de control el voltaje al cual será expuesto el motor de corriente directa de alta potencia.
2. La importancia de la precisión, ya que cada una de las válvulas contribuye de manera significativa a la respuesta final del sistema debido al poco espectro de acción de los motores, previamente se había probado un control PID y obteníamos un error de 10%, y sabemos que normalmente un control en espacio de estados tiene un mejor desempeño.
3. La estabilidad total del sistema es indispensable garantizarla durante el proceso de regulación esperado y en estados que lleven al borde variables inmiscuidas en éste, provocando que el control sea necesariamente robusto.
4. Un punto primordial que determinó la elección del tipo de control fue la poca información sobre el funcionamiento interno de la turbina, debido a que, durante las pruebas de comportamiento de la válvula, los requerimientos de corriente y voltaje fueron muy variables generando una necesidad de control sobre estas. Además de una forzosa rutina de calibración, con la cual era necesario el conocimiento del valor de la corriente eléctrica.
5. Los objetivos de control serán la regulación y la estabilización del sistema, es decir, de las revoluciones de la turbina, esto como consecuencia de las necesidades dadas por las prácticas que se impartirán en el laboratorio.

Concluyendo que el método indicado para la regulación de las revoluciones fue una retroalimentación en espacio de estados.

Determinado el sistema como

$$\dot{x}[3x1] = Ax[3x3] + B([3x1]u[3x1])$$

$$y[3x1] = C[1x3]x[3x1]$$

Donde la ley de control será

$$u = k_0w - k[1x3]x[3x1]$$

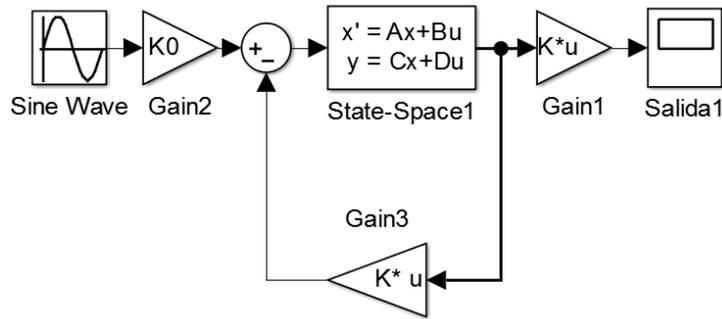


Ilustración 6 diagrama de bloques Simulink

Finalmente se determinaron tres etapas elementales para solucionar el problema, una interfaz de usuario, un período de control electrónico y la etapa de potencia que cumpla con los requerimientos del motor y sus posibles alimentaciones límite.

3. Modelado

3.1. Consideraciones

Durante el modelado se detectaron dos elementos a considerar, el motor y el elemento mecánico de la válvula, idealizando algunos aspectos que enseguida enlistaré.

- 1) Pérdidas mecánicas por encoder mínimas.
- 2) El voltaje aplicado a la armadura del motor es proporcional a la velocidad del motor.
- 3) El acoplamiento motor válvula es totalmente justo (no hay pérdidas mecánicas por tolerancias excesivas).

3.2. Selección de variables y obtención de ecuaciones de comportamiento

Antes de realizar el modelado tenemos 2 equivalencias importantes

Relación par- corriente

$$\tau = K_t * i$$

Relación fuerza electromotriz-velocidad angular

$$Fem = K_E * \dot{\theta}$$

Relación corriente-frecuencia

$$\tau = b * \dot{\theta}$$

$$b = \frac{\tau}{\dot{\theta}}$$

Dado el circuito tenemos que:

$$L \left(\frac{di}{dt} \right) + Ri = V - K_e \dot{\theta}$$

Despejamos a $\frac{di}{dt}$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V - K_e \dot{\theta}}{L} - \frac{R * i}{L}$$

El cual representa el comportamiento de la corriente en todo momento.

En el caso de la masa rotacional obtenemos lo siguiente:

$$J \ddot{\theta} = T - K_E * \dot{\theta}$$

Despejamos $\ddot{\theta}$

$$\ddot{\theta} = \frac{T}{J} - \frac{K_e \dot{\theta}}{J}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{K_T * i}{J} - \frac{b * \dot{\theta}}{J}$$

Y finalmente la velocidad angular está definida como:

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$$

Voltaje V , velocidad $\dot{\theta}$, constante de armadura de motor k , constante de amortiguamiento b , y momento de inercia J , Resistencia interna del motor R , inductancia L

3.3. Traslado a espacio de estados

Ya obtenidas las 3 ecuaciones de comportamiento lo trasladaremos al espacio de estados. Debido a que nuestro sistema es de tercer orden, definimos los estados como:

$$x_1 = \theta$$

$$x_2 = \dot{\theta}$$

$$x_3 = i$$

Consecuentemente

$$\dot{x}_1 = \dot{\theta}$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{\theta}$$

$$\dot{x}_3 = \dot{i}$$

Sustituyendo las ecuaciones de comportamiento

$$\dot{x}_1 = \dot{\theta}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{K_T * x_3}{J} - \frac{b * x_2}{J}$$

$$x_3 = \frac{V - K_e x_2}{L} - \frac{R * x_3}{L}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V - K_e \dot{\theta}}{L} - \frac{R * i}{L}$$

Al pasar esas ecuaciones al espacio de estados obtenemos.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{J} & \frac{k_T}{J} \\ 0 & -\frac{k_e}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u(t)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

4. Caracterización del motor

En este punto tenemos 5 variables por calcular k_t, k_e, R, J, L y b

Las primeras 4 se calcularán con dos pruebas:

4.1. prueba a rotor bloqueado.

Para ello se pondrá al motor de la siguiente forma:

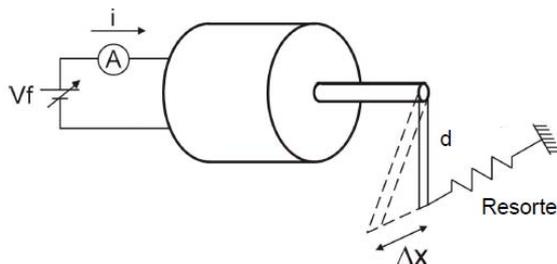


Ilustración 7 prueba a rotor bloqueado
Caracterización de motor de CD, Control automático, Dr.
Edmundo G. Rocha Cózatl

Con tal de imprimirle un voltaje de alimentación y espera a que el resorte detenga al motor.

Una vez que el motor se encuentra en dicho estado, procederemos a medir la corriente eléctrica y la distancia de deformación del resorte.

Podríamos ayudarnos con dinamómetro un a fin de simplificar la tarea del cálculo del par que fue necesaria para detener el motor. Con el fin de no tener grandes sesgos, a la hora de obtener las constantes haremos 10 distintas mediciones, y con ello podremos calcular la resistencia interna con ayuda de la ecuación de Ohm

$$R = \frac{V}{i}$$

En el caso de k_t reutilizaremos la ecuación

$$\tau = K_t * i$$

Despejando

$$k_t = \frac{\tau}{i}$$

4.1.1. Pruebas

En esta prueba se utilizó un resorte, al cual le tendrá que calcular su constante k, para ello se utilizaron 2 masas de 10 y 20 kg, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 1 constante de resorte

Masa [Kg]	Peso [N]	L0 [m]	LF [m]	Elongación [m]	K [Kg/m]
10	98.1	0.05	0.11	0.08	1226.25
20	196.2	0.05	0.19	0.14	1401.428571
				K promedio =	1313.839286

Se obtuvo una contante de elongación = 1313.839286 [Kg/m]

Tabla 2 Datos a rotor bloqueado para resistencia

Corriente	Voltaje	delta x	Li	Lf
1.1	2	0.025	0.05	0.075
1.3	3	0.049	0.05	0.099
1.7	4.5	0.067	0.05	0.117
2.2	6	0.072	0.05	0.122

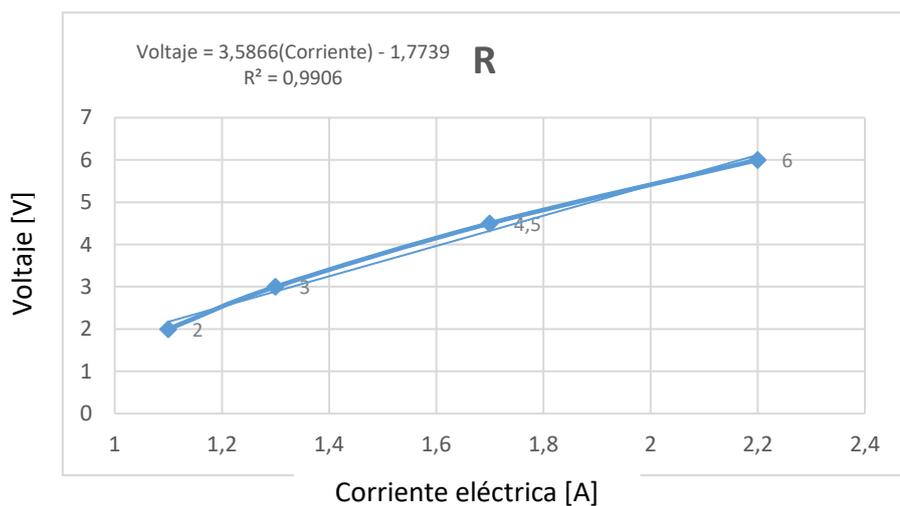


Ilustración 8 grafica de cálculo de R

$$R = 3.5866$$

* R^2 : Coeficiente de determinación

Tabla 3 Datos a rotor bloqueado para K_T

Fuerza [N]	Distancia [m]	Corriente [A]	Par [Nm]
32.8459821	0.018	1.1	0.591227679
64.378125	0.018	1.3	1.15880625
88.0272321	0.018	1.7	1.584490179
94.5964286	0.018	2.2	1.702735714

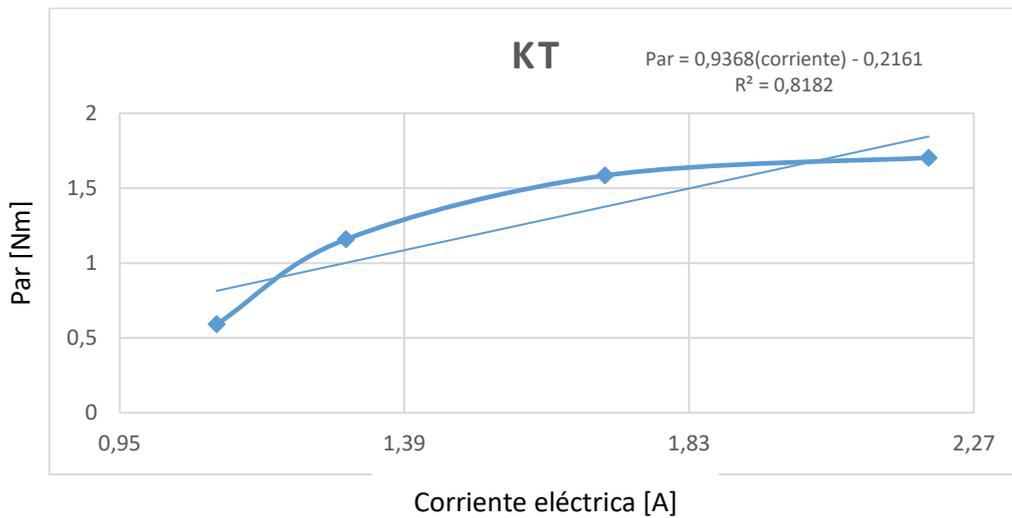


Ilustración 9 Grafica cálculo de K_t

$$K_t = 0.9368$$

4.2. Prueba a rotor libre.

El objetivo de esa segunda prueba es calcular la velocidad angular dejando el rotor libre, proporcionándole distintos voltajes constantes.

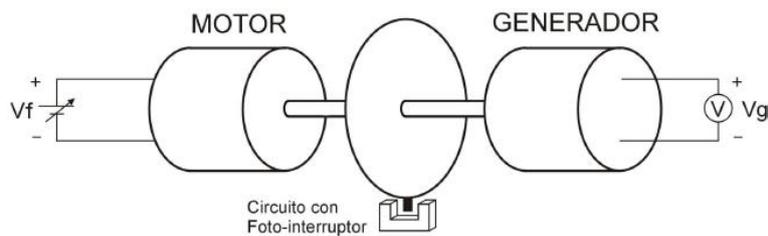


Ilustración 10 prueba a rotor libre
Caracterización de motor de CD, Control automático, Dr. Edmundo G. Rocha Cózatl

Para ello se calculará la frecuencia en función del periodo generado por el motor:

$$f = \frac{1}{P_f}$$

Además, sabemos que:

$$\dot{\theta} = 2\pi * f$$

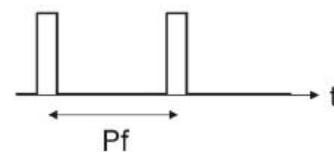


Ilustración 11 periodo de ciclo
Caracterización de motor de CD,
Control automático, Dr. Edmundo G. Rocha Cózatl

Y de igual forma utilizaremos la ecuación de comportamiento de la velocidad angular en función de la constante k_e y la fuerza electromotriz.

$$Fem = K_E * \dot{\theta}$$

Despejamos

$$K_E = \frac{fem}{\dot{\theta}}$$

4.2.1. Pruebas

Tabla 4 Datos a rotor libre para KE

Voltaje	Periodo	Frecuencia	Velocidad $\dot{\theta}$	Voltaje Fem
2	4.86	0.205761317	1.292839506	1
3	1.36	0.735294118	4.62	2.69
3.5	1.04	0.961538462	6.041538462	3.255
4	1	1	6.2832	4.07
4.5	0.95	1.052631579	6.613894737	4.85
5	0.9	1.111111111	6.981333333	5.34
5.5	0.82	1.219512195	7.662439024	5.65
6	0.6	1.666666667	10.472	6.55

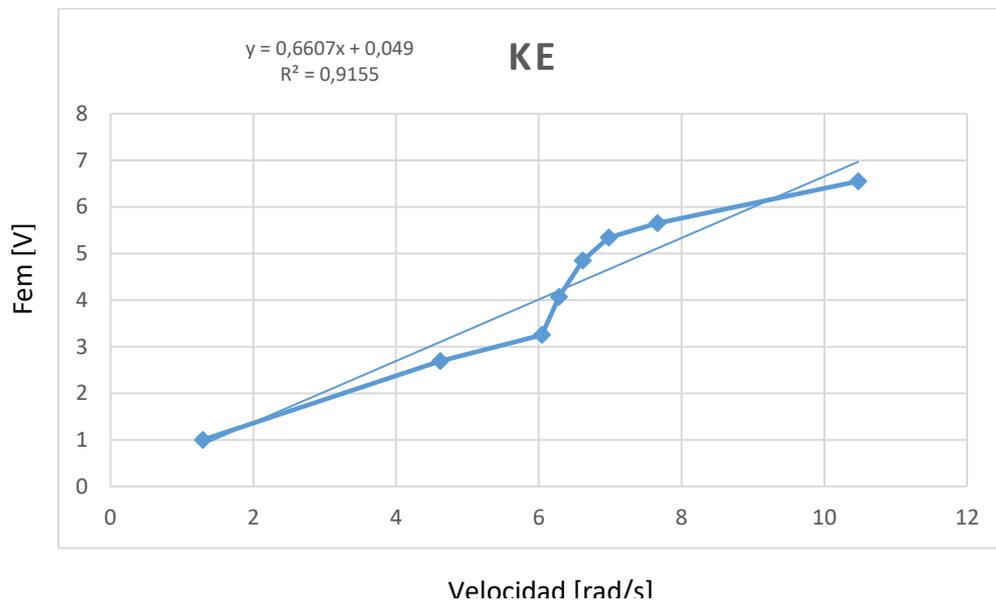


Ilustración 12 grafica de cálculo de Ke

$$K_E = 0.6607$$

Tabla 5 Datos a rotor libre para b

VELOCIDAD	PAR	CORRIENTE
0.20576132	0.456253834	0.557631183
0.73529412	0.684380751	0.836446774
0.96153846	0.798444209	0.97585457
1	0.912507667	1.115262365
1.05263158	1.026571126	1.254670161
1.11111111	1.140634584	1.394077957
1.2195122	1.254698043	1.533485753
1.66666667	1.368761501	1.672893548

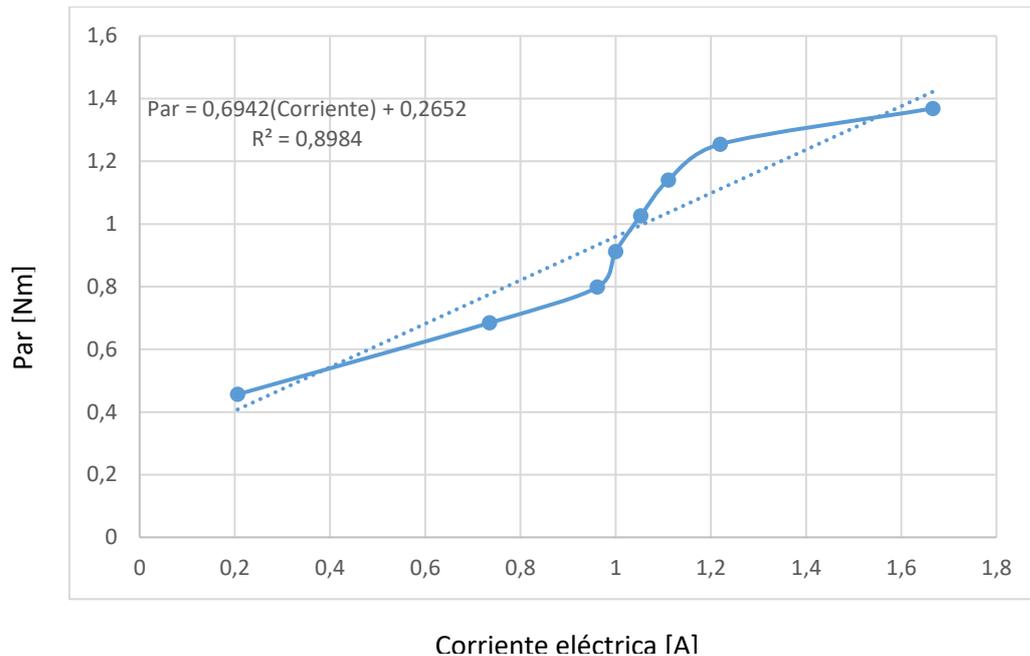


Ilustración 13 grafica cálculo de b

$$b = 0.6942$$

Como consecuencia de que el mayor momento de inercia lo cuenta el elemento mecánico de la válvula, despreciaremos la inercia del motor pues en proporción es mínima. Para ello nos auxiliamos de CAD, el cual proporciona el cual proporcio $J = 0.00014632$ [kg/m²].

El motor cuenta con una inductancia $L = 1.602$ [mH]

Ya establecidas las constantes tenemos el modelo completo

$$L = 1.602 \text{ [mH]}$$

$$K_E = 0.6607$$

$$J = 0.0014632 \text{ [kg/m}^2\text{].}$$

$$K_t = 0.9368$$

$$R = 3.5866$$

$$b = 0.6942$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -4744.3958 & 6402.406 \\ 0 & -412.422 & -2238.8267 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 624.22 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

5. Cálculo de control

5.1. Estabilidad

Antes de poder calcular el control, es necesario saber si el modelo matemático es estable, de lo contrario no se podría aplicar ninguna ley de control y esperar un buen resultado.

Por ello definimos las matrices del modelo en variables de estados y calculamos sus raíces, obteniendo lo siguiente.

$$S_{1,2,3} = 1000 (0, -0.6335, -2.2971)$$

Obtenemos 2 raíces ubicadas en el semiplano negativo del dominio de s.

Mientras que una de ellas se encuentra en el eje imaginario. Tornando nuestro sistema a críticamente estable. Algo esperado pues la posición no puede depender de alguna de las variables de control, cuestión por la cual no es parte directamente de ninguna de las ecuaciones de comportamiento, para ello se desarrollará en control.

5.2. Controlabilidad

Definimos la matriz de Controlabilidad y calculamos su rango:

```
>> MC=ctrb(A,B)

MC =

    1.0e+09 *
         0         0    0.0004
         0    0.0004   -1.2864
    0.0000   -0.0017    3.9331

>> rank(MC)

ans =

     3
```

Ilustración 14 creación de matriz de controlabilidad

En conclusión, tenemos que el modelo de nuestro sistema es controlable al obtener el $rank = 3$.

5.3. Cálculo de constantes de retroalimentación

Hasta ahora todo lo hecho es por parte del modelado del sistema. Por consiguiente, comenzaremos con el controlador por retroalimentación de estados, en principio debemos conocer cuál será nuestro desempeño deseado (20% sobrepaso y el tiempo de asentamiento será de 0.1 segundos), a partir de esto calculamos los polos deseados:

$$Re\{pD\} = \frac{5}{0.5} = 50$$

$$Im\{pD\} = \frac{-\pi(50)}{Ln(20)} = -52.43$$

Entonces tenemos los polos $50 \mp 52.43j$

Para el tercer polo usaremos el criterio de los polos dominantes, por ello escogemos el polo -250.

Utilizaremos nuestro algoritmo Place para calcular K y la redimensión de la señal de referencia K0.

```
>> K=place(A,B,[-50+52.43*j -50-52.43*j -250])
K =
    2.9896    -0.4573    -3.7683
>> K0=inv(C*inv(A+B*K)*B)
K0 =
    2.9896
```

5.4. Simulación

Ilustración 15. Calculo constantes K y K0

Para la simulación del control nos ayudamos de un software de soluciones numéricas, conectando gráficamente cada uno de los elementos inmiscuidos en el control. Se crearon 2 diagramas de bloques, el primero (figura 16) tiene alimentaciones de los estados ideales, es decir puede tomar cualquier valor en el dominio de los reales, el segundo (figura 17) cuenta con bloques de saturación tanto en alimentación de voltaje como de corriente eléctrica, la velocidad también se encuentra afectada debido al comportamiento lineal que tiene con respecto al voltaje de alimentación.

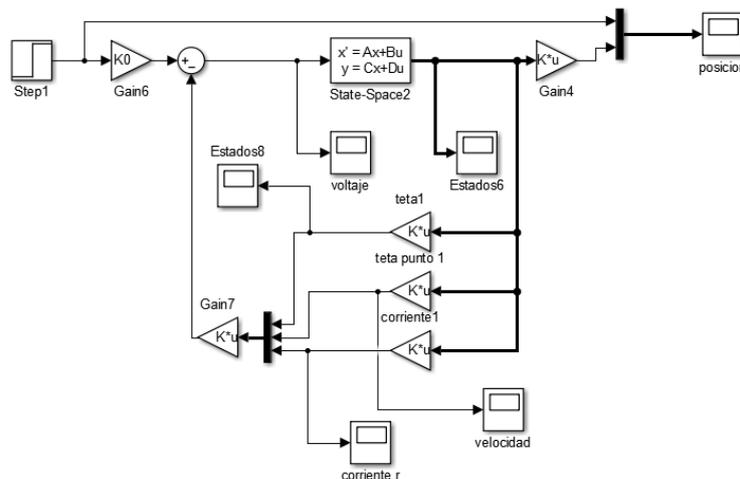


Ilustración 16 Control ideal

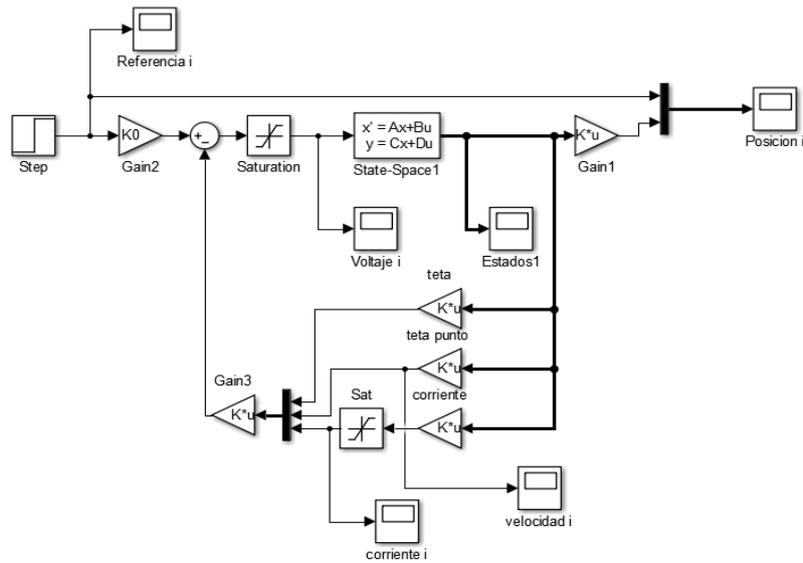


Ilustración 17 Control con límite de saturación

5.4.1. Tren de pulsos

La posición referencia será un tren de pulsos que tendrá una frecuencia de 0.6666 [Hz] con una magnitud de 6 [Rad] equivalente a una posición de 343°46'8" y con un tiempo en alto del 45% obteniendo las siguientes graficas:

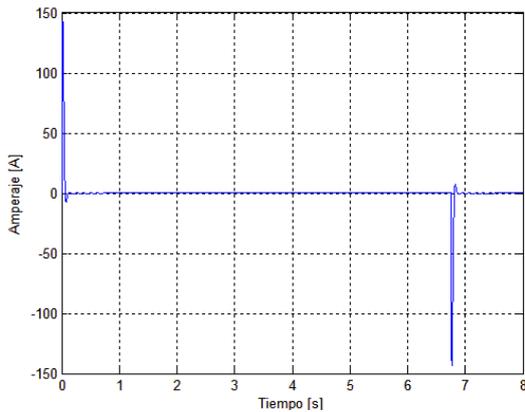


Ilustración 18 Amperaje de pulsos sin saturación

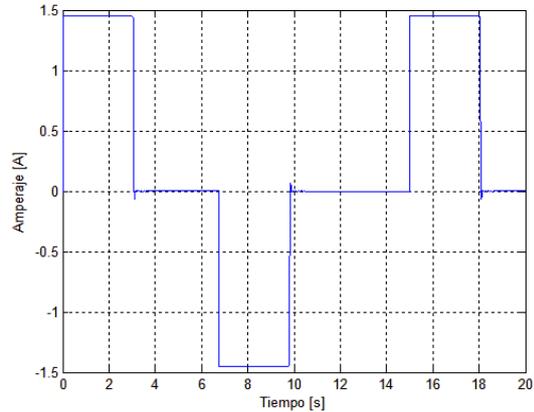


Ilustración 19 Amperaje de pulsos con saturación

La corriente eléctrica ideal necesaria se encuentra cerca de 150 [A], una centésima parte del real proporcionado por el sistema.

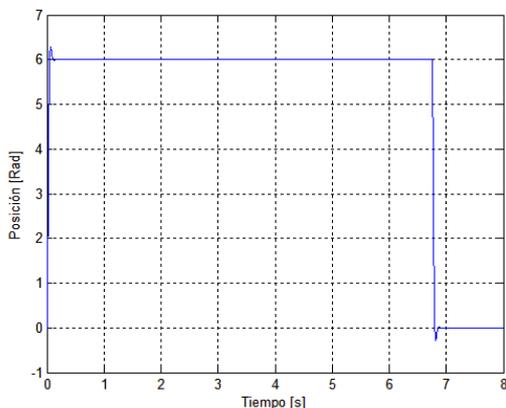


Ilustración 20 Posición de pulsos sin saturación

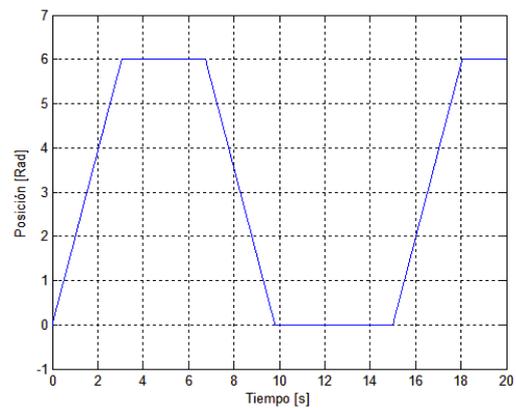


Ilustración 21 Posición de pulsos con saturación

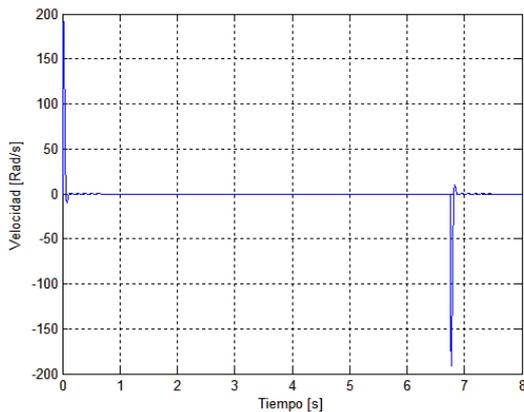


Ilustración 22 Velocidad de pulsos sin saturación

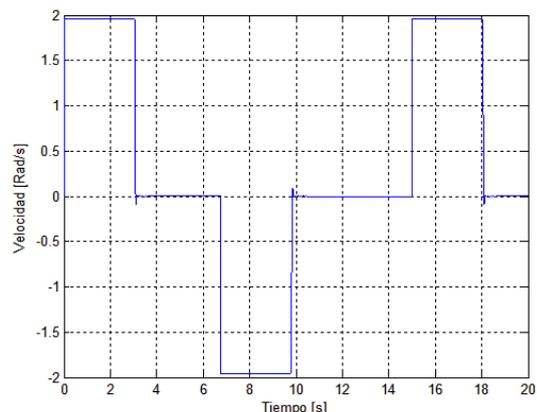


Ilustración 23 Velocidad de pulsos con saturación

De igual forma la velocidad se ve limitada pues este es proporcional al voltaje proporcionado por la fuente de alimentación.

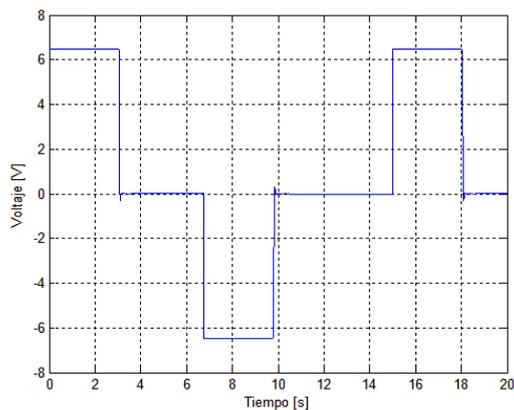


Ilustración 24 Voltaje de alimentación de pulsos con saturación

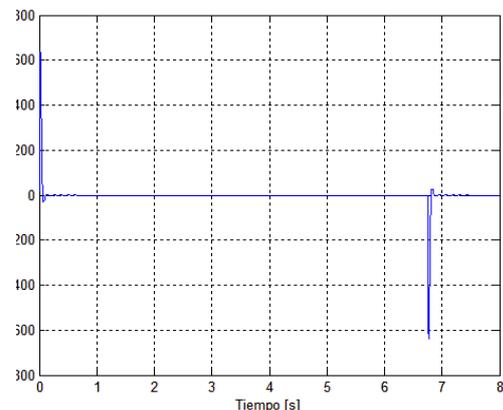


Ilustración 25 Voltaje de alimentación de pulsos sin saturación

Es evidente que los estados necesarios para el funcionamiento ideal del control son en magnitud muy elevados a los proporcionado por nuestro sistema, en forma específica, con un voltaje máximo de 6 [V] y un amperaje de 4.5 [A], limitando con esta la velocidad del motor a $1.809 \left[\frac{rad}{s} \right]$ provocando que el estado transitorio sea mucho mayor al esperado, aunque el sobrepaso fue casi atenuado en su totalidad.

Otro aspecto que podemos observar es la corriente máxima que exige el sistema (1.339 [A]), pues ésta es mucho menor al límite de saturación, cuestión que no preocupa, ya que la simulación esta en función de un rotor completamente libre. Asegurándonos una franja de permiso para la corriente de (1.339[A]-4.5[A]) por si el sistema requiere más potencia. Situación que se encontrara durante la rutina de calibración, el funcionamiento con vapor pasando por la turbina y además de la fricción de la cuerda de la válvula sumado al muelle que está diseñado para evitar backlash.

5.4.2. Sinusoidal

La referencia sinusoidal tendrá una frecuencia de $0.43 \left[\frac{rad}{s} \right]$ y una magnitud máxima de 2π con la cual obtendremos los siguientes resultados:

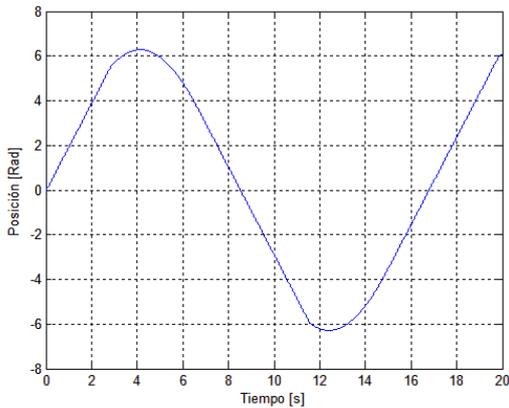


Ilustración 26 posición de señal sinusoidal con saturación

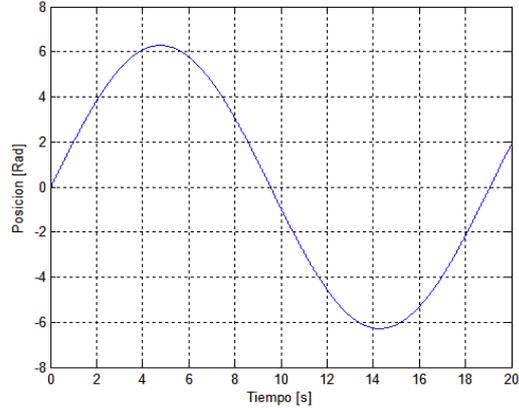


Ilustración 27 de posición de señal sinusoidal sin saturación

La saturación de las variables de alimentación provocó un retraso de 0.5 [s] en la respuesta de posición además de una geometría asimétrica.

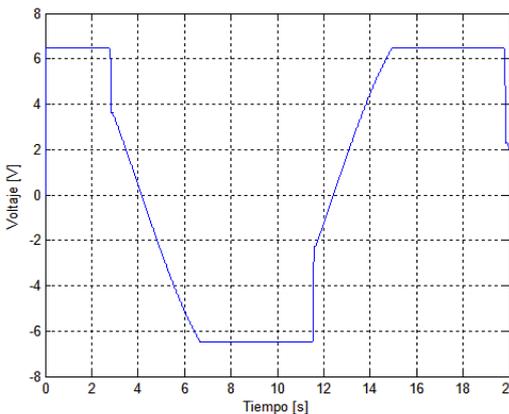


Ilustración 28 Voltaje de alimentación de señal sinusoidal con saturación

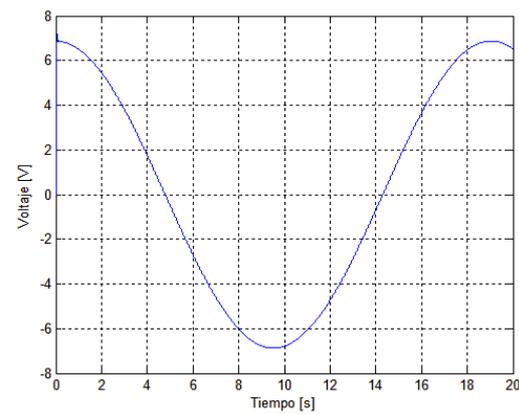


Ilustración 29 Voltaje de alimentación de señal sinusoidal sin saturación

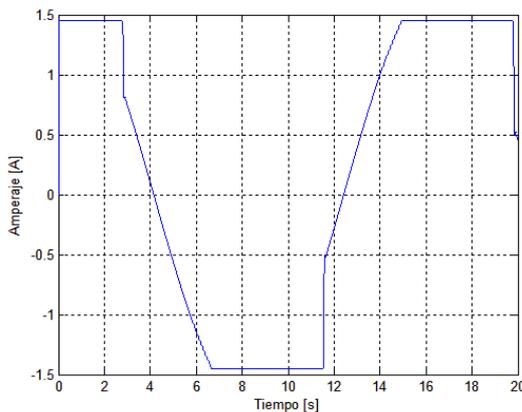


Ilustración 30 Corriente eléctrica de señal sinusoidal con saturación

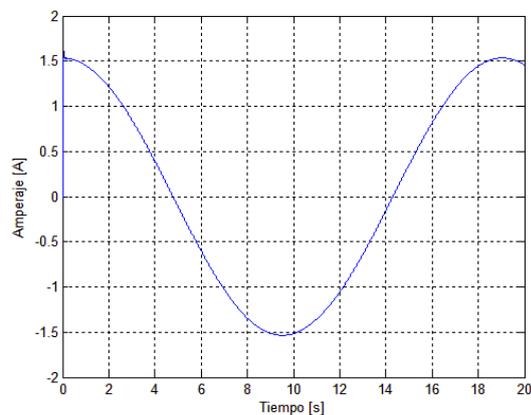


Ilustración 31 Corriente eléctrica de señal sinusoidal sin saturación

El pequeño recorte del voltaje sumado al de la corriente eléctrica provocó un comportamiento rectangular en ambas variables.

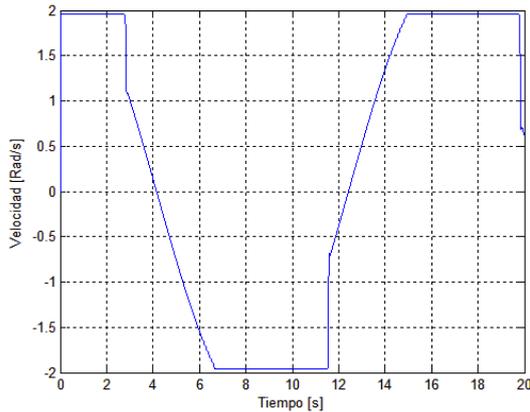


Ilustración 32 Velocidad de señal sinusoidal con saturación

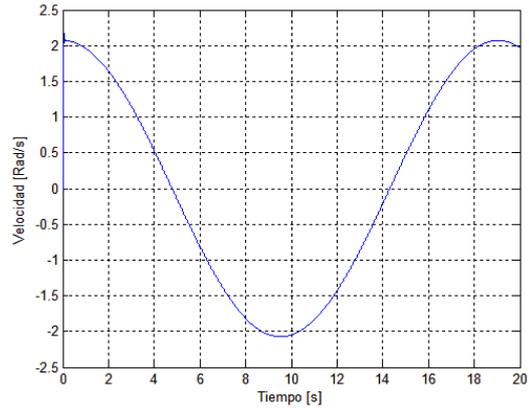


Ilustración 33 Velocidad de señal sinusoidal sin saturación

A la diferencia del tren de pulsos el control es capaz de seguir una señal sinusoidal con un error mínimo, como podemos ver en las similitudes de las ilustraciones 26 y 27 sin importar que la saturación de los demás estados provoca un corte muy evidente además del su comportamiento poco armónico.

Al igual que el tren de pulsos no llega a la corriente eléctrica de saturación y de igual forma nos permite tener potencia extra si es necesario.

Uno de los inconvenientes del control ante este tipo de señales es consecuencia de nuevo de la velocidad límite, ya que si lo forzamos a frecuencias más altas no es capaz de darle un buen seguimiento tal y como se muestra en la siguiente imagen donde podremos ver la posición de control ante dos distintas frecuencias.

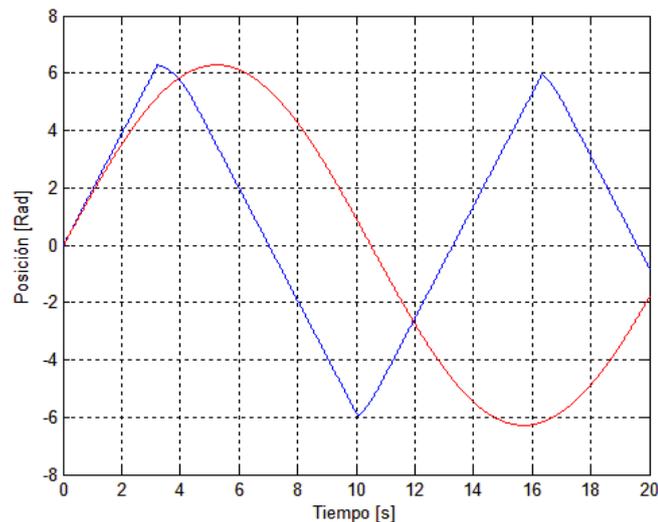


Ilustración 34 Posición ante distintas frecuencias

5.4.3. Simulación de control digital

Con el fin de obtener una mejor aproximación al verdadero funcionamiento del control, se añadió un retenedor de orden cero (ROC) con la posible frecuencia de funcionamiento del microcontrolador y una zona muerta que tiene el motor ante los voltajes bajos.

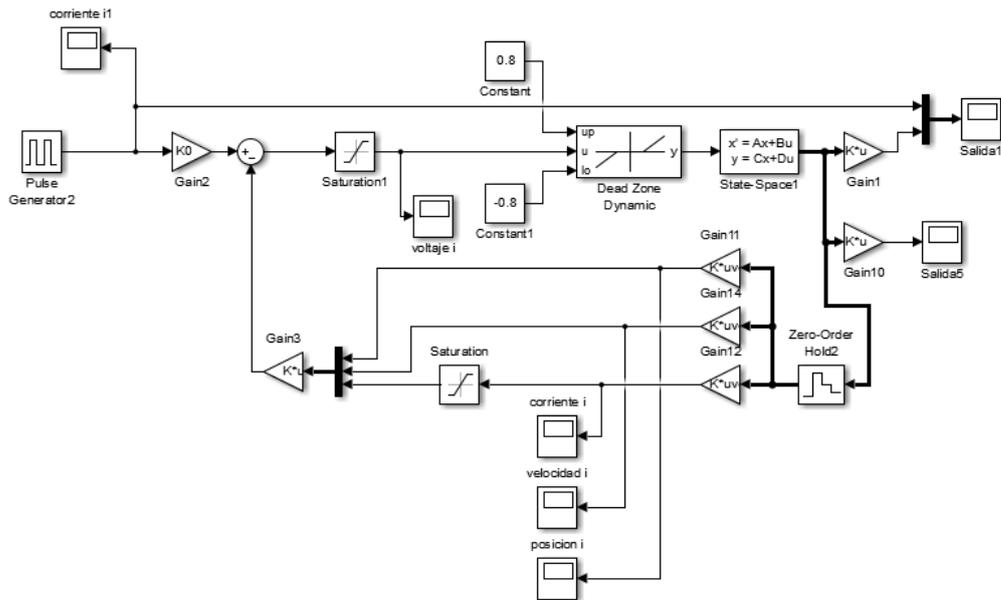


Ilustración 35 Control con ROC y zona muerta

Obtenido los siguientes resultados:

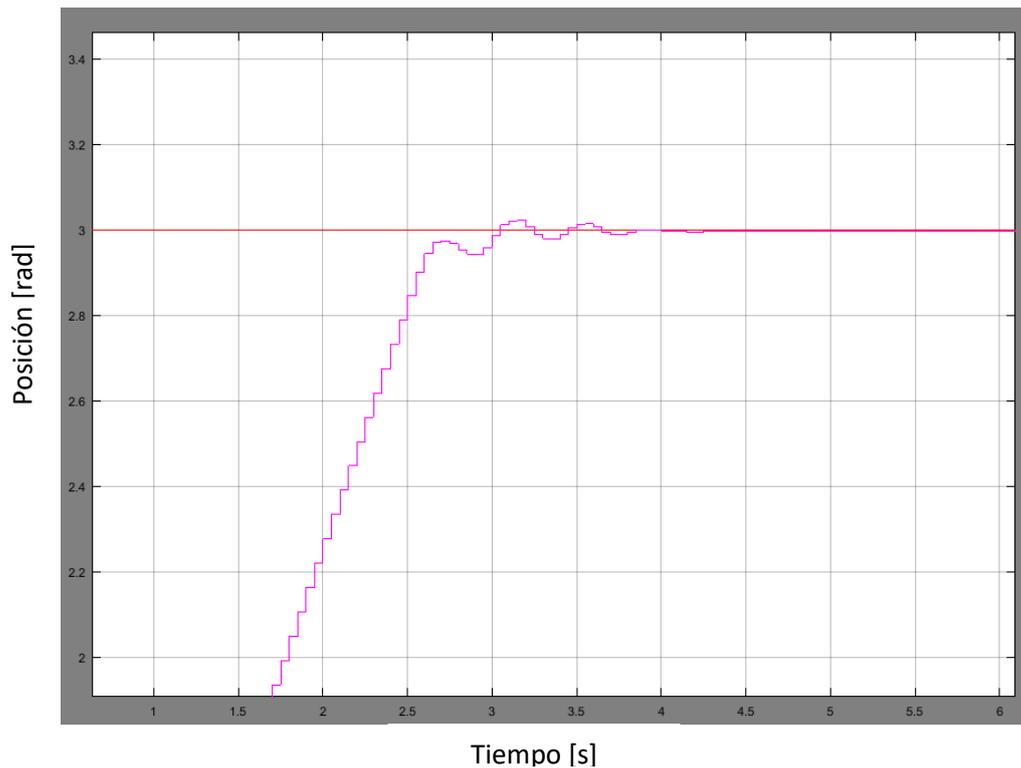


Ilustración 36 respuesta de control con ROC y zona muerta

Como podemos dar cuenta, el número de oscilaciones al igual que el tiempo de la respuesta transitoria aumentó, además de darnos un pequeño crecimiento en el error en esto estable, pero nada que podría dañar la estabilidad del sistema.

Al llevar la simulación con una frecuencia del retenedor menor a 100 [Hz], la respuesta se vuelve totalmente divergente.

6. Diseño de Tarjeta de control

6.1. Selección de microcontrolador

La selección del microcontrolador fue basada según el requerimiento de los periféricos, así como en la memoria tanto RAM como ROM disponible:

- ✓ Número de salidas de control necesarias para hacer pruebas con las cuatro servo-válvulas, es decir, las 8 terminales de polarización (8 terminales CCP), la utilización de Demultiplexores extiende al doble cada uno de estos pines.
- ✓ 6 terminales de interrupción extrema y 8 terminales digitales para llevar a cabo el conteo de encoder incremental, conocer el avance del motor, así como su sentido de giro y retroalimentación entre microcontroladores
- ✓ 8 terminales para control de Demultiplexores.
- ✓ 14 terminales digitales para el manejo de la impresión en display LCD para mostrar la posición actual independiente de cada válvula.
- ✓ 2 terminales de lectura de señal analógica (Lectura del sensor de corriente).
- ✓ Un puerto de comunicación (Protocolo RS-232), con el cual se tendrá flujo de información con la paquetería del ordenador y entre microcontroladores.
- ✓ Requiere procesar 1810 instrucciones en un máximo de 0.01 [s]

Las PIC seleccionadas para las pruebas fue un microcontrolador Microchip 18f4550 con un cristal de 20 [MHz], programado en CCS.

6.2. Algoritmo de lógica de comportamiento

Después de analizar cuál sería el comportamiento idóneo para las válvulas, y tomando en cuenta que estas podrían no funcionar al mismo tiempo, obtuvimos el siguiente algoritmo.

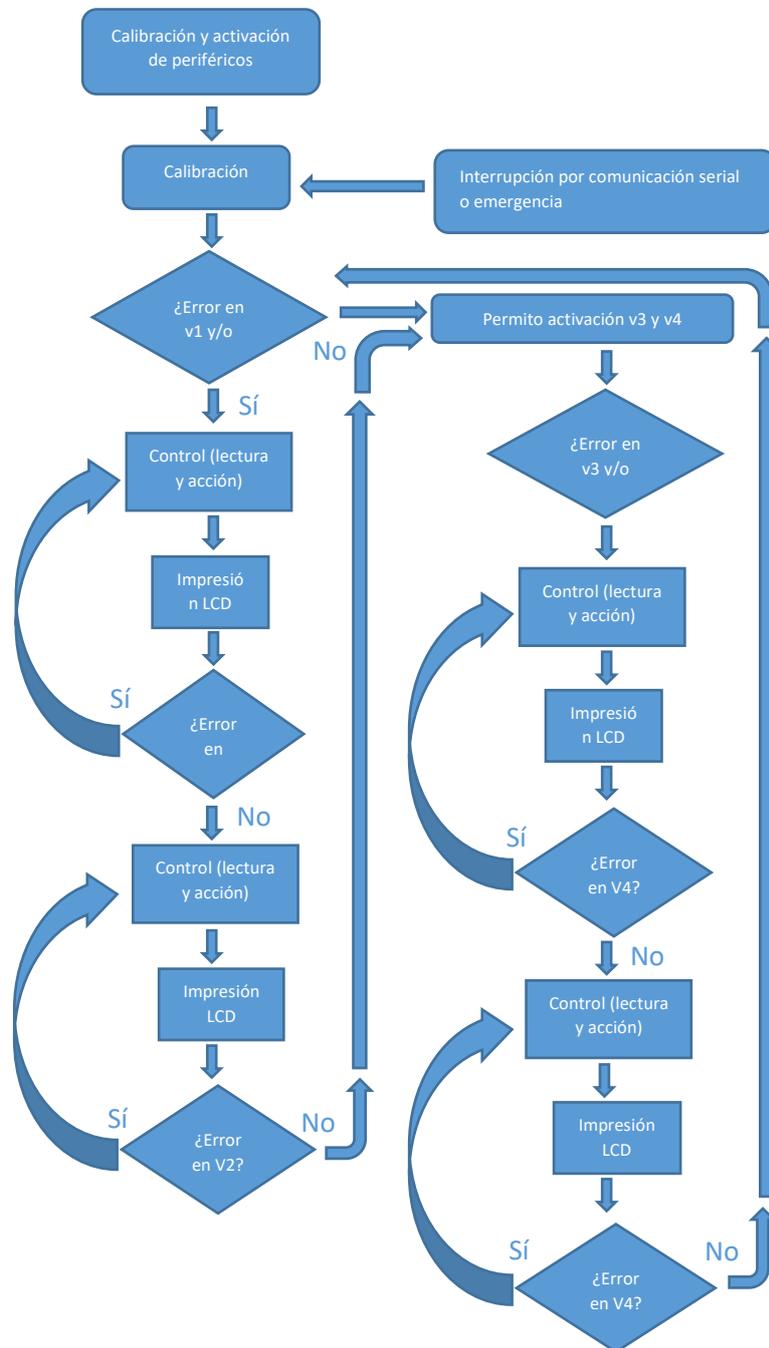


Ilustración 37 Diagrama de flujo del algoritmo de comportamiento

6.3. Comunicación

6.3.1. Protocolo RS-232

La comunicación será a través del puerto serial mediante un COM utilizando el protocolo RS-232 dicha comunicación es asíncrona, para la sincronización de una comunicación es preciso siempre un bit adicional a través del cual el emisor y receptor intercambia la señal de pulso, pero la transmisión serial a través de un cable de dos líneas no es posible ya que ambas están ocupadas por datos y tierra. Por este motivo se intercalan antes y después de los datos de información de estado según el protocolo RS-232, esta información es determinada por el emisor y el receptor al estructurar la conexión mediante la correspondiente programación de sus puertos seriales.

En las computadoras actuales el puerto de comunicación serial ya desapareció prácticamente en su totalidad, casi ningún dispositivo lo incorpora, a pesar de ello aún sigue siendo útil. Para realizar las pruebas se puede utilizar la simulación de un puerto serial gracias a la ayuda de un conversor USB-RS-232.

Existen varias soluciones

- Placa E/S con bus PCI. Suele incorporar un puerto paralelo y dos serie. Es una solución sólo válida para PCs de escritorio.
- PCMCIA o Express Card con puertos serie. Solución para portátiles. Suele ser una solución cara.
- Adaptador comercial USB-Serie. Incorporar en la aplicación del PIC un FT232 de FTDI, CP2102 o MCP2200 de Microchip.

Por ello se tomó la decisión de incorporar un adaptador USB-serial el cual cuenta con un conector macho USB y uno hembra db9, tal y como se muestra en la figura 38.

Para realizar pruebas podemos simular un puerto serie en la PC, de tal manera que creamos un puerto virtual al que pueden acceder los programas exactamente igual como si fuese uno real.



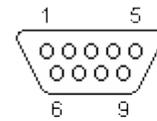
Ilustración 38 Cable USB-DB9

El puerto serie es accesible mediante conectores, siendo el DB9 macho cual cuenta con la siguiente configuración.

Tabla 6 Conexiones RS232

Conector RS232 en el PC:	
1. CD	(Carrier Detect) Entrada
2. RXD	(Receive Data) Entrada
3. TXD	(Transmit Data) Salida
4. DTR	(Data terminal Ready) Salida
5. GND	(Ground)
6. DSR	(Data Set Ready) Entrada
7. RTS	(Request To Send) Salida
8. CTS	(Clear To Send) Entrada
9. RI	(Ring Indicator) Entrada

Conector DB9 macho
Conector del PC



Conector DB9 hembra

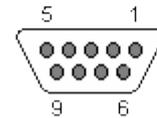


Ilustración 39 Pines cable DB9

Para comunicarse con un microcontrolador bastan con 3 líneas (visto desde el PC):

- Pin 3 TXD, transmisión de datos.
- Pin 2 RXD, recepción de datos.
- Pin 5 GND, masa.

Es importante tener en cuenta que en el protocolo RS232 utiliza lógica negativa, un nivel alto (1) es de -3V a -15 [V], y un nivel bajo (0) es de +3 a +15 [V]. Usualmente los valores son +/-12 [V].

6.3.2. MAX233

Puesto que un PIC utiliza niveles TTL es necesario un convertor de niveles. El más utilizado es el circuito integrado MAX2323 de Dallas Semiconductor.

El MAX233 convierte los niveles RS232 a TTL y viceversa con una fuente de sólo 5 [V]. Contiene dos drivers TTL-RS232 y dos drivers RS232-TTL. Este convertidor solo necesita un capacitor de 1[μF] en su alimentación y podría ser imprescindible, a diferencia de su primo MAX232 el cual deber tener 5 de estos, algo que nos ayuda sobremanera a la hora de la construcción de la placa.

La conexión común es la expuesta en la figura 40 la cual nos muestra la conexión DB9-MAX233 y MAX233-PIC, cabe recalcar que no todos los pines del conector DB9 serán utilizados (solo pines 2,3 y 5 los cuales son RX, TX y masa, respectivamente) mientras que los pines 8 y 7 estarán interconectados al igual que 6,4 y 1).

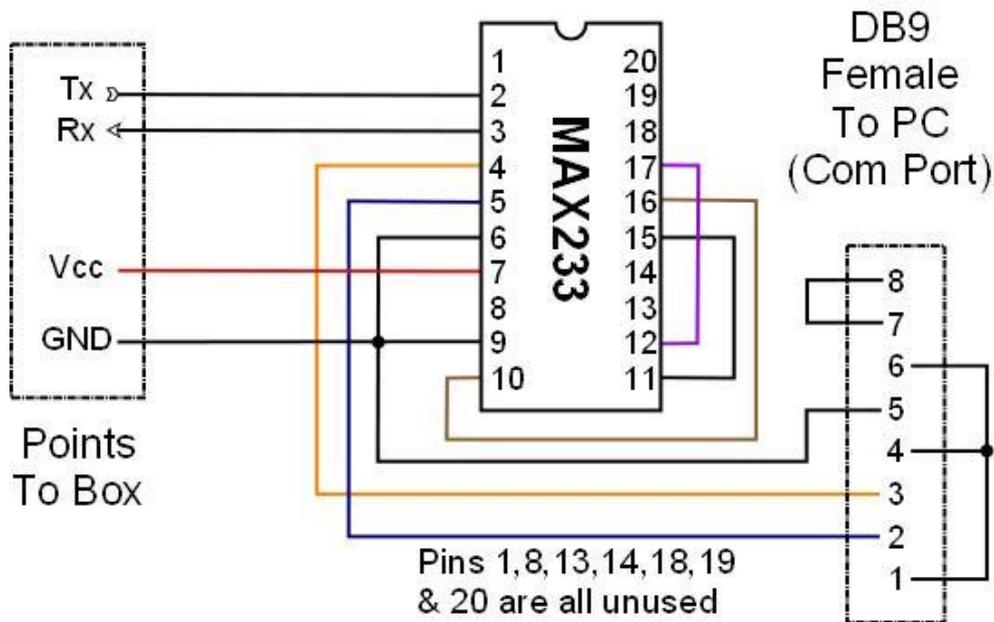


Ilustración 40 Configuración de conexión

La velocidad de transmisión es un dato importante, y es la cantidad de información enviada por segundo. Se expresa en baudios (bits por segundo) y en los puertos COM de un PC suele utilizarse 4800 o 9600 baudios que es la velocidad que utilizaremos para la programación, a esta velocidad se programara tanto las instrucciones del microcontrolador como la interface de comunicación PC-PIC hecho en LabVIEW.

```
#USE rs232(baud = 9600,xmit = pin_c6,rcv = pin_c7,bits = 8,parity = N)
```

Esta comunicación estará encargada de enviar la posición deseada del sistema, alimentada tanto de la instrumentación que nos proporcionará las revoluciones reales de la turbina, así como del modelo que calculará cual es la posición angular necesaria para llegar a los objetivos de control. Dicha interacción no será exclusivamente PC-PIC, también estarán continuamente en contacto los dos microcontroladores para mantener actualizados los requerimientos de control en cada uno, aunque debido al diseño secuencial de las válvulas tendrá una mayor jerarquía el microcontrolador que tiene por comisión las dos primeras válvulas.

La trasmisión de información será mediante interrupción por comunicación serial (INT_RDA) debido a que el control debe estar efectuándose prácticamente en todo momento, la recepción de información será en forma de código ASCII recibiendo carácter por carácter hasta formar un arreglo 5 elementos, el cual se trasformará en una variable manejable para el algoritmo de control.

```
Enable_interrupts(int_rda);
```

Al recibir las revoluciones deseadas, se calculará el porcentaje de apertura de cada válvula. Esto será programado en los dos microcontroladores, a diferencia que el primero también tendrá la tarea de enviar los datos al segundo, inmediatamente después de recibirlos.

6.4. Instrumentación

6.4.1. Interrupciones externas

Las interrupciones externas serán utilizadas para la detección de los pulsos a la salida de los encoder de cada motor, como consecuencia a la existencia de un encoder A y uno B las cuales tienen el comportamiento; como se muestra en la figura 41 en un sentido de giro, y este se invierte al cambiar la polaridad del motor; la salida del encoder A estará conectado a un pin de interrupción externa y el B a una lectura de pin digital.

Debido a esta configuración tenemos cuatro posibles estados:

1. Ninguno de los de los encoder en alto (00).
2. Primer encoder en alto y segundo en bajo (10).
3. Los dos encoder en alto (11).
4. Segundo encoder en alto y primero en bajo (01).

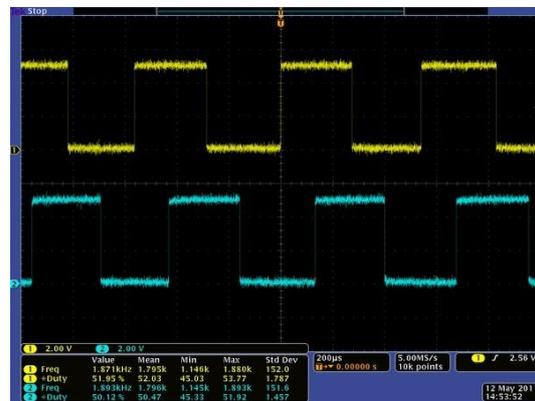


Ilustración 41 Señales encoder

Aunque lo importante son los cambios de estados pues éstos son los detectados por las interrupciones externas.

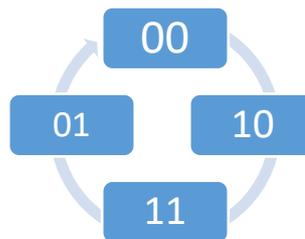


Ilustración 42 ciclo de encoder

Debido a que sólo tenemos conectado un solo encoder a la interrupción, y éste funciona en falco de subida, el único cambio de estado que detectará será durante las transiciones será 00 a 10 en sentido positivo y de 01 a 11 en sentido negativo.

```
Enable_Interrupts(Int_Ext);
```

```
Enable_Interrupts(Int_Ext1);
```

```
Ext_Int_Edge(H_TO_L);
```

Esto disminuye la resolución del conocimiento de posición a una cuarta parte; es decir, tendremos 898 conteos por revolución del rotor de la reducción:

$$\text{Grados por conteo} = \frac{360[^\circ]}{898} \approx 0.4[^\circ]$$

Una resolución capaz de dar buenos resultados para el control, en función de las necesidades del proyecto.

Para saber cuál es el sentido de giro, sólo se hará una lectura digital del encoder B, si este se encuentra en estado bajo se aumentará una unidad al conteo, en el caso contrario reducirá en una unidad dicho número. Esta variable asociada al contero será la encargada de mostrarnos cuál es la posición actual del motor además de ser parte en el cálculo para la gestión de la variable de control.

6.4.2. Sensor de corriente

El control tendrá un sensor de corriente eléctrica ACS711EX el cual tiene como umbral de funcionamiento -15.5 [A] a 15.5 [A], este sensor tiene como base de funcionamiento de efecto Hall, esto es muy importante, pues el sensor no provoca alguna afectación en el sistema, pues este método de instrumentación es prácticamente no invasivo, además que provoca una baja resistencia al flujo eléctrico que pase por él, siendo más específico 0.6 [mΩ].

Sus especificaciones de funcionamientos son:

Dimensiones.

Largo y ancho: 0.7" x 0.8

Peso: 1 [g] (sin headers)

Eléctricas:

- Umbral de corriente que es capaz de traducir en forma lineal es [-15.5 a 15.5 A], es decir la lectura puede ser bidireccional.
- La resistencia que provoca al pasar corriente eléctrica por el sensor es de 0.6 [mΩ].
- La corriente que necesitará el sensor en forma externa será de 4 [mA].
- Voltaje de alimentación podrá ser de 3 a 5.5 [V].
- La salida analógica es centrada es $V_{cc}/2$ equivalente a 0[A].
- Cuenta con un ancho de banda de 100 [kHz].
- Tiene un error de lectura de $\pm 5\%$.
- El sensor tiene una histéresis magnética 0.
- Su rango de temperatura es de $-40[^\circ\text{C}]$ a $125[^\circ\text{C}]$.

Este dispositivo cuenta con una salida digital como testigo de una lectura por encima de su umbral, anunciando que ésta no tendrá un comportamiento lineal.

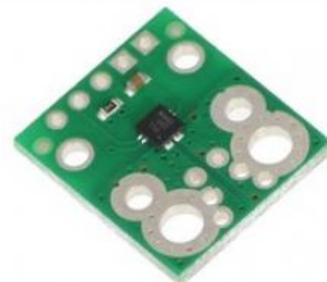


Ilustración 43 Sensor corriente

Las relaciones de corriente de lectura y de voltaje de salida están descritas por las siguientes ecuaciones:

$$V_{out} = \frac{V_{cc}}{2} + i * \frac{V_{cc}}{36.7[A]}$$

Despejando la corriente:

$$i = 36.7[A] * \frac{V_{out}}{V_{cc}} - 18.3[A]$$

El sensor será el segundo elemento que estará conectado a la alimentación, solo después de un fusible de 5 [A] por seguridad de las pistas de la etapa de potencia. La salida analógica estará conectada al pin de lectura $An0$ de cada uno de los dos microcontroladores.

6.5. Programación de microcontrolador

Utilizaremos un microcontrolador marca Microchip PIC18F4550 incluyendo la librería de microcontrolador, la impresión el LCD y otras pertinentes además de configurar el reloj a 20 [MHz]:

```
#define LCD_DATA_PORT getenv("SFR:PORTD")
#include < 18f4550.h >
#include < stdlib.h >
#use delay(clock = 20M)
#fuses NOWDT, MCLR, HS, CPUDIV1
```

La configuración de cada puerto PIN por PIN se encontrará en el apéndice A

La programación iniciará con la activación de cada uno de los puertos que se utilizarán además de la naturaleza de PIN (Entrada o salida), a excepción del E pues éste ya se encontrara encendido por la activación el Master Clear del PIC.

Posteriormente se correrán subrutinas de activación de los periféricos a utilizar, tales como son: la lectura analógica-digital, puertos de lectura digital, interrupciones externas y por comunicación serial además los puertos CCP para las salidas PWM. Al terminar estas rutinas, el microcontrolador estará listo para su utilización ante la comunicación y el control, por ello de igual forma se activará una rutina de salida en impresión del display LCD.

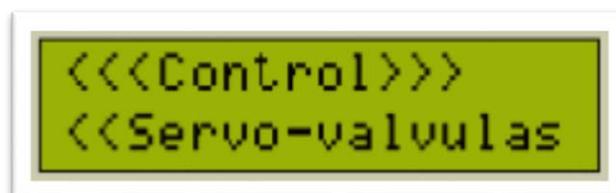


Ilustración 44 Bienvenida de LCD

Dando entrada a la rutina de calibración, ésta cuenta con la inicialización de cierre de cada válvula, esperando que se encuentre en un porcentaje bajo de apertura y la corriente de alimentación del motor sea alta, la cual es consecuencia del choque del obturador con la cavidad por donde pasa el vapor sobrecalentado, una vez calibradas las válvulas, la etapa de control solo esperara una posición de referencia que cree un error y por consecuencia el movimiento de las válvulas necesarias para mitigar este último.

La rutina de control tendrá instrucciones encargadas de medir y calcular las magnitudes de las variables de retroalimentación de la siguiente forma.

6.5.1. Posición

La posición estará en función del conteo de la interrupción externa, sólo se le hará un tratamiento para conocer el equivalente a grados y a su vez en radianes a fin de ser congruente con las unidades del modelado.

6.5.2. Velocidad

La velocidad sólo podrá conocerse hasta el segundo periodo de testeo, debido a la necesidad de una posición actual y una pasada. Para ello es necesario que al final del primer periodo la variable posición sea definida como posición pasada (k-1) y así en el siguiente ciclo tendremos una nueva actualización, es decir, la situación actual, por consiguiente si calculamos su diferencia, obtendremos un Δ de posición, dicha medición le trataremos sus unidades y dividiremos entre el tiempo de testeo a fin de obtener $\left[\frac{rad}{s}\right]$. El tiempo de testeo será calculado conociendo el número de instrucción en ensamblador, multiplicándolo por 1024 el ciclo máquina de microcontrolador.

$$T = \frac{1024(1810)}{20000000[Hz]} = 0.09267[s]$$

Además de sumarle el tiempo de las interrupciones externas realizadas por cada ciclo de testeo, sabiendo que cada interrupción externa tardará 0.00017 [s] nuestra ecuación final será:

$$Ts = 0.09267 + 0.000017(Ni)$$

Donde Ni es el número de interrupciones que han ocurrido desde el último ciclo.

6.5.3. Corriente

Para la corriente sólo se hará la lectura analógica-digital y su respectivo tratamiento para obtener la unidad deseada.

delay_us(5);

sensorAMP = read_adc();

delay_us(5);

*sensorAMPf = (((float)sensorAMP)/1024) * 5;*

$$corrientereal = 36.7 * (sensorAMPf/5) - 18.4;$$

Una vez medidas y calculadas las variables serán añadidas al vector de retroalimentación.

$$vectorx[0] = velocidad1;$$

$$vectorx[1] = corrientereal;$$

$$vectorx[2] = posicion1$$

Para finalmente aplicar la ley de control con sus ganancias respectivas del vector que tiene por nombre "vectork[i]".

$$ctrl1 = (valor_valvula1 * k0) - ((vectorx[0] * vectork[0]) + (vectorx[1] * vectork[1]) + (vectorx[2] * vectork[2]));$$

Una vez obtenido el error tendremos que escalarlo para que pueda ser compatible con la resolución del PWM (0-1024).

Como consecuencia de que el ángulo máximo posible de cada válvula es de 2π [rad] y un escalamiento previo de control debido a la variable k0 obtendremos un valor máximo de saturación:

$$CtrlMAX = 2\pi * 2.98 \approx 18.724$$

El cual dividiremos entre la resolución de puerto CCP para obtener la constante de escalamiento de voltaje de saturación PWM.

$$CEPWM = \frac{1024}{18.724} = 54.69$$

Este será multiplicado por el resultado de la ley de control para poder ser aplicado en el módulo PWM.

$$float control1 = ctrl1 * CEPWM;$$

6.5.4. Jerarquía de funcionamiento

El primer PIC contara con la información más rápidamente ya que es el elemento que recibirá inicialmente la comunicación de la posición referencia, es por ello que tendrá por directiva principal el control de las 2 primeras válvulas, las cuales tienen una mayor ponderación sobre el resultado final de las revoluciones obtenidas de la turbina. Este a su vez podrá controlar la activación del segundo PIC con ayuda de un pin digital, específicamente el pin 0 del puerto C, que se encontrará en alto cada vez que el error de posición de las primeras 2 válvulas sea igual a 0 o ya hubiera terminado su rutina de calibración.

El PIC número 2 estará a disposición del permiso del PIC principal es por ello que se encontrará constantemente testeando su pin 5 del puerto B, tanto en estado de reposo como durante proceso de control, con el fin de interrumpir su funcionamiento si es que existiera una nueva solicitud de posición a mitad del proceso o el sistema se encontrara en un estado de emergencia el cual extenderemos su funcionamiento en apartado de interrupción de emergencia.

6.5.5. Demultiplexores

El uso del demultiplexor es consecuencia de la existencia de únicamente 2 pines de salida PWM, siendo la mitad de las necesarias para el control de los dos motores por microcontrolador. Por ello se seleccionó el circuito integrado 74LS139 el cual cuenta con 2 demultiplexores con configuración 2 a 4 líneas, el cual funciona bajo la siguiente tabla de verdad.

Tabla 7 Tabla de verdad de demultiplexor

Entradas			Salidas			
Enable	Select		O0	O1	O2	O3
G	A0	A1				
H	X	X	H	H	H	H
L	L	L	L	H	H	H
L	L	H	H	L	H	H
L	H	L	H	H	L	H
L	H	H	H	H	H	L

Este demultiplexor necesita una alimentación de 5 [V], mientras que el umbral estado de alto y bajo será de 2[V] y 0.8[V], respectivamente, además de que la frecuencia máxima capaz de reproducir en sus salidas será 25[kHz] y finalmente su funcionamiento óptimo se encontrará entre las temperaturas 0-70[°C] cuestión que no nos preocupa pues este será elemento únicamente de control.

Las salidas PWM se conectarán a las entradas principales de cada uno de sus módulos de demultiplexion, es decir, en EA Y EB. Los pines A1, A2 de PIC fungirán como selectores de la salida en los pines A0B y A1B, estos funcionan en forma binaria teniendo los cuatro posibles estados, y de igual forma A3 y A4 harán lo propio con el segundo módulo (A1A Y A1B)

Las entradas del puente H designadas para el motor de la válvula 1 se encontrará conectado a los pines O1B y O1A, mientras que los correspondientes de la válvula 2 a O2B Y O2A. Dicha nomenclatura la podremos observar en le figura 45.

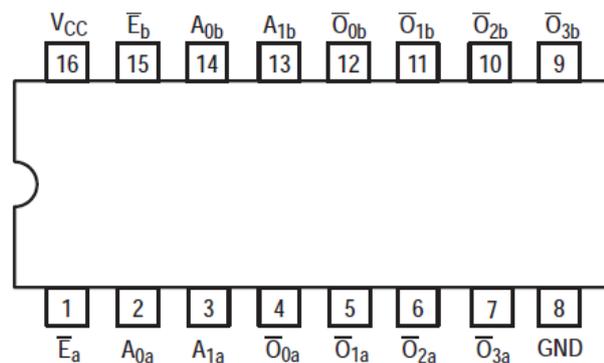


Ilustración 45 Configuración Demultiplexor

Los posibles estados lógicos de los pines de selección del PIC serán los siguientes:

- Estado 0000, el cual provocara que los PWM salgan por las salidas O0 mientras que los conectados a los motores se encontraran en un estado alto (5 V) teniendo como consecuencia que el motor este detenido.

- Estado 10 10, esta selección permitirá el control de los pines del motor 1
- Estado 01 01, hará lo propio con el motor 2.
- Estado 11 11, tendremos como consecuencia que le PWM salgan por los pines O4 que a igual forma que el estado 0000 detendrá los motores.

6.5.6. Etapa de potencia

La etapa de potencia estará encargada de 2 puentes H L298, los cuales pueden ser alimentados desde 3 [V] a 30 [V] y 4.5 [A] en forma continua, suficiente potencia para nuestro motor. Soporta un control de 3.5 [V] - 5 [V], es capaz de controlar 2 motores a la vez y cuenta con una potencia de consumo máxima de 20[W].

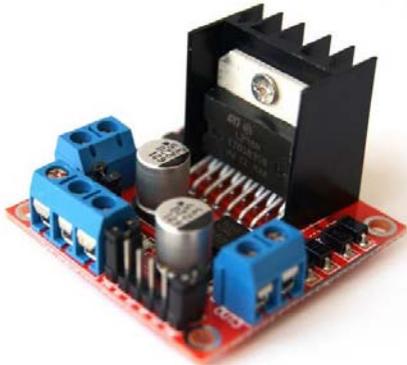


Ilustración 46 Puente H L298N

La lógica de funcionamiento es exactamente igual que cualquier puente H, duplicando los estados de las entradas en las salidas si es que los pines de **Enable** se encuentran en alto, solo que estas salidas se encontrarán con los niveles de voltaje y corriente eléctrica dispuestos por la alimentación externa del puente.

Su frecuencia de conmutación de las salidas es de 40 [KHz] y su operación óptima se encontrará entre las temperaturas -25 y 130 [°C], este modelo cuenta con un disipador que facilita dicho umbral de funcionamiento. Físicamente cuenta con una bornera triple de alimentación en las cuales se le proporcionan 5[V] para el control interno, voltaje para alimentación de los motores y una tierra.

La alimentación que le proporcionaremos a este puente será de 8 [V], mientras que la fuente es capaz de proveer hasta 30 [A]. Las salidas del puente se conectarán directamente a las polaridades de los motores.

A pesar de que el stall current del motor sea mayor de la máxima proporcionada por el puente H, dicha situación no nos preocupa debido a que la máxima potencia que proporciona el motor se encuentra a 3 [A], como lo muestra la figura 47, delimitando ésta como la corriente que pasara por el circuito a fin de asegurar el óptimo funcionamiento del puente H durante los ciclos de vida que asevera el fabricante.

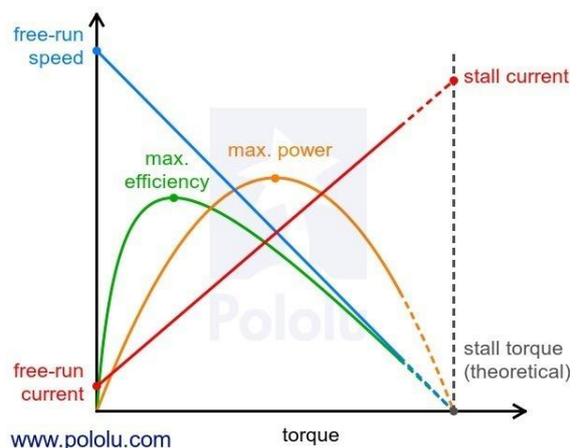


Ilustración 47 Curvas de motor CD

6.5.7. Paro de emergencia

Como consecuencia del objetivo del programa PAPIME es necesario poner elementos que se encuentren por encima de la gestión de la velocidad de la turbina, estos elementos serán los encargados de cuidar en primer instancia la integridad de alumnado y académicos, y en segunda de evitar condiciones límites que puedan afectar o mermar del óptimo funcionamiento de los elementos mecánicos y de la instrumentación inmiscuidos durante el ciclo.

Es por ello que se tienen 3 posibles situaciones de activación de emergencia. La primera de ellas es directamente con un botón de activación mecánica, la cual impulsará la tercera interrupción externa del PIC principal, que provocará el cierre de las primeras 2 válvulas y mediante comunicación serial enviará al segundo microcontrolador una posición referencia igual a 0, obteniendo el mismo resultado de cierre en las últimas 2 válvulas.

La segunda situación se activará si es que hay pérdida en la comunicación serial, avisando al usuario mediante los display LCD, con el fin de posibilitar el cierre manual del vapor para la turbina y mandando a cerrar las válvulas de igual modo que la activación pasada.

Por último, si existe algún problema durante la instrumentación, debido a alguna temperatura o presión demasiado elevada se le comunicara a la tarjeta de control provocando de nuevo el cierre de todas las válvulas.

6.6. Diseño PCB

6.6.1. Simulación circuito

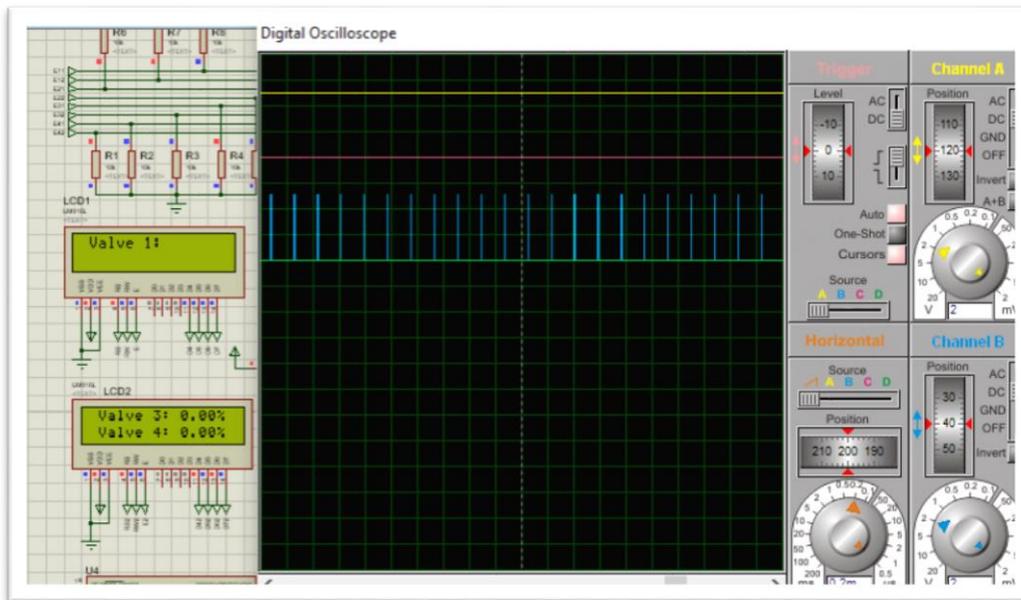


Ilustración 48 Osciloscopio de simulación eléctrica

Para diseño de PCB fueron necesarias pruebas iniciales con el fin de tener certeza que el circuito funcionaria, poniendo a prueba cada uno de sus elementos en forma independiente y finalmente todo el sistema funcionando al mismo tiempo. La primera prueba fue la simulación del circuito auxiliado un

software de simulación de circuitos en el cual se conectaron todos los elementos y se dieron algunas posiciones referencia para controlar los motores. Con el cual obtuvimos buenos resultados pues el Duty del PWM de la simulación se veía afectado conforme avanzaba la posición de motor, hasta llegar al punto de apagarse si es que el error era muy pequeño.

A pesar de que el programa no es capaz de simular la frecuencia real a la que fue programada el microcontrolador la simulación lograba posicionar cada una de las válvulas.

El cometido de la simulación se vio verificado con los siguientes aspectos:

1. Pantallas LCD lograron comunicar la posición actual de las válvulas.
2. Las interrupciones externas funcionaron, tanto como lectura de encoder como de paro de emergencia.
3. La lectura analógica del sensor se lograba sin ningún retraso.
4. La comunicación entre microcontroladores se lograba sin perdidas de información durante comunicación serial y las lecturas digitales.
5. Los Demultiplexores transmitían los PWM en forma secuencial.
6. Los led's testigo de las válvulas encendían solo cuando su válvula se encontraba en funcionamiento.

El diagrama del circuito completo de podrá encontrar en el apéndice B

6.6.2. Implementación en tarjeta de protoboard

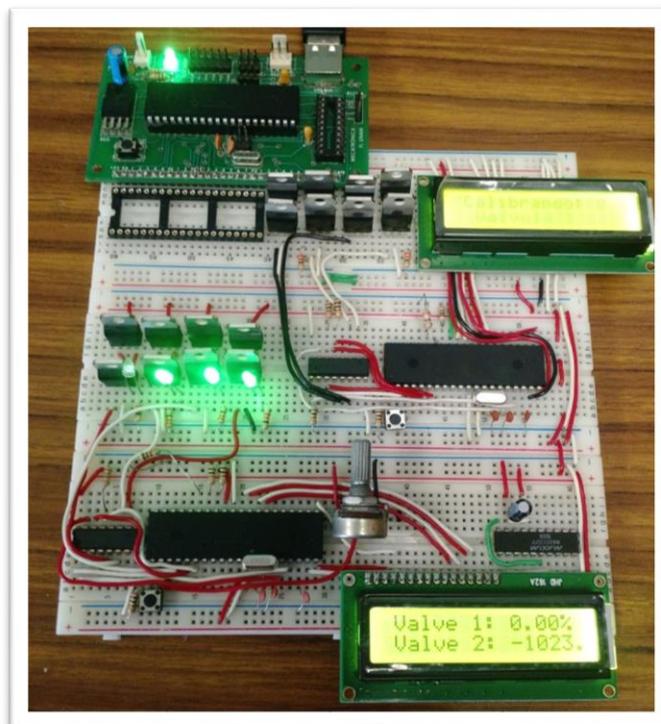


Ilustración 49 implementación de circuito en protoboard

Al igual que en la simulación, los elementos funcionaron adecuadamente, sólo que esta vez se pudieron obtener más conclusiones:

1. Los puentes H transmitían la potencia adecuada, con solo un poco de calentamiento.
2. No existían pérdidas de conteo por encoder, pues en esta ocasión si funcionaban los 20 [MHz] de los microcontroladores.
3. La reacción de los motores era instantánea y llegaban a la posición referencia a gran velocidad.
4. Con ayuda del sensor de corriente se pudo reconocer la corriente que pasaba por el motor tal y como lo muestra la ecuación proporcionada por el fabricante, además del reconocimiento de cuando la válvula se encontraba totalmente atascada, es decir, la posición 0.

Una vez verificado el funcionamiento de cada uno de los elementos del sistema podría pasarse a la construcción de la tarjeta en PCB.

6.6.3. Construcción

Para el diseño a construir se partió de la metodología de diseño de hardware Top-Down el cual consiste en captar la idea desde un alto nivel de abstracción, implementarla partiendo de las mismas e incrementar el nivel de detalle según sea necesario. El sistema inicial se va subdividiendo en módulos, estableciendo una jerarquía, cada módulo se subdivide cuantas veces sea necesario, hasta llegar a componentes primarios del diseño, obteniendo ventajas como:

Diseño modular. Pues ésta permite que las subdivisiones se realicen de forma que sean independientemente funcionales, lo cual facilita las posibles pruebas de funcionamiento durante las distintas etapas de construcción.

Diseño jerárquico. Éste entra en juego cuando la cantidad de elementos electrónicos es considerable, ya que este diseño se organiza con un resultado muy comprensible.

Al subdividir los módulos de control de las válvulas obtuve los siguientes resultados:

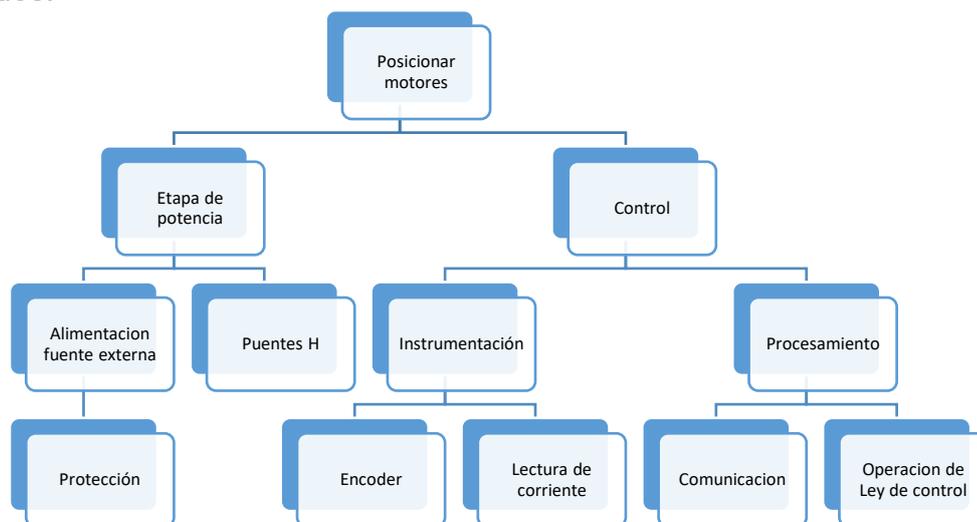


Ilustración 50 Mapa de sistema modular

Se nota que existen 2 grandes grupos, la etapa de potencia y el control, siendo que implementación en protoboard del circuito resulto bastante amplio,

cuestión que se denota al momento pensar en el espacio del gabinete lugar donde se encontraría ubicado y por cuestiones estéticas se tomó la decisión de separar estos módulos en dos placas de construcción independiente, pero interconectadas por headers, de forma que la etapa de potencias fungiera como un shield de todo el proceso de control.

Placa de control.

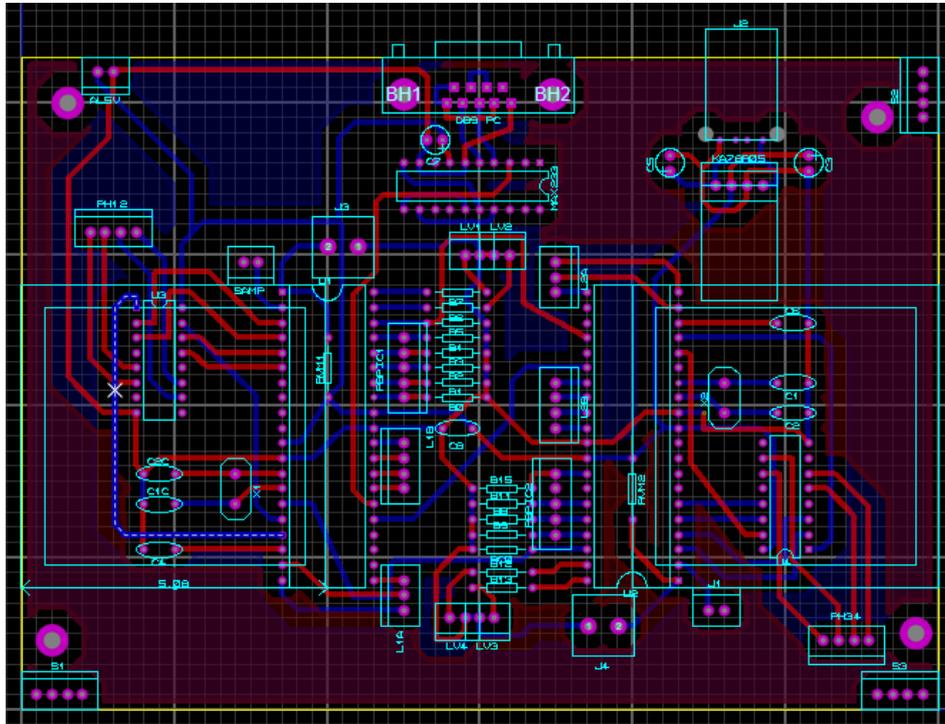


Ilustración 51 Cálculo de pistas para placa de control

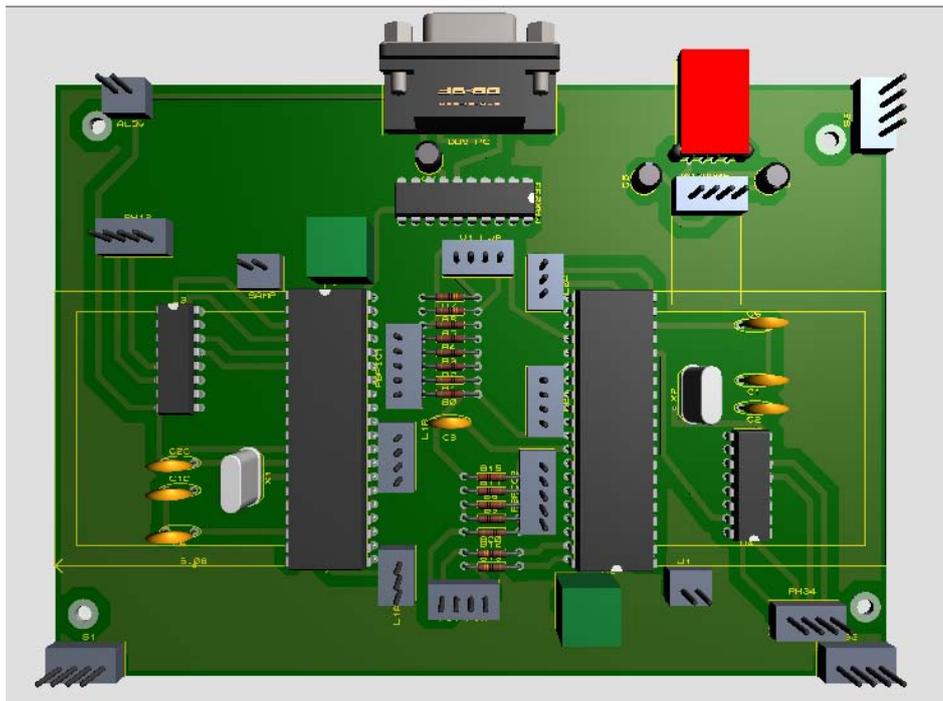


Ilustración 52 visualización 3D de placa de control

Esta placa contendrá 2 nodos de entrada:

1. Alimentación de 5[V] para los microcontroladores la cual por seguridad de regular con ayuda de un KA78R05.
2. DB9 hembra, para comunicación con PC

En la placa se encontrará:

1. Los 2 microcontroladores para el procesamiento.
2. Demultiplexores.
3. MAX233.

Placa de potencia.

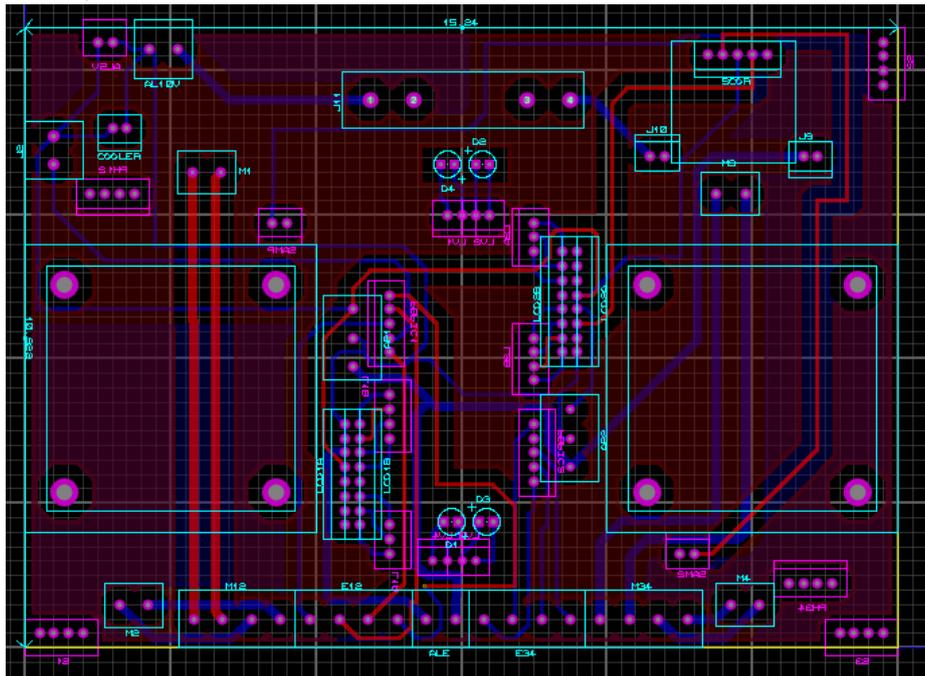


Ilustración 53 Cálculo de pistas para placa de potencia

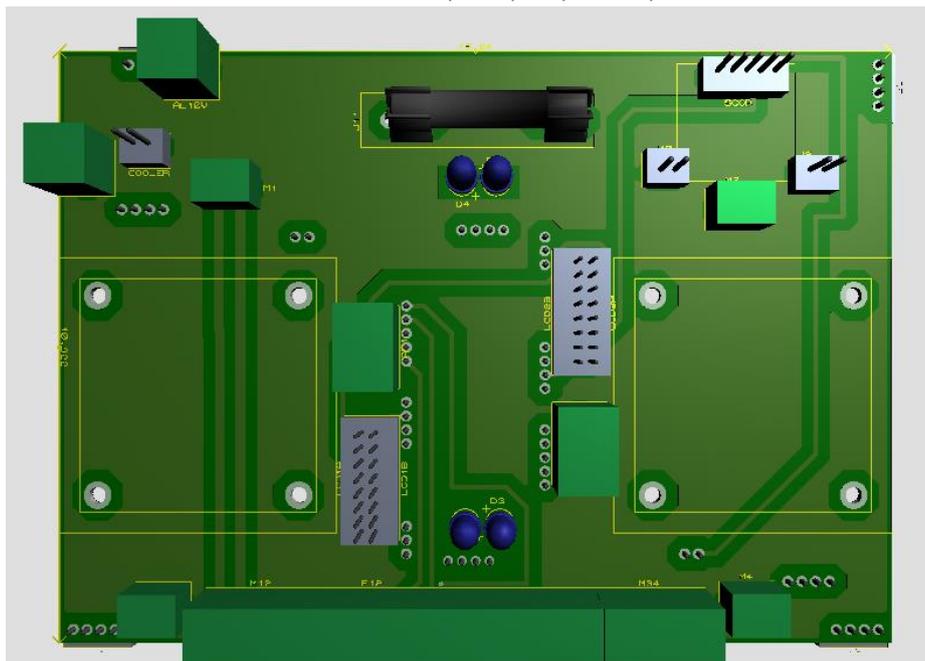


Ilustración 54 Visualización 3D de placa de potencia

Solo tendrá tres nodos de entrada:

1. Alimentación de potencia proveniente de la fuente.
2. Conexión para botón de paro de emergencia.
3. Borneras par conexión desde encoders.

Dentro ella contaremos con:

1. Puentes H (2).
2. Sensor de corriente.
3. Fusible.

Esta placa contara con todas las salidas del sistema

1. Alimentación de encoder.
2. Borneras para salidas de polaridades de los motores.
3. Conexión a display LCD.
4. Conexión de LED testigo de funcionamiento de válvulas.

Placa para pantalla LCD

Dicha placa sólo fungirá como conversión de terminales, debido a que las salidas de la placa de potencia cuentan con headers 8x2 y la entrada de las pantallas headers 16x1, además de tener manipulación más flexible conectando estas 2 con cable plano de 16 vías.

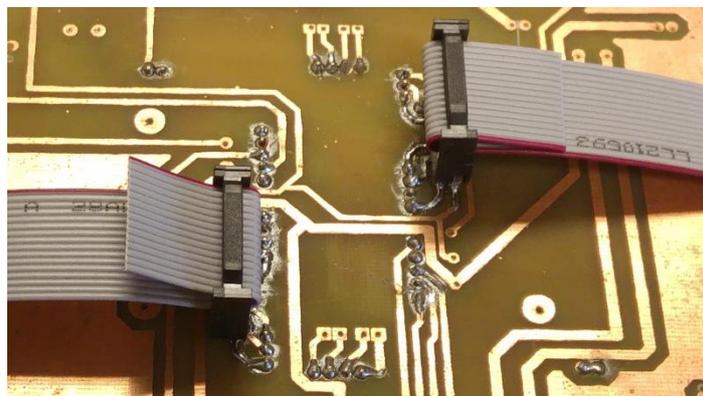


Ilustración 55 Conexión placa de control con cable plano

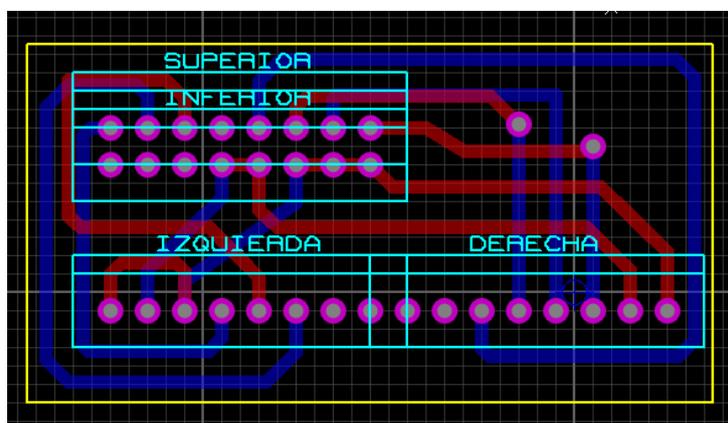


Ilustración 56 calculo pistas de placa de LCD

Conexión entre placas

Placa de control a placa potencia.

1. Salidas de conexión display LCD.
2. Salidas de Demultiplexores.
3. Alimentación 5[V].
4. Salidas de led's testigos.

Placa de potencia placa de control.

1. Señales de encoder.
2. Lectura de sensor de corriente.
3. Señal digital de paro de emergencia.

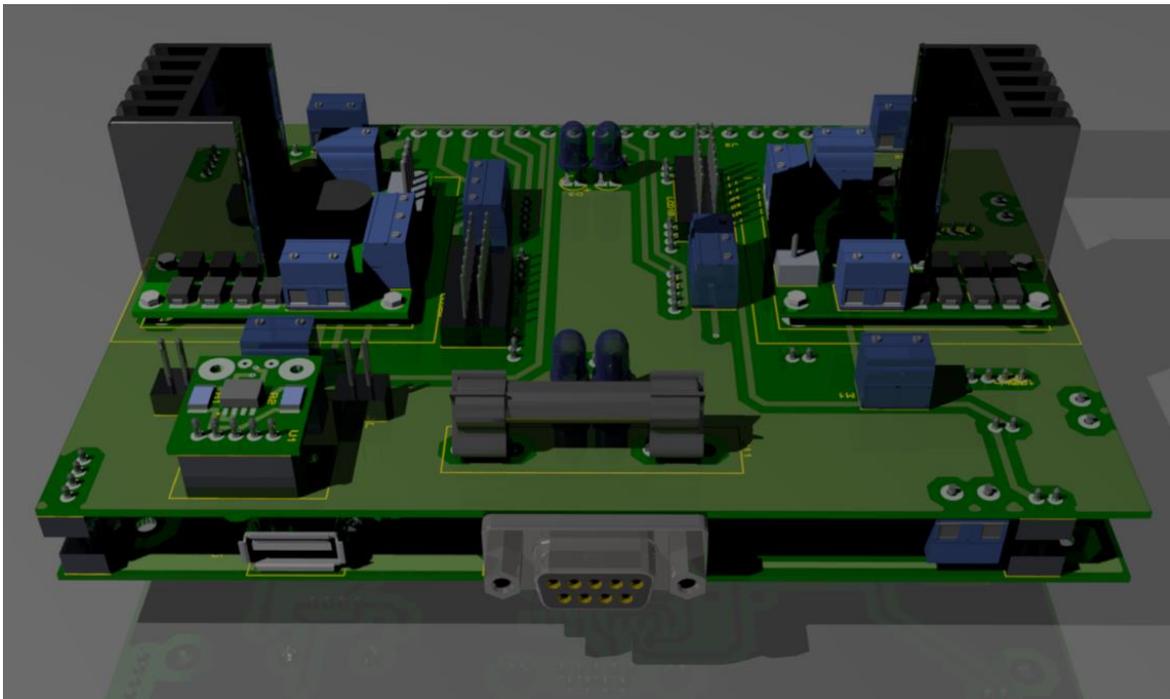


Ilustración 57 Render de acople de tarjetas

6.6.4. Consideraciones

Las pistas de la placa de control tendrán un tamaño de 43 th de grosor, tamaño suficiente, pues estas no se encontraran en peligro por llegar a punto de fusión por corrientes elevadas debido a que las entradas y salidas del microcontrolador proveerán un máximo de 40 [mA], pero tendrán que ser lo suficientemente grandes para no representar problemas en el momento de la construcción.

6.6.5. Cálculo de pistas para la placa de potencia

En el caso de esta placa se tuvo más cuidado pues las corrientes a las que se podría trabajar era mucho más elevadas, se sabe que a 3 [A] el motor entrega la máxima potencia posible, cuestión que se tomó en cuenta durante la programación limitándola como la corriente de saturación. Se decidió tener un factor de seguridad de 1.66 a la hora de diseñar el grosor de las pistas.

El cálculo se basa en la aplicación del estándar general para el diseño de circuitos impresos ANSI-IPC 2221 diseñado por "Association connecting electronic industries".

Para ello es necesario tener 3 datos fundamentales,

Corriente, Previamente calculada $i = 5 [A]$

Diferencial de temperatura, está en función de la temperatura ambiente del laboratorio (T_{amb}), es decir 25 [°C] y la temperatura máxima permitida (T_{max}).

Debido a que temperatura máxima que debería alcanzar el puente 10 es de 130, le dejaremos un margen de 30 [°C].

$$\Delta T = T_{max} - T_{amb}$$

$$\Delta T = 75 [^{\circ}C]$$

Grosor de pista, la placa que usamos es de 1 [oz/ft²] o 35 [μm] de grosos.

Con ello ya podremos calcular

$$Area = \left[\frac{i}{k1 * \Delta T^{k2}} \right]^{\frac{1}{k3}}$$

Donde

$$K1 = 0.015 \quad K2 = 0.5453 \quad K3 = 0.7349$$

Estas constantes son para pistas internas.

Por lo tanto, tendremos

$$Area = \left[\frac{5}{0.015 * 75^{0.5453}} \right]^{\frac{1}{0.7349}}$$

$$Area \approx 96.46$$

$$Ancho = \frac{Area}{L * 1.378}$$

$$Ancho = \frac{96.46}{1 * 1.378}$$

$$Ancho \approx 70 \text{ th}$$

Las placas fueron construidas con placas fenólicas cubiertas con 32 [μm] de cobre a doble cara. Mediante ataque químico con cloruro férrico.

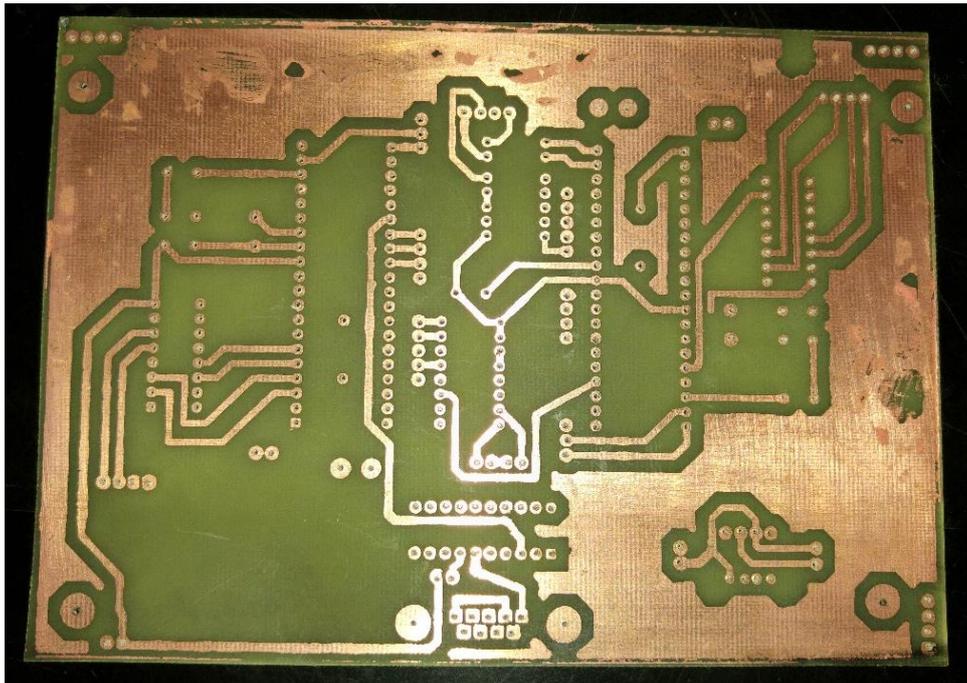


Ilustración 58 Superficie interior de placa de control

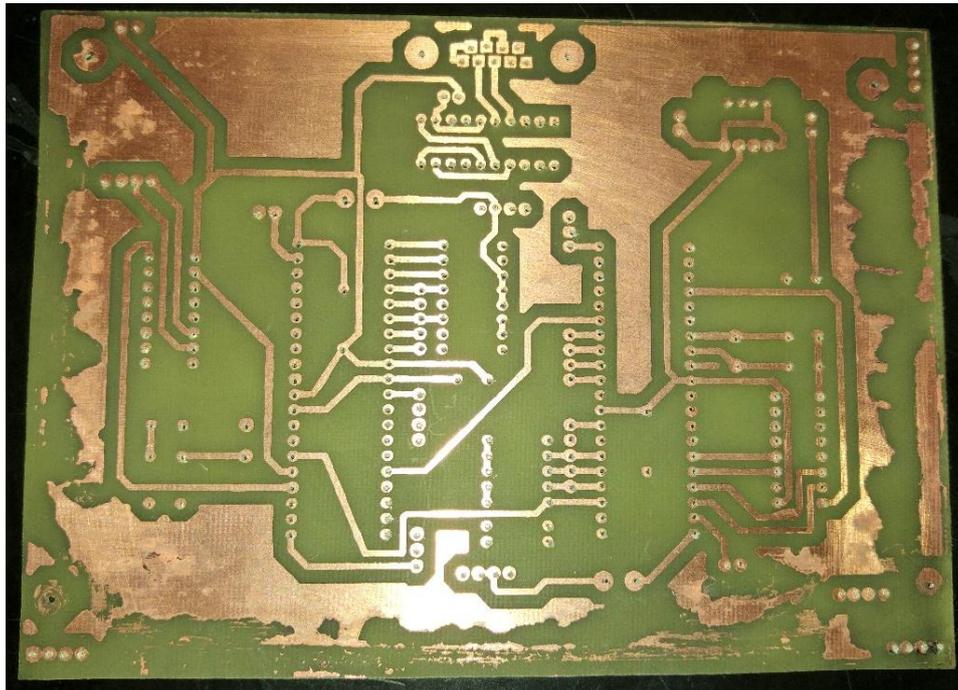


Ilustración 59 Superficie superior de placa de control

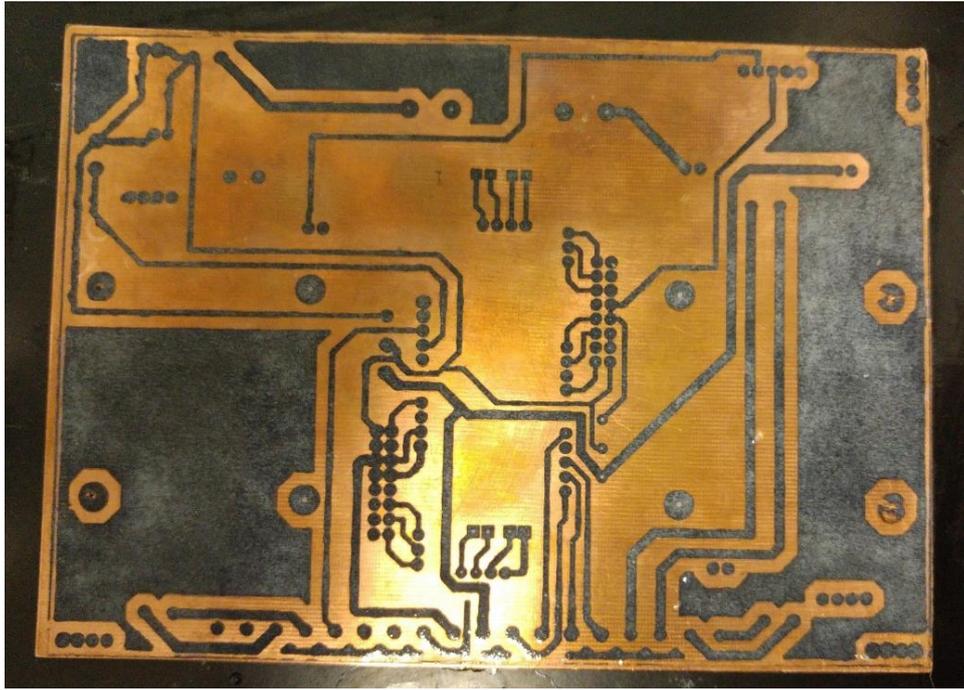


Ilustración 60 Superficie superior de placa de potencia

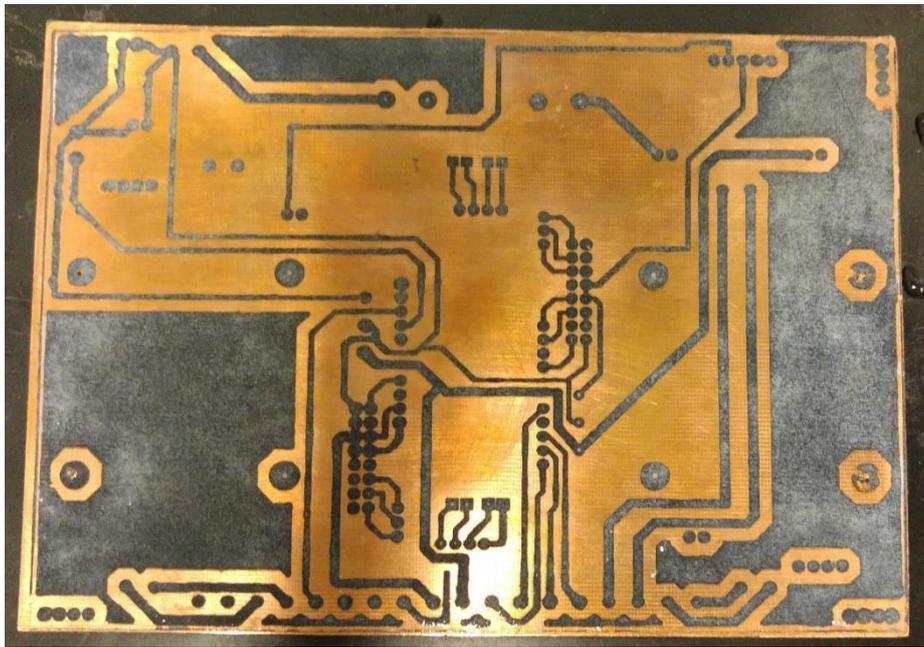


Ilustración 61 Superficie inferior de placa de potencia

6.6.6. Selección de fusible

Para efectuar el cálculo de las protecciones se utiliza la corriente nominal, la cual es proporcionada por las tablas del proveedor y para las cuales se aplican las siguientes ecuaciones:

$$I_F = K * I_N$$

I_F es la corriente de protección de los fusibles

K es la constante de protección, la cual estará normalmente en el rango de [1.7 – 2.1]

I_N es la corriente nominal del fusible

Este fusible debe tener alta velocidad de fusión a fin de tener una gran protección para los elementos de la tarjeta de control, pues estos merman su funcionamiento a altas temperaturas, es por ello que utilizaremos un fusible miniatura de cristal.

La corriente a la que se encontrará en forma nominal la tarjeta es de 3 [A] según el proveedor del motor, tomaremos como constante de protección un valor de 2 con lo cual obtendremos:

$$I_F = 1.7 * 3[A] = 5.1[A]$$

Los fusibles comerciales más cercanos son los de 5[A] y 6.3[A], debido a que una de las condiciones de selección nos pide lo siguiente;

$$I_C \leq I_F \leq I_{MAXADMS}$$

Esto quiere decir que la corriente de protección debe ser mayor o igual a la corriente calculada y a su vez menor a la corriente máxima admitida por el circuito a proteger.

En conclusión, se utilizará un fusible miniatura de cristal de 5 [A].

6.6.7. Tarjetas finales

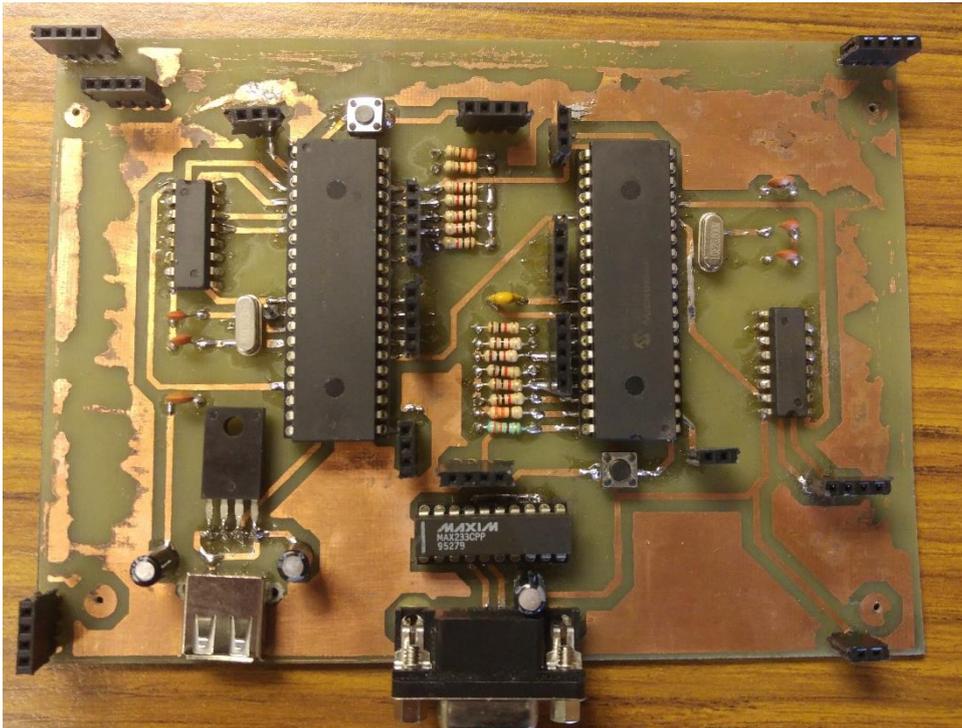


Ilustración 62 placa de control final

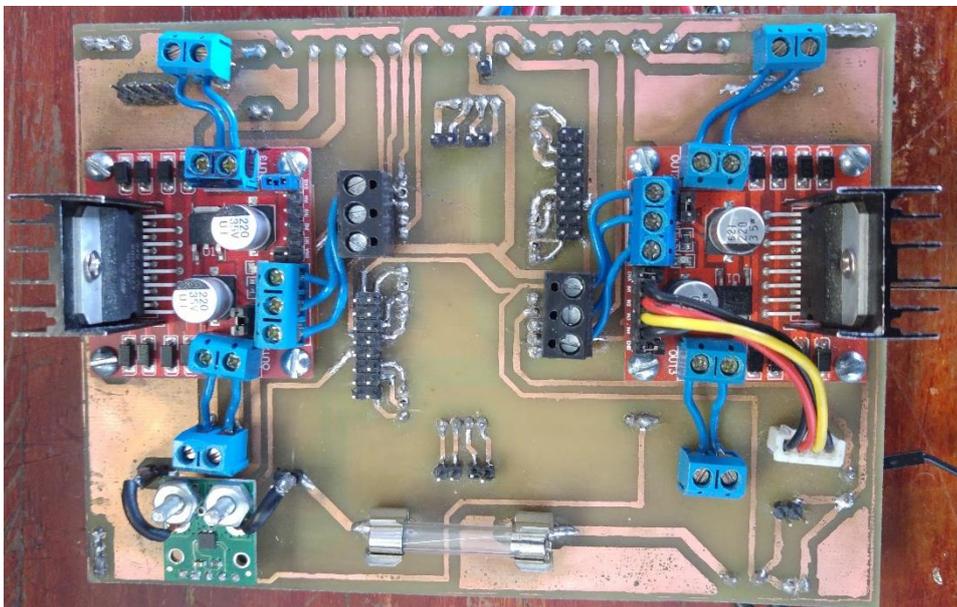


Ilustración 63 placa potencia final

7. Interfaz LabVIEW-PIC

7.1. Comunicación PC-PIC

El programa creado en LabVIEW tiene por comisión el envío de la posición referencia de las válvulas en función de las revoluciones requeridas por el usuario, para lograrlo, se requirieron los siguientes pasos.

Inicialmente es necesario activar la comunicación con el fin de poder definir por donde enviaremos la información, para ello tenemos que inicializarla y configurar ciertos aspectos indispensables de la función "VISA configure Serial Port":

- Anadir un control para la selección del puerto por donde se enviará la información.
- Configurar la velocidad de baudios igual a la del microcontrolador (9600).
- Definir el tamaño de la palabra enviada (8 bits).
- Desactivación del bit de paridad.
- Añadir un indicador de error

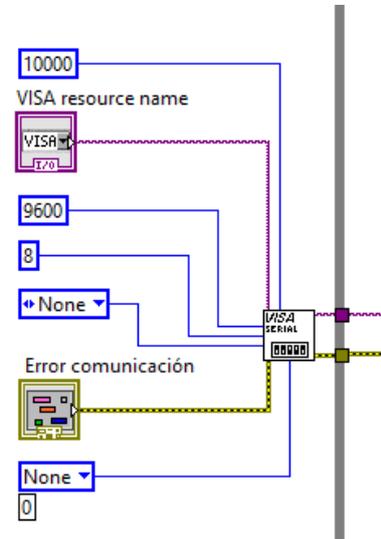


Ilustración 64 apertura comunicación

Una vez hecho esto se conectará a la función "VISA write", esta función es la encargada de enviar los datos al puerto, solo se tendrá que conectar el arreglo de strings asociada al número de referencia carácter por carácter. Esta se encontrará dentro de un ciclo "White loop" para poder recrear las funciones en forma iterativa con una frecuencia de 1[kHz].

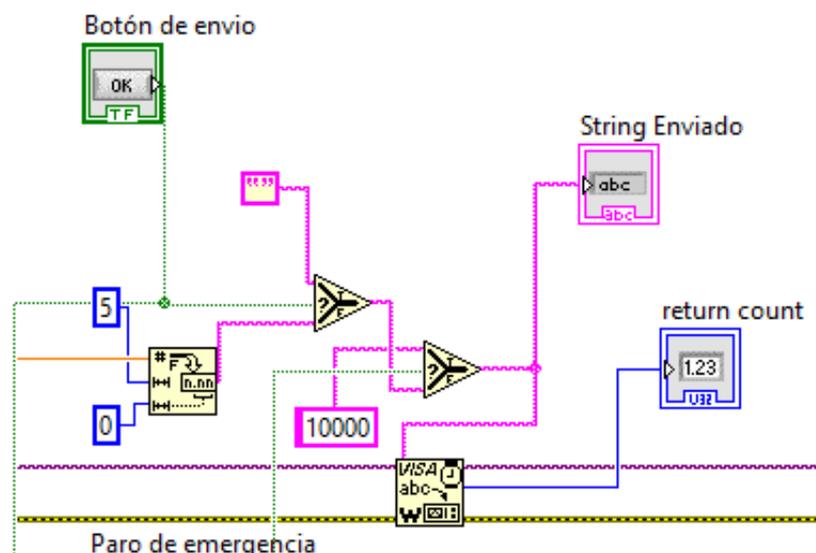


Ilustración 65 escritura en puerto

Para ello es necesario tratar el valor, debido a que las operaciones predecesoras del envío arrojan un entero doble, por ello usaremos la función

“Number To Fractional String” la cual como dice su nombre convertirá un número a string pero esta vez en forma de arreglo. Antes de poder enviarla es necesario canalizar el momento en que se enviará, para ello requeriremos de la función “Select” la cual será controlada por un botón booleano el cual enviará el valor referencia si se encuentra presionado o de lo contrario se enviará un valor vacío.

En serie encontraremos otro “select” controlado por el botón de cierre de emergencia el cual funcionará con lógica inversa al botón pasado, enviando la señal de usuario, si es que no se encuentra presionado o de lo contrario enviar un 10000 el cual provocará el cierre de todas las válvulas.

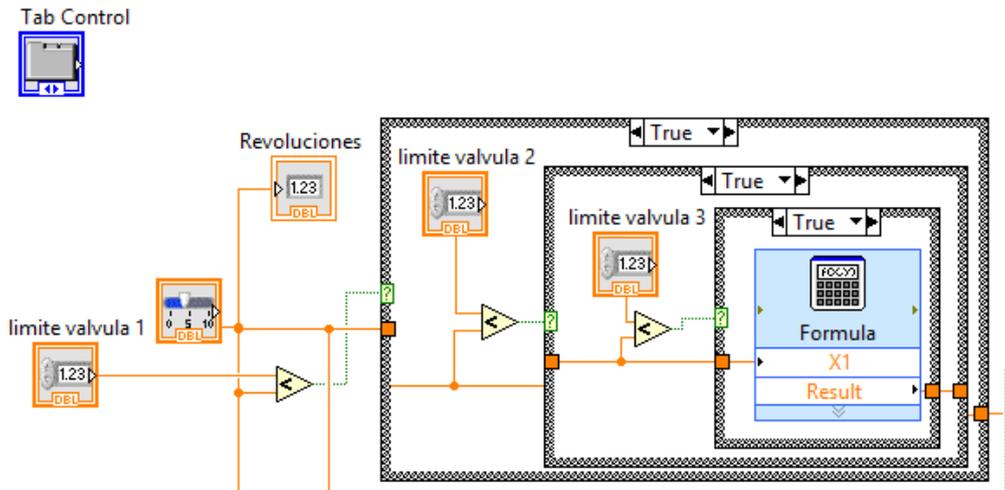


Ilustración 66 escalamiento de revoluciones a conteo de encoder

Una vez hecho esto nos dispondremos a cerrar comunicación conectando el “write” a la función “VISA close” tanto del nodo de control de recursos, como el error. A la función “Close” sólo conectaremos un indicador de error. Al igual que la función de configuración se encontrará fuera del ciclo “while”.

7.2. Interfaz y variables de control

El usuario tendrá una interface donde podrá controlar las revoluciones que desee que se vean reflejadas en la turbina, esto con ayuda de una variable de control, dicha variable se tendrá que escalar del número de revoluciones al número de conteos del encoder del motor. Debido a ello se utilizará 4 funciones “formula” que se encontraran en 3 “case” anidados a fin de identificar cuantas válvulas se encontrarán en funcionamiento, como consecuencia del distinto comportamiento final de las revoluciones al movimiento particular de cada válvula, definiendo una distinta ecuación por válvula, dichas ecuaciones se reconocerán mediante el análisis de su comportamiento con pruebas en sitio.

Nuestra interface quedará con la siguiente presentación:

Como es evidente tendremos 2 “Tap control”, el primero para el control de visualización de las revoluciones deseadas, las revoluciones reales, el error producido y las botoneras de control del usuario, así como la lista de selección para poder ubicar el puerto correspondiente al cable de comunicación serial.

El segundo “tap” únicamente tendrá funciones informativas ya que sólo cuenta con los indicadores de errores y la configuración de las revoluciones límite de cada válvula.

Como podemos observar en la figura 67 la interface contará con 4 elementos con los cuales el usuario puede interactuar en forma directa:

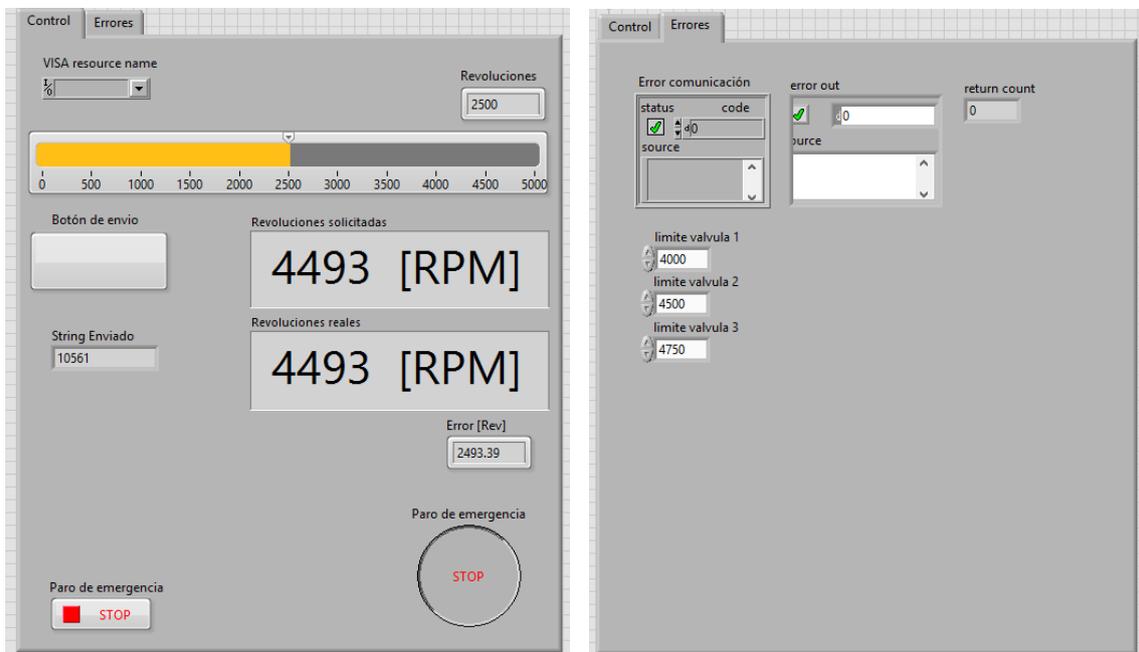


Ilustración 67 Interfaz de usuario

1. Barra de revoluciones: cuenta con un indicador que se puede sostener hasta llevarlo a las revoluciones requeridas, el número de revoluciones también se muestra en un marcador que está encima de él.
2. Botón de envío: botón booleano que sólo envía un pulso, encargado de activar el paso de arreglo de caracteres hacia el puerto.
3. Botón de stop: funciona como paro de exclusivamente el programa.
4. Botón paro de emergencia: botón booleano redondo, su activación implicaría el cierre de todas las válvulas.

8. Pruebas y validación

8.1. Laboratorio

8.1.1. Repetición

Para las pruebas de laboratorio se utilizó el programa de comunicación con algunas alteraciones, como lo es la eliminación de la selección de la posición referencia prevista para el usuario, sustituyendo a este por una simulación de señal cuadrada con una frecuencia de 0.3 [Hz] y una amplitud de 4000 provocando el cierre y apertura total de la válvula, además de un conteo de las

iteraciones cierre-apertura limitando el programa a 2000 ciclos dando por terminado el programa cuando a variable de conteo llegue a saturación.

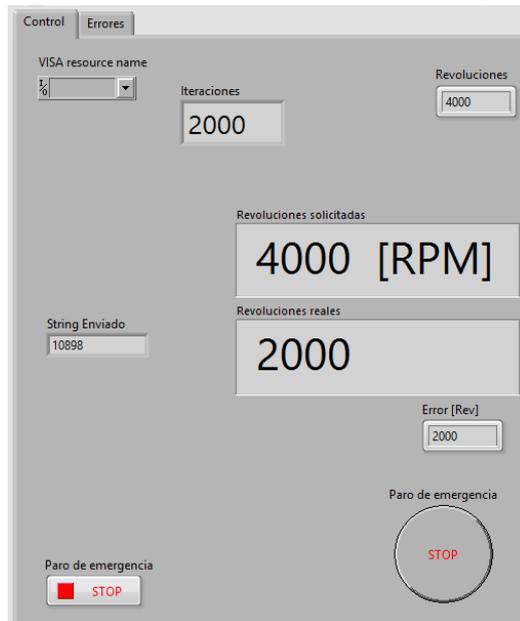


Ilustración 68 Programa para pruebas

Al finalizar el programa no se encontró ningún inconveniente en cada una de las iteraciones del motor, las pantallas LCD mostraron en todo momento la posición real de la válvula, el sensor de corriente marco cada uno de los puntos de la carrera final, aunque se provocó un sobrecalentamiento de los puentes H, situación esperada debido a la hora con 45 minutos que tardó el proceso en concluir.

8.1.2. Posicionamiento

Para las pruebas de posicionamiento se adquirieron los datos de conteo de los encoder directamente de microcontrolador almacenado el valor en un arreglo durante cada ciclo de testeo, obteniendo los siguientes datos:

La primera solicitud fue de 670

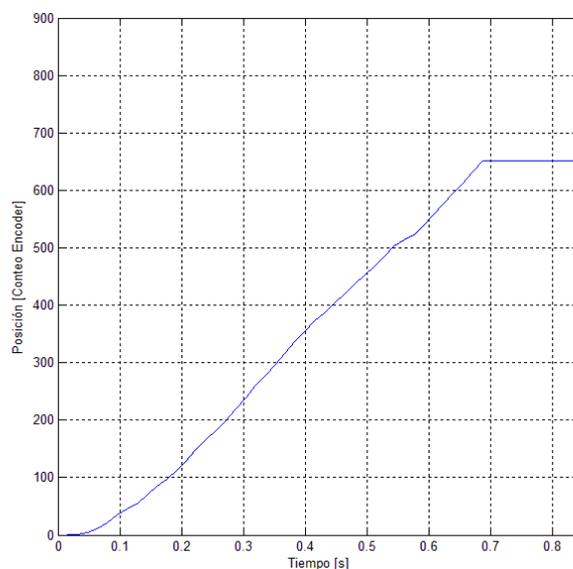


Ilustración 69 Comportamiento de posición de prueba 1

La posición a la que logró llegar el control fue a 652 obteniendo un error de 2.02%, de la gráfica podemos observar que el comportamiento es prácticamente idéntico al simulado con elementos de saturación, a diferencia del tiempo en estado transitorio disminuyó como consecuencia de aumento de la alimentación del puente H pasando de 6[V] a 8[V].

La segunda solicitud fue 763

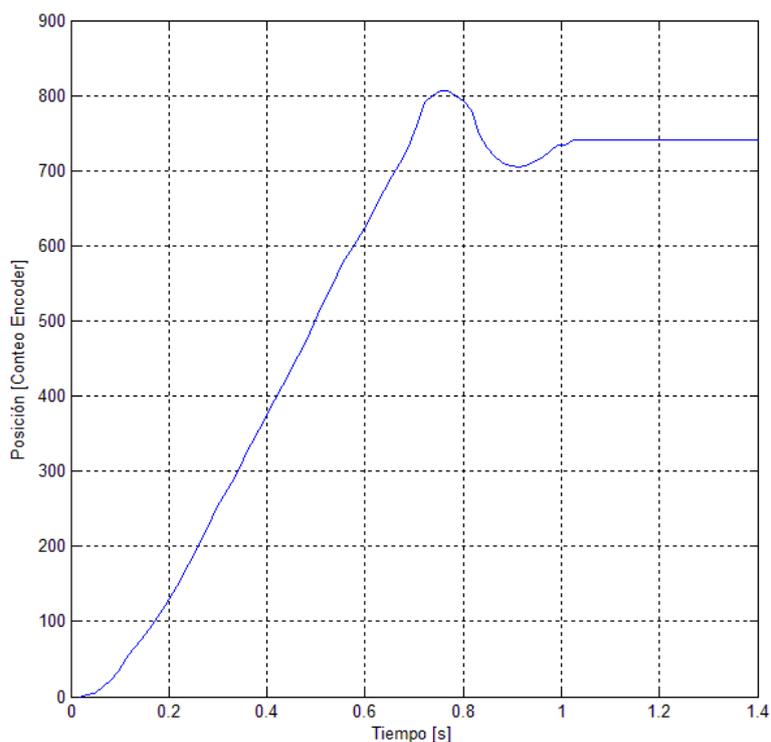


Ilustración 70 comportamiento de posición de prueba 2

Al igual que la prueba anterior el tiempo disminuyó, aunque logró ser un poco más largo debido a que la magnitud de solicitud fue mayor provocando 2 oscilaciones llegando a un punto estable un poco después del segundo de acción del control. La posición adquirida fue 770 provocando un error 2.67%.

9. Modificaciones de la válvula

Durante las primeras pruebas en sitio se tuvieron algunos inconvenientes debido a que los engranes de la caja reductora del motor no soportaban los esfuerzos provocados por rutinas de calibración, fragmentándose o perdiendo gran cantidad de dientes, debido a ello se tomó la decisión de cambiar el motor.



Ilustración 71 fotografía de engranes dañados

Para ello se seleccionó un motor con caja reductora planetaria, y con ello evitar algunos fenómenos de torsión, específicamente el motor de la marca Lynxmotion con las siguientes especificaciones:

Motor

- Velocidad (Sin carga): 3000rpm
- Corriente (Sin carga): 0.18A
- Velocidad (Máxima eficiencia): 2370rpm
- Corriente (Máxima eficiencia): 0.67A
- Par (Máxima eficiencia): 177 g-cm / 2.46 oz-in
- Potencia (Máxima eficiencia): 4.3W
- Eficiencia (Max): 53.4%
- Corriente (Stall): 2.5A
- Par (stall): 838g-cm / 11.64 oz-in

Caja reductora

- Razón de engranaje: 264:1
- Engranes: Metal
- Velocidad (Sin carga): 10.5rpm
- Corriente (Sin carga): 0.22A
- Velocidad (Máxima eficiencia): 10rpm
- Corriente (Máxima eficiencia): 0.74A
- Par (Máxima eficiencia): 29970 g-cm / 416.2 oz-in
- Potencia (Máxima eficiencia): 2.49W
- Eficiencia (Máxima): 28%
- Corriente (Stall): 2.5 A
- Par (stall): 36000g-cm / 499.95 oz-in

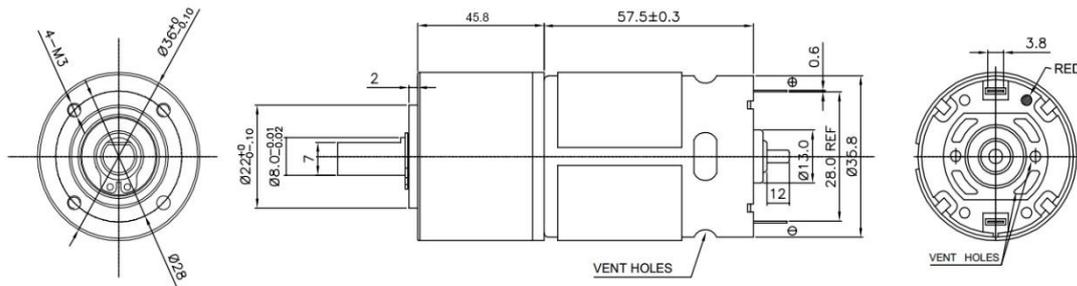


Ilustración 72 dimensiones de nuevo motor

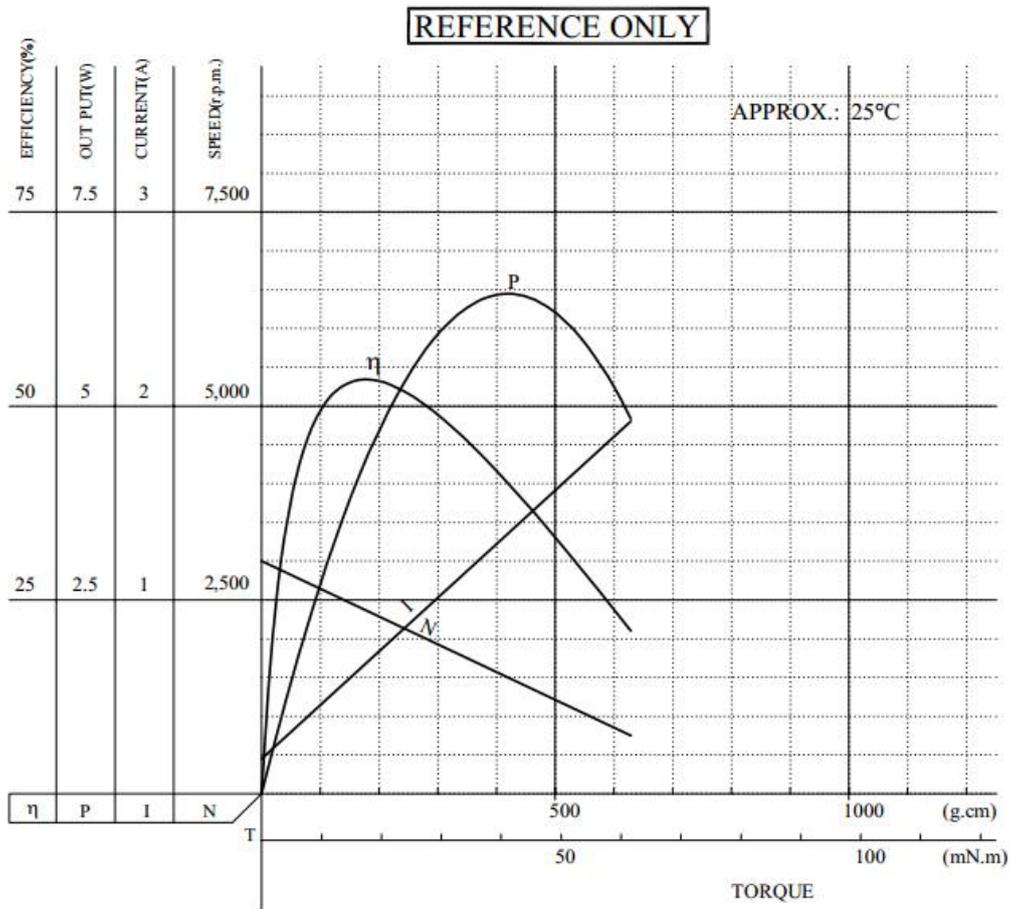
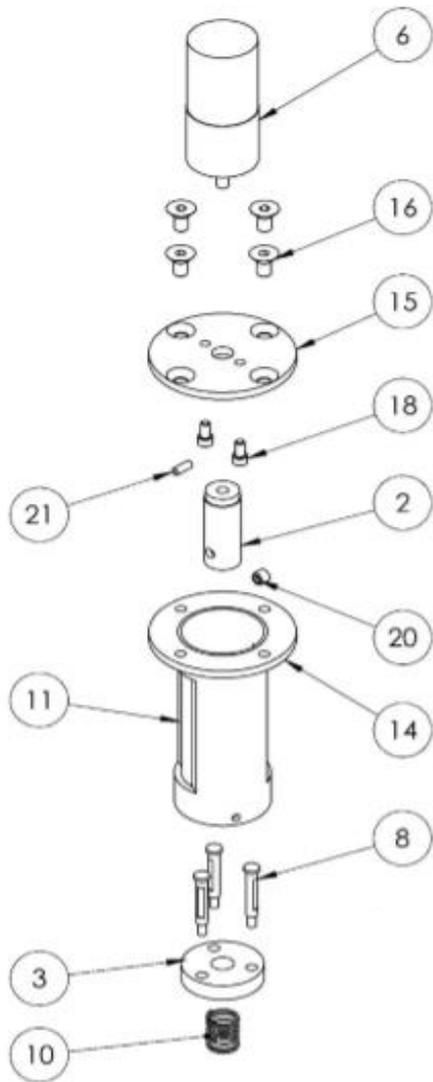


Ilustración 73 curvas de comportamiento de motor nuevo

Además de proporcionar un mayor torque, el motor cuenta con una menor velocidad angular, provocando que los dientes de los engranes estén sometidos a esfuerzos por impacto con una menor magnitud.

Como consecuencia del cambio de motor y las distintas dimensiones del rotor de la caja, además de las ubicaciones y cantidad de los tronillos de sujeción, se tendrán que modificar las bridas que unen el soporte de la válvula con el motor de corriente directa, además de redimensionar un nuevo cople que encaje con las nuevas características.

Los elementos a redimensionar son las piezas número 2, 14 y 15 que podemos observar en la figura 74.



La pieza 2 (Cople) aumentará su radio exterior en 1.5 [mm] y el diámetro de la cilindrada interna destinada para el motor aumentará en 2 milímetros, además de extender en 15 [mm] su longitud. Debido a que el rotor D pasará de 6 a 8 [mm] de diámetro máximo y tendrá un largo de 25 [mm].

La pieza 14 (brida de soporte) aumentará de diámetro externo de 50.8 a 56 [mm] y aumentará de espesor hasta 8.175 [mm], la reubicación de los barrenos consistirá en aumentar 2.68 [mm] el radio de su círculo de referencia para los centros de estos, además de mantener la rosca para los tornillos de sujeción y el diámetro interno de la pieza se mantendrá para poder ensamblar de nuevo con la pieza 11.

La pieza 15 (brida de motor) modificará las posiciones de los barrenos externos análogamente con la brida pasada, estas dos mantendrán los mismos tornillos Allen de cabeza plana 3/16-24 UNC. Los barrenos internos pasarán de 2 a 4 y su ubicación tendrá que coincidir con las especificaciones del motor. Su espesor también aumentará a 8.175 [mm], esto debido al aumento del largo del rotor.

Ilustración 74 Primer diseño de válvula

La pieza número 10 será sustituida por un elemento rígido, como consecuencia del cambio de potencia, la velocidad a la que el motor funciona y una pequeña variación el ajuste de los elementos, el resorte sucumbe, debido a que su constante no es suficiente para contrarrestar ente el movimiento del motor y tiende normalmente a comprimirse, evitando un comportamiento lineal entre rotación del motor y el avance del obturador.

Las dimensiones y especificaciones técnicas de cada uno de los elementos redimensionados se podrán encontrar en el apéndice D.

Como consecuencia de las modificaciones podemos observar los resultados en la figura 75.



Ilustración 75 Válvula modificada

Evidentemente la servo válvula aumentó sus dimensiones, cuestión que no preocupa, pues el espacio de trabajo es suficientemente amplio.

10. Pruebas en sitio

Para las pruebas en sitio se puso en funcionamiento el ciclo de Rankine, montando antes la válvula en uno de los 4 espacios para las válvulas de control de revoluciones.



Ilustración 76 instalación de válvula

Y se abrió a distintos porcentajes la válvula obteniendo los siguientes datos:

Apertura	Revoluciones [RPM]
10,20%	190
10,65%	366
11,38%	648
12,43%	752
13,15%	820
14,79%	1013
16,12%	1150

Tabla 8 Resultados de prueba en sitio

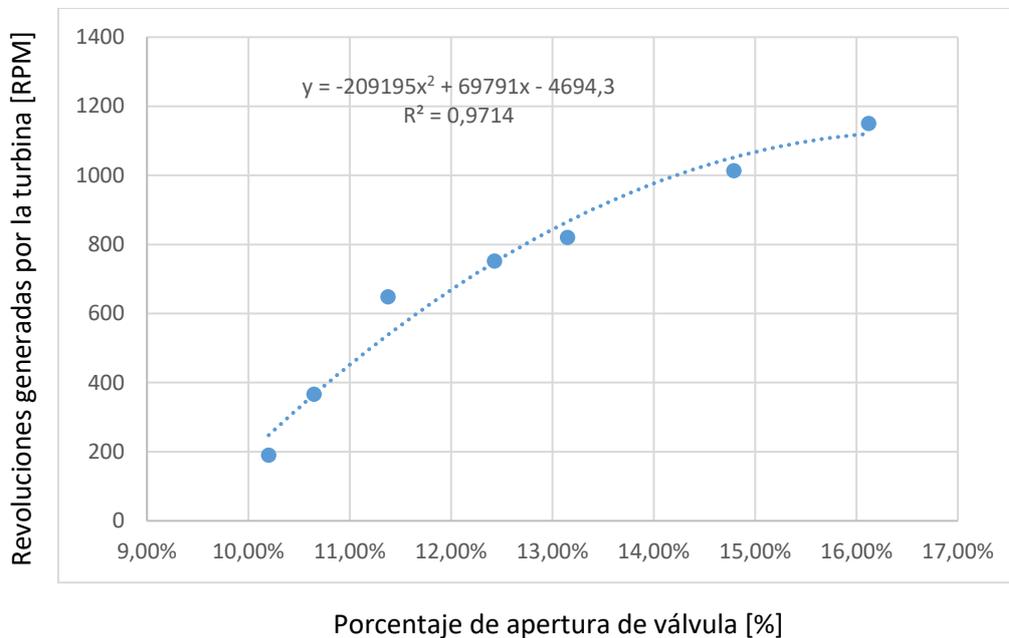


Ilustración 77 curva de ajuste polinomial

Obteniendo como consecuencia el comportamiento de la apertura de la válvula y respuesta en revoluciones, y mediante un ajuste se obtuvo la ecuación polinomial de segundo grado, con un factor de correlación de 0.9714, suficiente elevado para considerarse bueno.

Esta ecuación se considerará para incorporarse a la interface de LabVIEW y tener con ello el control completo.

$$Rv = -209195 Pa^2 + 69791 Pa - 4694.3$$

Donde **Rv** so la resoluciones deseadas y **Pa** es el porcentaje de apertura de la válvula.

El programa que fue implementado para las pruebas en sitio tenía dispuesto como porcentaje máximo de apertura de la válvula a 4 vueltas, como consecuencia de las pruebas se puede deducir que una sola vuelta será suficiente para revolucionar la turbina, manteniendo las condiciones de seguridad.

11. Conclusiones

La tarjeta resulto tener el desempeño deseado, teniendo un máximo de 2% de error, cumpliendo las necesidades del laboratorio al tener el control de las revoluciones de la

turbina si mantenemos la presión del sobre calentador constante.

A pesar de no contar con la construcción de todos los elementos de control, es decir, la manufactura de las 4 válvulas para el cual fue diseñada la tarjeta, fue suficiente para poder gobernar las revoluciones de la turbina, teniendo como único inconveniente limitar la carrera de acción de la válvula manufacturada a solo una vuelta, obteniendo como consecuencia un decaimiento en la resolución de control al intentar revolucionar la turbina entre 1500 y 3000 [RPM], pues el funcionamiento de este intervalo está controlado por el último 25% de la primer vuelta, teniendo las 4 válvulas podríamos tener como modelo final un comportamiento más lineal y no una función cuadrática como la que pudimos observar en la ilustración 75.

La única variación que pudimos observar después de las modificaciones de la válvula fue el tiempo que tarda en llegar a la posición deseada al pasar de un motor de 75 a 10 [RPM], bajo el voltaje nominal de cada motor, esta disminución de velocidad angular sumado a la rutina de calibración continua provoca que el tiempo entre dos distintas peticiones de posición sea máximo de 13 segundos, cuestión que provoca que la turbina se desacelere solo un poco, en ningún momento hay un cambio brusco o un paro total. En cuanto al error en estado estable se mantuvo después de una sintonización de las constantes de retroalimentación ($K[1X3]$), pues el umbral de no funcionamiento fue proporcional al aumento del voltaje nominal, esto después de algunas modificaciones en el código debido al cambio del número de pasos proporcionados por el nuevo encoder.

Eliminar el resorte del sistema anti backlash pareciera ser un paso atrás en cuanto a la exactitud del sistema, este problema es contrarrestado por la calibración continua programada, provocando que a cada solicitud se mande siempre cerrar, es decir, la dirección de acción de la válvula siempre es desde el punto 0, teniendo un semi-sistema anti backlash vía software.

Cabe señalar que el sistema puede ser mejorado en distintas áreas, la primera de ellas es la comunicación, debido a que este protocolo no es del todo estable, durante las pruebas, con duración de una práctica, en algunas ocasiones el puerto perdía sincronización en promedio una vez y era necesario reiniciar los microcontroladores, éste problema puede resolverse añadiendo un

PIC exclusivo para comunicación y que este tuviera una comunicación USB nativa. Además de mejorar los métodos de construcción de la tarjeta evitando la probabilidad de existencia de cualquier tipo de falso.

La construcción de la tarjeta tuvo un costo de \$1,831.22 únicamente de los elementos, los costos de manufactura fueron nulos debido a que se desarrollaron dentro el club de mecatrónica de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, aunque la cotización de la construcción de las tarjetas fue de \$760 el cual nos arrojaría un precio total de \$2,591.22, sin tomar en cuenta costos de diseñador y fuerza humana.

Durante pruebas en sitio pudimos observar que el sistema es amigable y sencillo de manejar, sólo se requieren seleccionar las revoluciones deseadas y dar clic en el botón de acción, aspecto indispensable para un mejor desarrollo de las prácticas de generación de termo energía, provocando que los alumnos se preocupen más por entender el funcionamiento del ciclo y no por fallas, mediciones o el estado de una válvula.

Es evidente que el desarrollo de tecnología, en específico de sistemas de control, puede ser una oportunidad de desarrollo, en la que instituciones como la UNAM puede incursionar evitando importaciones que muchas veces son innecesariamente costosas y apoyando ingenio nacional.

12. Bibliografía

[1] Katsuhiko Ogata, Ingeniería de Control Moderna

[2] Velazquez Garibay R. A. Tesis de licenciatura “Diseño de servo válvula para turbina Coppus”

[3] Schweers, Robert Joachim 2002, Tesis de licenciatura, “Descripción en VHDL de arquitecturas para implementar el algoritmo CORDIC”

[4] www.ipc.org recuperado el 2 de abril de 2016

<http://www.ipc.org/ContentPage.aspx?Pageid=IPC-2221B-Gerber-Coupon-Generator>

	Universidad Nacional Autónoma de México		Apéndice A	
	Facultad de Ingeniería			
	Descripción:	Configuraciones de pines para microcontroladores		
	Numero de plano	1		

PUERTO A	Nombre	Configuración	Función
PIN 0	RA0	AN0	LECTURA ANALOGICA SENSOR CORRIENTE
PIN 1	RA1	OUT1	SALIDA DIGITAL MULTIOLEXOR
PIN 2	RA2	OUT2	SALIDA DIGITAL MULTIOLEXOR
PIN 3	RA3	OUT3	SALIDA DIGITAL MULTIOLEXOR
PIN 4	RA4	OUT4	SALIDA DIGITAL MULTIOLEXOR
PIN 5	RA5	NA	NA
PIN 6	RA6	NA	NA
PIN 7	RA7	NA	NA

PUERTO B	Nombre	Configuración	Función
PIN 0	RB0	INT0	INTERRUPCION ENCODER A1
PIN 1	RB1	INT1	INTERRUPCION EMERGENCIA
PIN 2	RB2	INT2	INTERRUPCION ENCODER A2
PIN 3	RB3	IN3	LECTURA ENCODER B1
PIN 4	RB4	IN4	LECTURA ENCODER B2
PIN 5	RB5	OUT5	SALIDA PERMISO CONTROL A PIC 2
PIN 6	RB6	OUT6	LED TESTIGO VALVULA 1
PIN 7	RB7	OUT7	LED TESTIGO VALVULA 2

PUERTO C	Nombre	Configuración	Función
PIN 0	RC0	OUT0	SALIDA PERMISO CALIBRACION A PIC 2
PIN 1	RC1	CCP2	SALIDA CONTROL A MULTIPLEXOR
PIN 2	RC2	CCP1	SALIDA CONTROL A MULTIPLEXOR
PIN 3	RC3	NA	NA
PIN 4	RC4	NA	NA
PIN 5	RC5	NA	NA
PIN 6	RC6	TX	TRANSMISION A PIC 2
PIN 7	RC7	RX	RECEPCION DE MAX233

PUERTO D	Nombre	Configuración	Función
PIN 0	RD0	E	PINES CONTROLADOS POR LIBRERÍA PARA CONTROL DE LCD
PIN 1	RD1	RS	
PIN 2	RD2	RW	
PIN 3	RD3	NA	
PIN 4	RD4	D4	
PIN 5	RD5	D5	
PIN 6	RD6	D6	
PIN 7	RD7	D7	

	Universidad Nacional Autónoma de México		Apéndice A	
	Facultad de Ingeniería			
	Descripción:	Configuraciones de pines para microcontroladores		
	Numero de plano	2		

PUERTO C	Nombre	Configuración	Función
PIN 0	RE0	NA	NA
PIN 1	RE1	NA	NA
PIN 2	RE2	NA	NA
PIN 3	RC3	MCLR	ENTRADA DE MASTER CLEAR

PIC-2

PUERTO A	Nombre	Configuración	Función
PIN 0	RA0	AN0	LECTURA ANALOGICA SENSOR CORRIENTE
PIN 1	RA1	OUT1	SALIDA DIGITAL MULTIOLEXOR
PIN 2	RA2	OUT2	SALIDA DIGITAL MULTIOLEXOR
PIN 3	RA3	OUT3	SALIDA DIGITAL MULTIOLEXOR
PIN 4	RA4	OUT4	SALIDA DIGITAL MULTIOLEXOR
PIN 5	RA5	NA	NA
PIN 6	RA6	NA	NA
PIN 7	RA7	NA	NA

PUERTO B	Nombre	Configuración	Función
PIN 0	RB0	INT0	INTERRUPCION ENCODER A1
PIN 1	RB1	INT1	INTERRUPCION EMERGENCIA
PIN 2	RB2	INT2	INTERRUPCION ENCODER A2
PIN 3	RB3	IN3	LECTURA ENCODER B1
PIN 4	RB4	IN4	LECTURA ENCODER B2
PIN 5	RB5	OUT5	ENTRADA PERMISO CALIBRACION DE PIC 1
PIN 6	RB6	OUT6	LED TESTIGO VALVULA 1
PIN 7	RB7	OUT7	LED TESTIGO VALVULA 2

PUERTO C	Nombre	Configuración	Función
PIN 0	RC0	NA	NA
PIN 1	RC1	CCP2	SALIDA CONTROL A MULTIPLEXOR
PIN 2	RC2	CCP1	SALIDA CONTROL A MULTIPLEXOR
PIN 3	RC3	NA	NA
PIN 4	RC4	NA	NA
PIN 5	RC5	IN5	ENTRADA PERMISO CONTROL DE PIC 1
PIN 6	RC6	TX	TRANSMISION A PIC 2
PIN 7	RC7	RX	RECEPCION DE MAX233

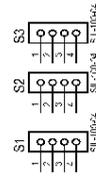
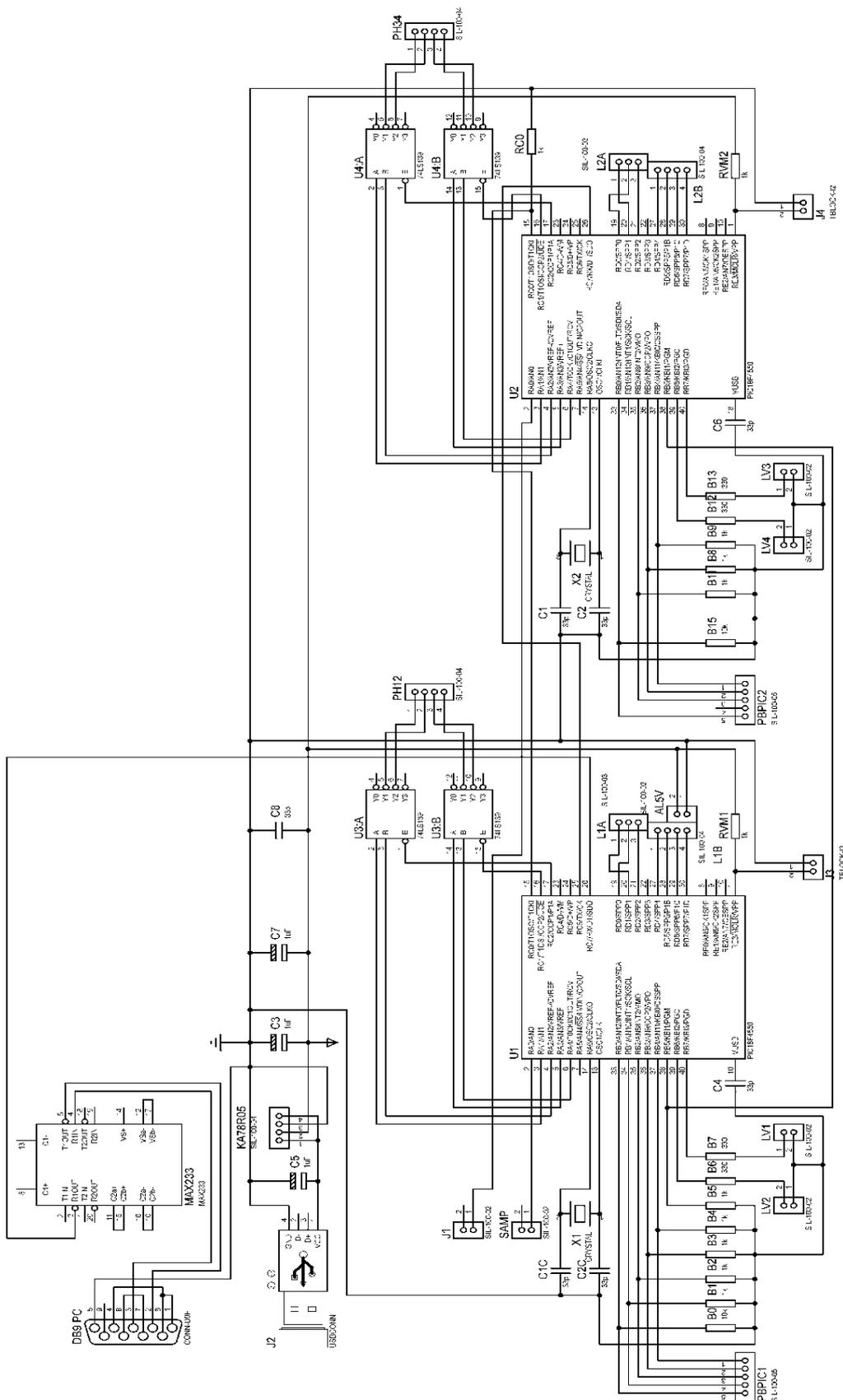
	Universidad Nacional Autónoma de México		Apéndice	
	Facultad de Ingeniería			
	Descripción:	Configuraciones de pines para microcontroladores		
	Numero de plano	3		

PUERTO D	Nombre	Configuración	Función
PIN 0	RD0	E	PINES CONTROLADOS POR LIBRERÍA PARA CONTROL DE LCD
PIN 1	RD1	RS	
PIN 2	RD2	RW	
PIN 3	RD3	NA	PINES CONTROLADOS POR LIBRERÍA PARA CONTROL DE LCD
PIN 4	RD4	D4	
PIN 5	RD5	D5	
PIN 6	RD6	D6	
PIN 7	RD7	D7	

PUERTO C	Nombre	Configuración	Función
PIN 0	RE0	NA	NA
PIN 1	RE1	NA	NA
PIN 2	RE2	NA	NA
PIN 3	RC3	MCLR	ENTRADA DE MASTER CLEAR

	Universidad Nacional Autónoma de México		Apéndice	
	Facultad de Ingeniería			
	Descripción:	Cotización de elementos para placas	B	
	Numero de plano	4		

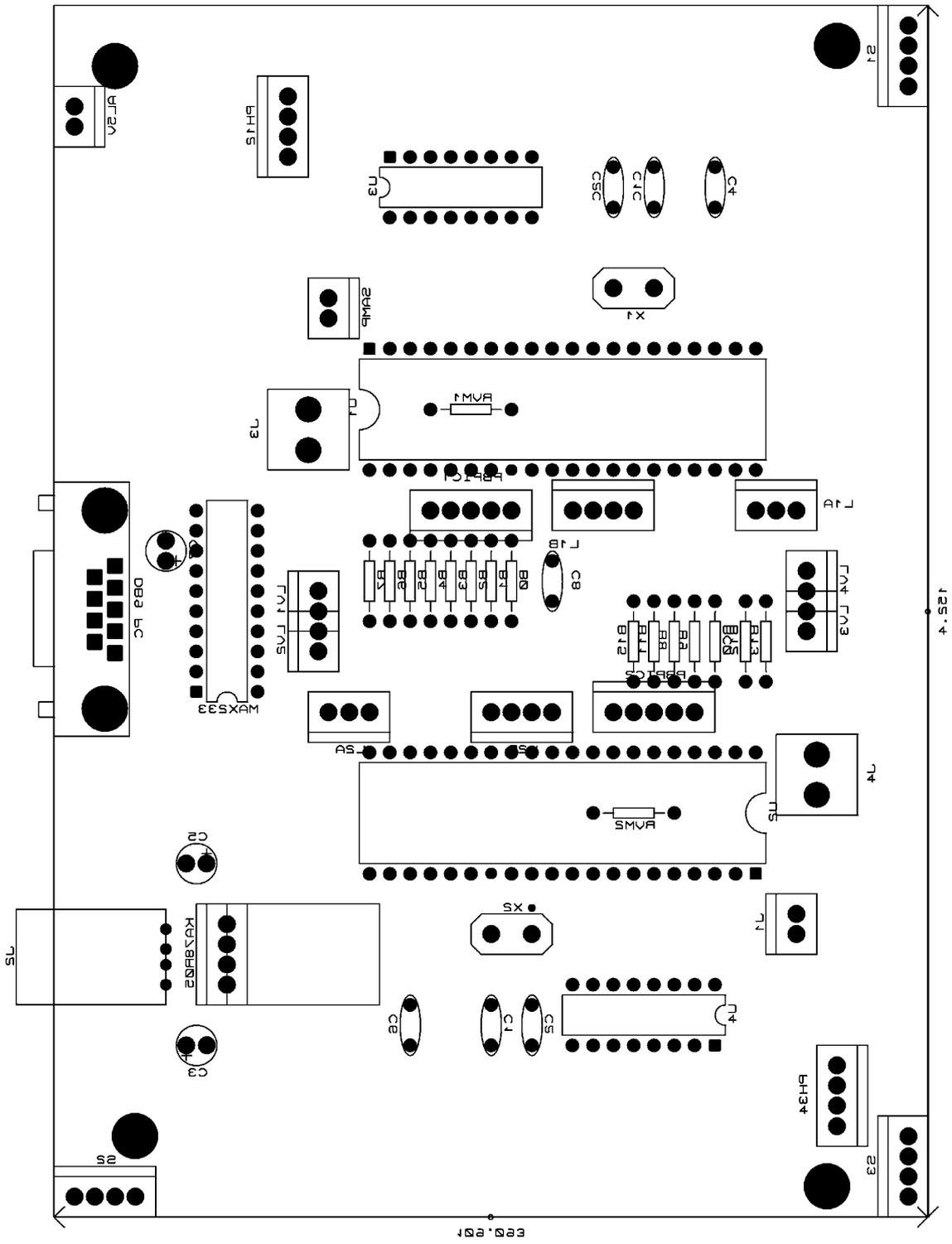
Cantidad	Nombre	Descripción	Precio unitario	Precio	Precio + IVA
2	PIC18F4550-I/P	IC PIC MCU FLASH 16KX16 DIP	\$107.75	\$215.50	\$249.98
4	HD74LS139P	IC DECODER/DEMUX 2/4 LINE DIP	\$9.48	\$37.93	\$44.00
2	JHD-162ASTNLED	LCD 16X2 STN CON BACKLIGHT	\$118.97	\$237.93	\$276.00
3	PUSH-1/2P	MICROSWITCH PUSH MINI 1MM 2 PINES	\$1.72	\$5.17	\$6.00
2	20MHZ-MINI	CRISTAL DE CUARZO 20MHZ MINI	\$4.31	\$8.62	\$10.00
5	Resistencia	1/4 W 330 ohm	\$0.86	\$4.31	\$5.00
10	Resistencia	1/4 W 10k ohm	\$0.86	\$8.62	\$10.00
1	KA78R05	REGULADOR 5 V	\$18.97	\$18.97	\$22.00
5	Resistencia	1/4 W 1k ohm	\$0.86	\$4.31	\$5.00
5	CC-20/50V	CAPACITOR CERAMICO 20PF	\$0.86	\$4.31	\$5.00
5	LED-B10D-UB-R30	LED 10MM AZUL ULTRA BRILLANTE 10600-13800 MCD	\$2.59	\$12.93	\$15.00
5	CC-.1/50V	CAPACITOR CERAMICO .1UF	\$0.86	\$4.31	\$5.00
2	L298n	PUENTE H	\$135.00	\$270.00	\$313.20
1	USBA/F90_DIP	CONECTOR USB TIPO A, ANG RECTO DIP	\$9.48	\$9.48	\$11.00
1	Fusible	Fusible tipo europeo 5 A	\$5.00	\$5.00	\$5.80
2	Porta fusible	ABRAZERA PORTA FUSIBEL TIPO AMERICANO	\$8.00	\$16.00	\$18.56
1	ACS711EX	SENSOR CORRIENTE 15.5 A -15.5	\$70.00	\$70.00	\$81.20
2	HEADER-1	TIRA CON 40 TERMINALES 1 LINEA	\$1.72	\$3.45	\$4.00
4	40PF	BASE PARA CI SCREW MACHINE	\$20.69	\$82.76	\$96.00
4	20PF	BASE 20 PINS P/C.I. MAQUINADA	\$6.03	\$24.14	\$28.00
2	HEADER-2	TIRA CON 40 TERMINALES 2 LINEAS	\$6.90	\$13.79	\$16.00
2	FR-30X20	PLACA FIBRA DE VIDRIO DOS CARAS	\$51.72	\$103.45	\$120.00
1	zócalo	zócalo 20 pines	\$12.00	\$12.00	\$13.92
2	zócalo	zócalo 40 pines	\$18.00	\$36.00	\$41.76
2	CP-16	METRO DE CABLE PLANO 16 TERMINALES	\$19.83	\$39.66	\$46.00
4	FCN16	CONECTOR 16 PIN PARA CABLE PLANO	\$4.31	\$17.24	\$20.00
1	USB-SERIAL	Adaptador de USB a serial (DB9)	\$280.00	\$280.00	\$324.80
2	HOUSING-40	FEMALE HEADER 2.54MM SINGLE ROW	\$11.21	\$22.41	\$26.00
1	CAPACITOR	CONDENSADOR ELECTROLITICO 105 C	\$2.59	\$2.59	\$3.00
1	CAPACITOR	CONDENSADOR ELECTROLITICO 1000 5C	\$7.76	\$7.76	\$9.00
Totales			\$938.34	\$1,578.64	\$1,831.22





Universidad Nacional Autónoma de México	
Facultad de Ingeniería	
Descripción:	Mapa de elementos de placa de control
Numero de plano	6

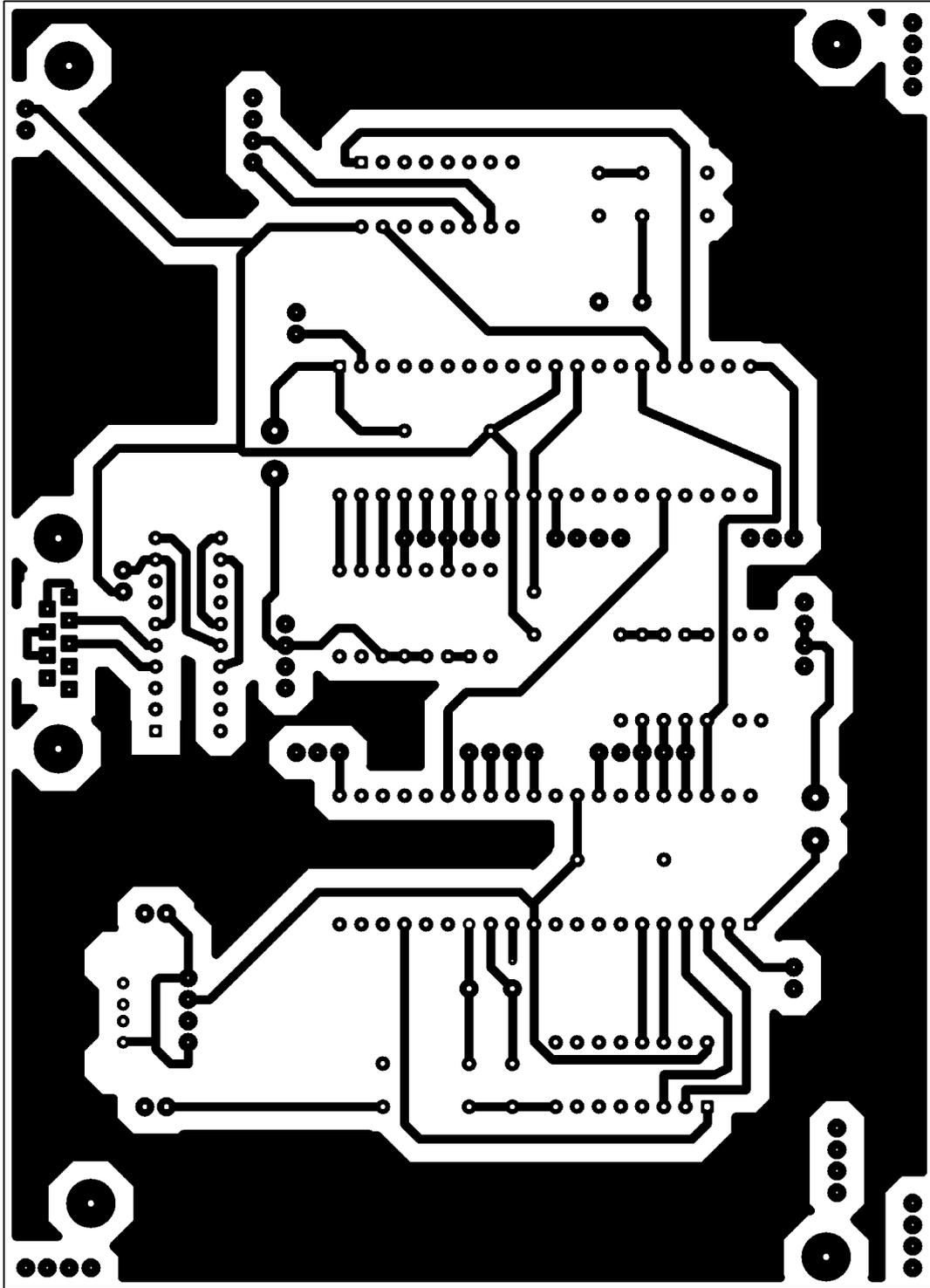
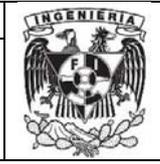
Apéndice
C





Universidad Nacional Autónoma de México	
Facultad de Ingeniería	
Descripción:	Mapa de pistas inferior de placa de control
Numero de plano	7

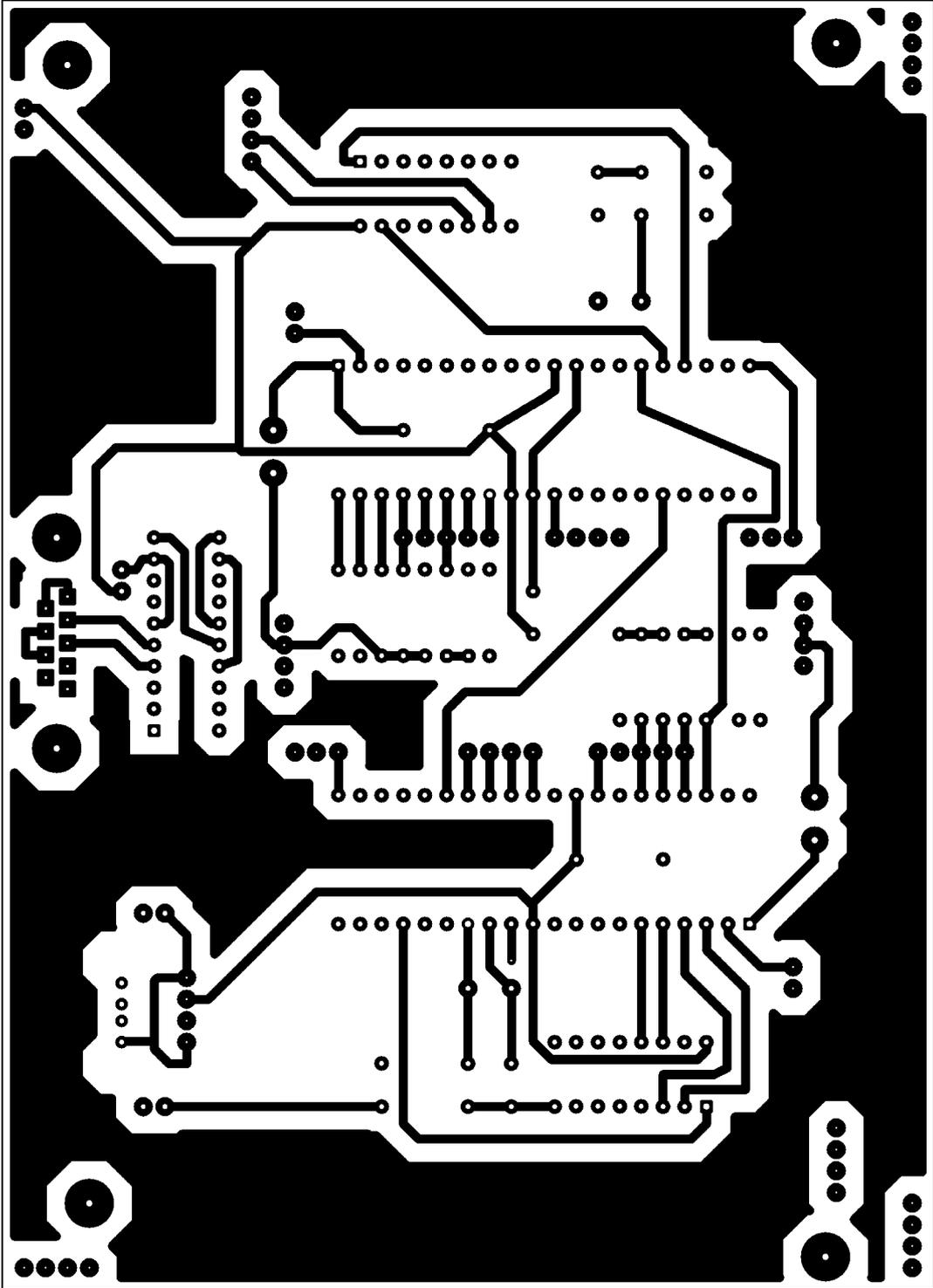
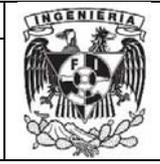
Apéndice
C

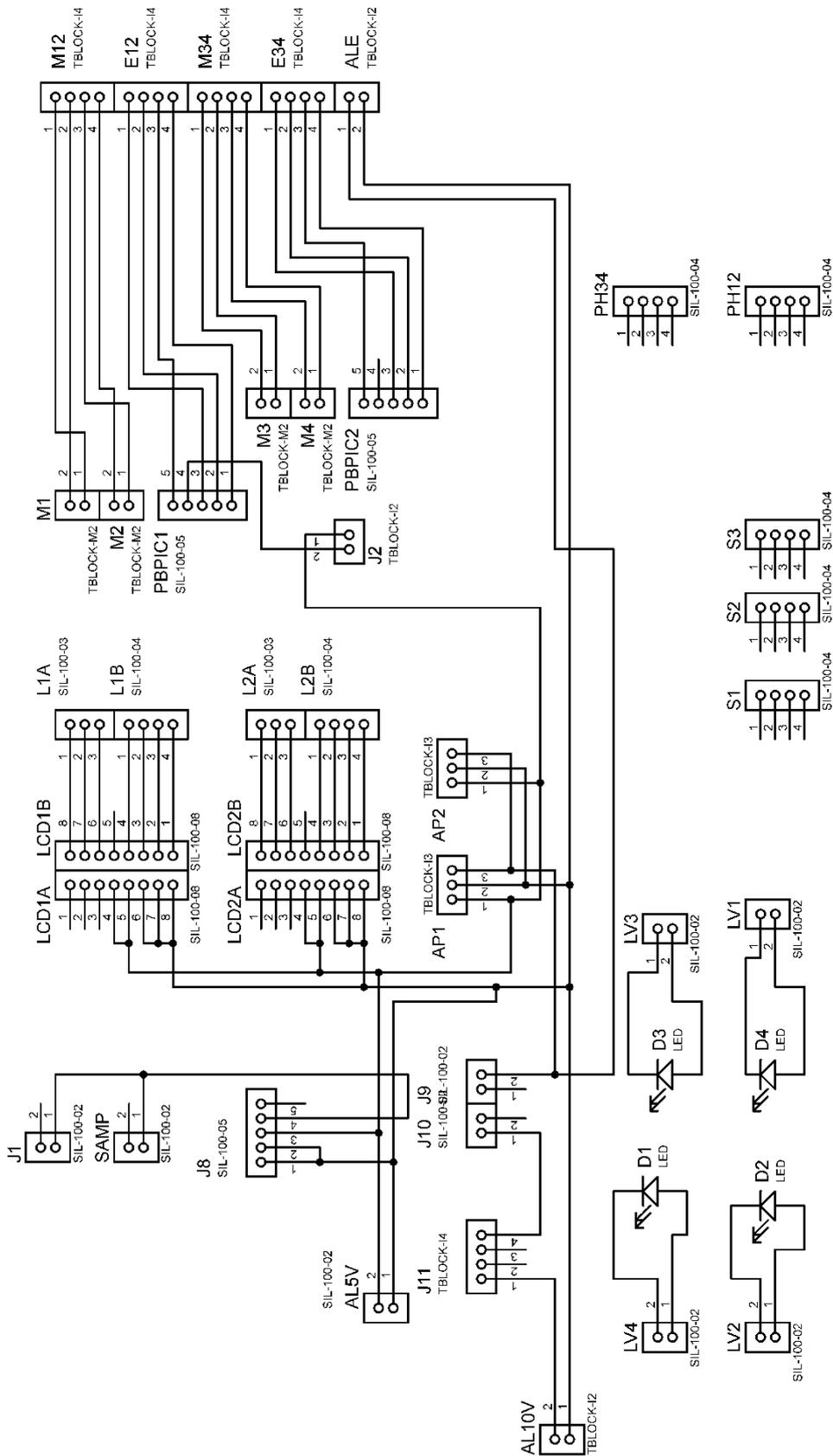




Universidad Nacional Autónoma de México	
Facultad de Ingeniería	
Descripción:	Mapa de pistas superior de placa de control
Numero de plano	8

Apéndice
C

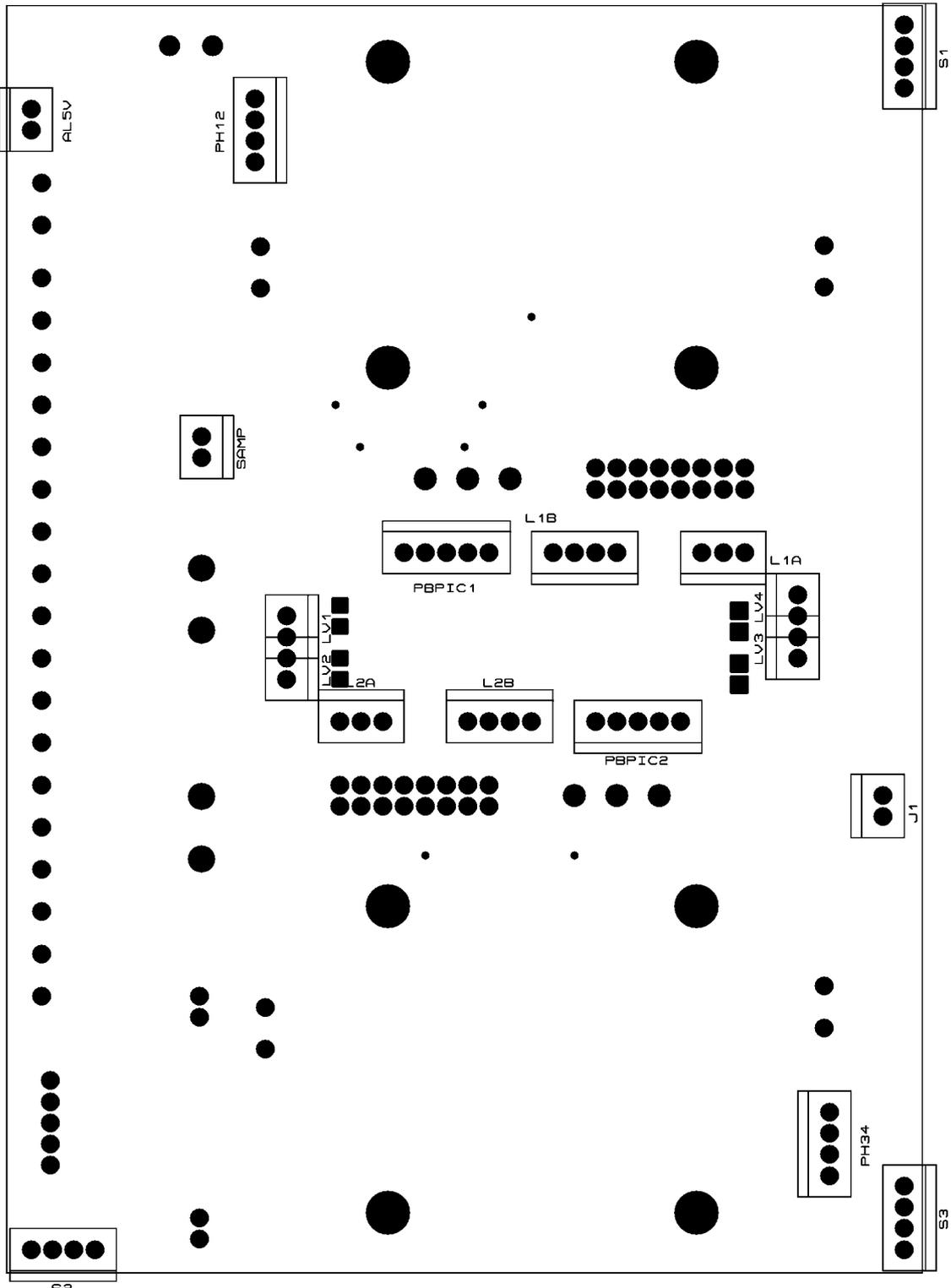






Universidad Nacional Autónoma de México	
Facultad de Ingeniería	
Descripción:	Mapa de elementos superior de placa de potencia
Numero de plano	10

Apéndice	C
----------	---

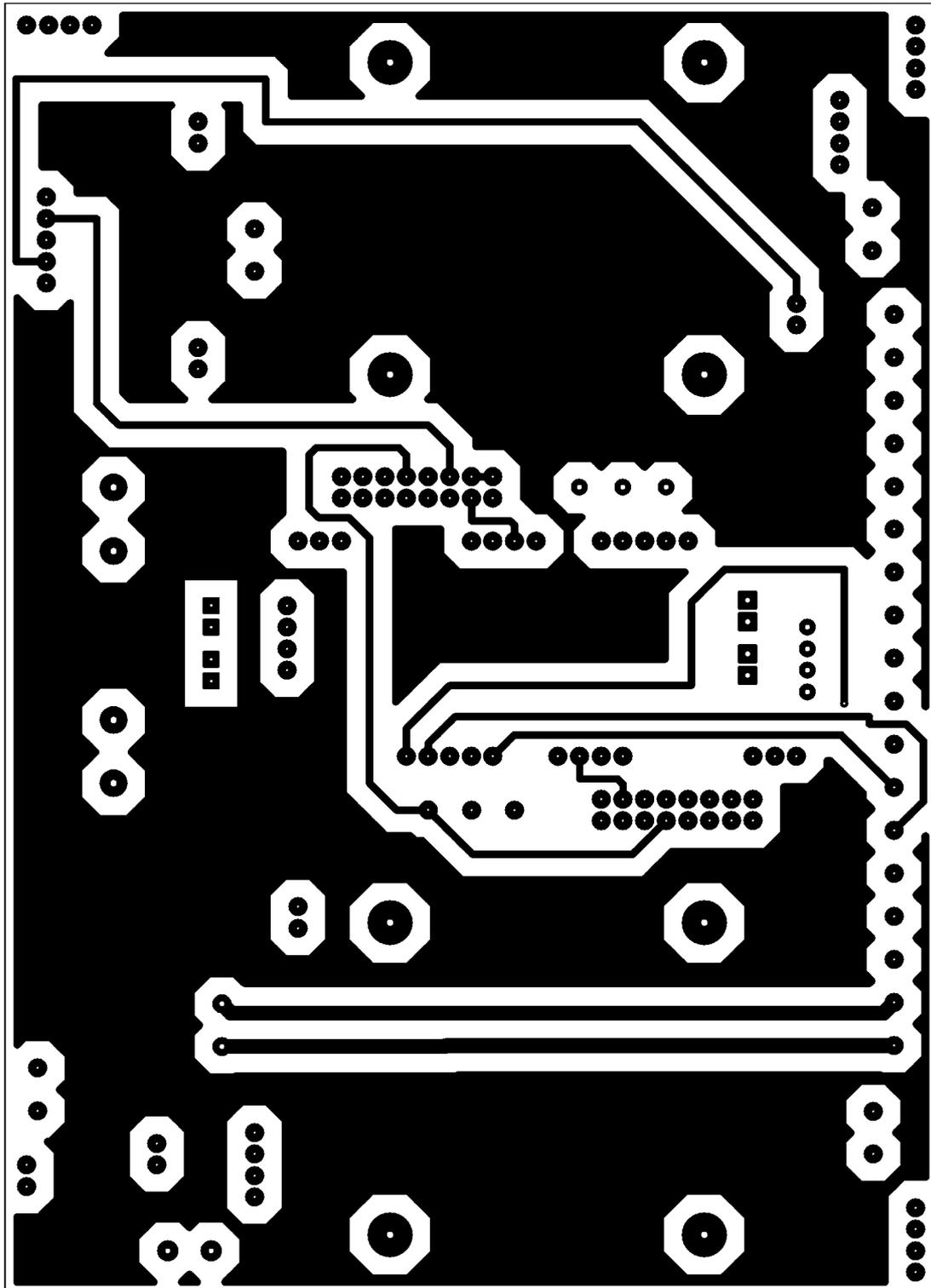


	Díámetro [mm]	Barreno [mm]		Lado [mm]	Barreno [mm]
	5.24	3		1,7	1.1
	2.29	1.016			



Universidad Nacional Autónoma de México	
Facultad de Ingeniería	
Descripción:	Mapa de elementos inferior de placa de potencia
Numero de plano	11

Apéndice
C

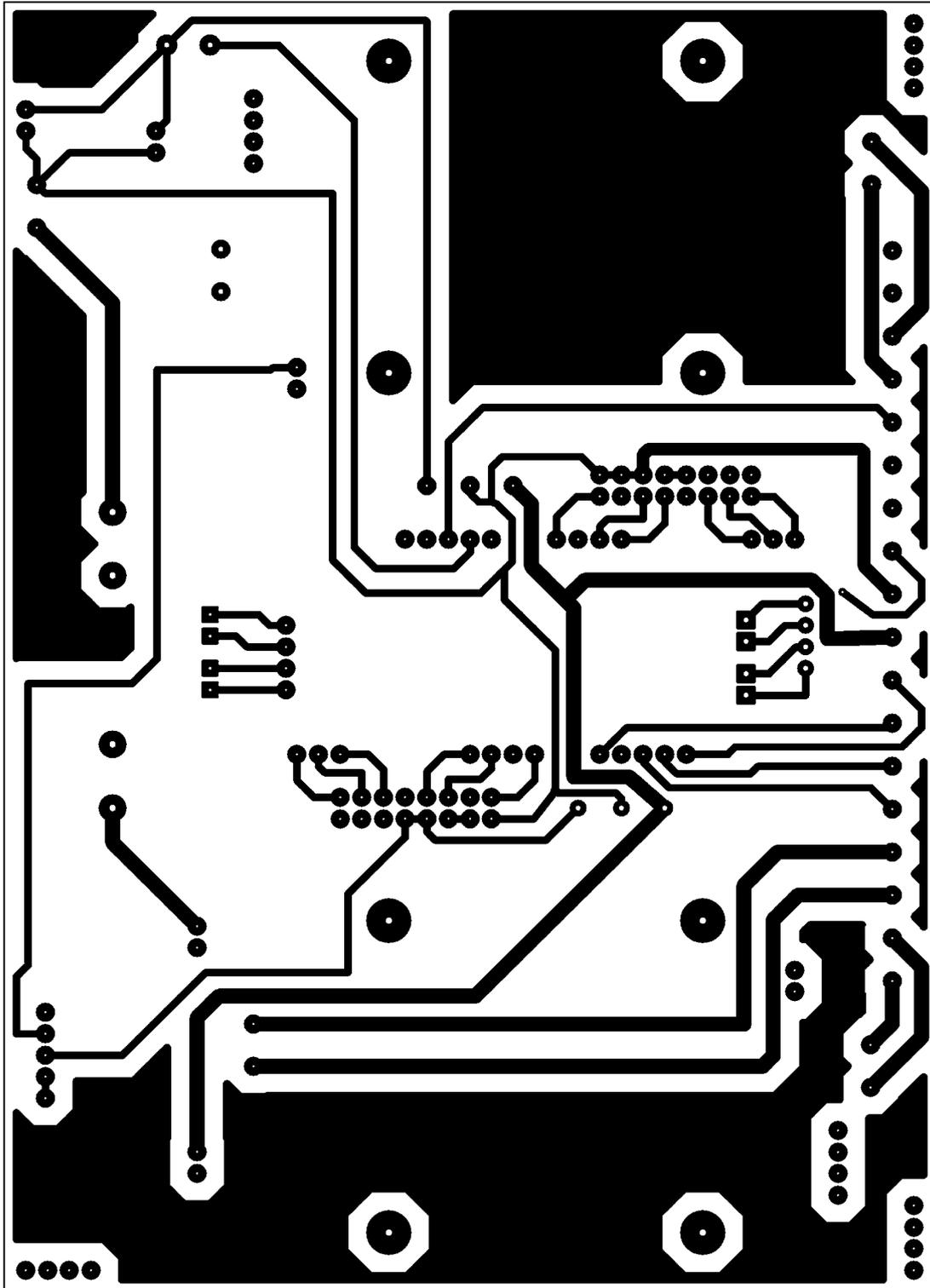


	Diámetro [mm]	Barreno [mm]	Lado [mm]	Barreno [mm]	
	5.24	3		1.7	1.1
	2.29	1.016			



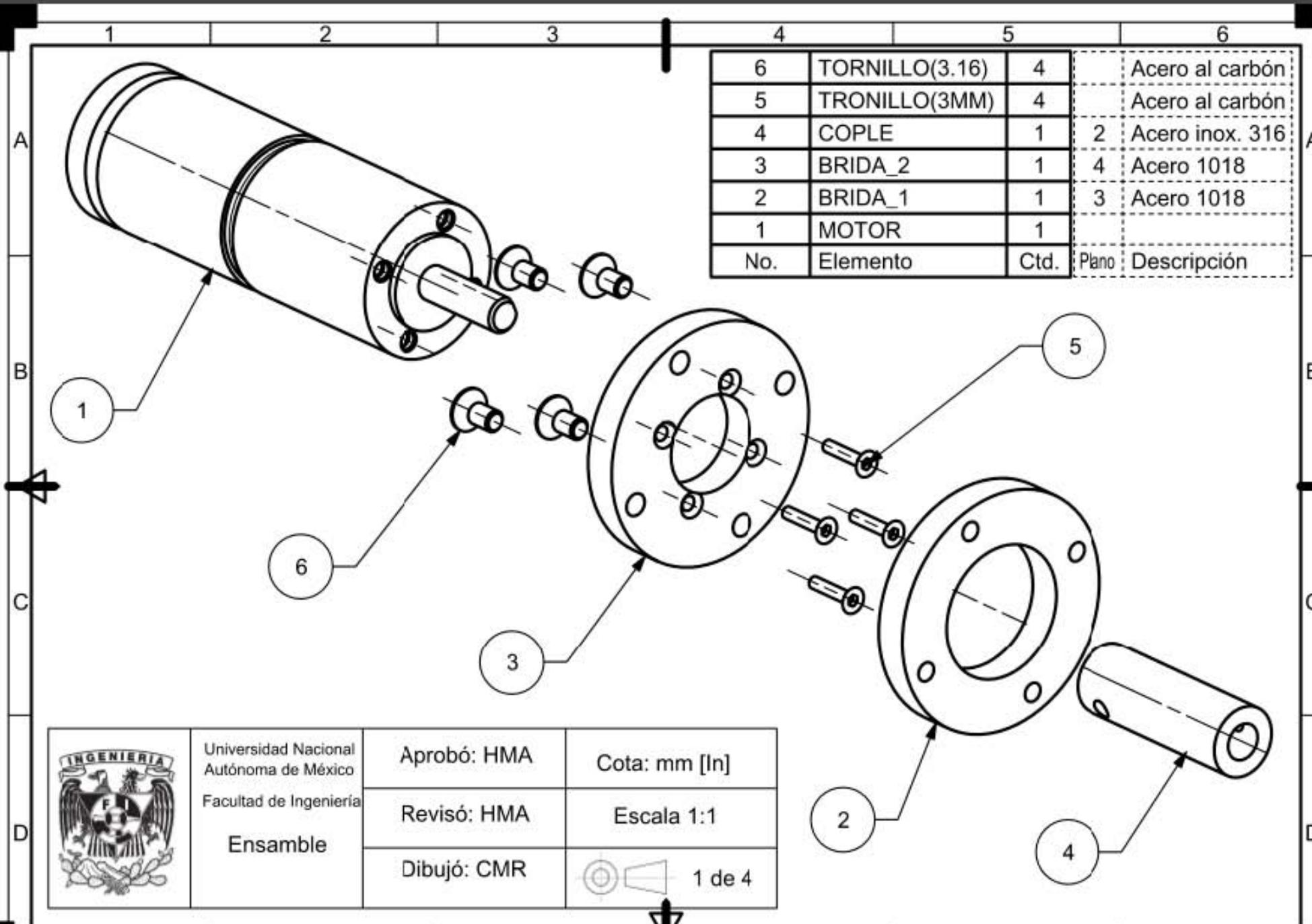
Universidad Nacional Autónoma de México	
Facultad de Ingeniería	
Descripción:	Mapa de pistas inferior para placa de potencia
Numero de plano	12

Apéndice
C

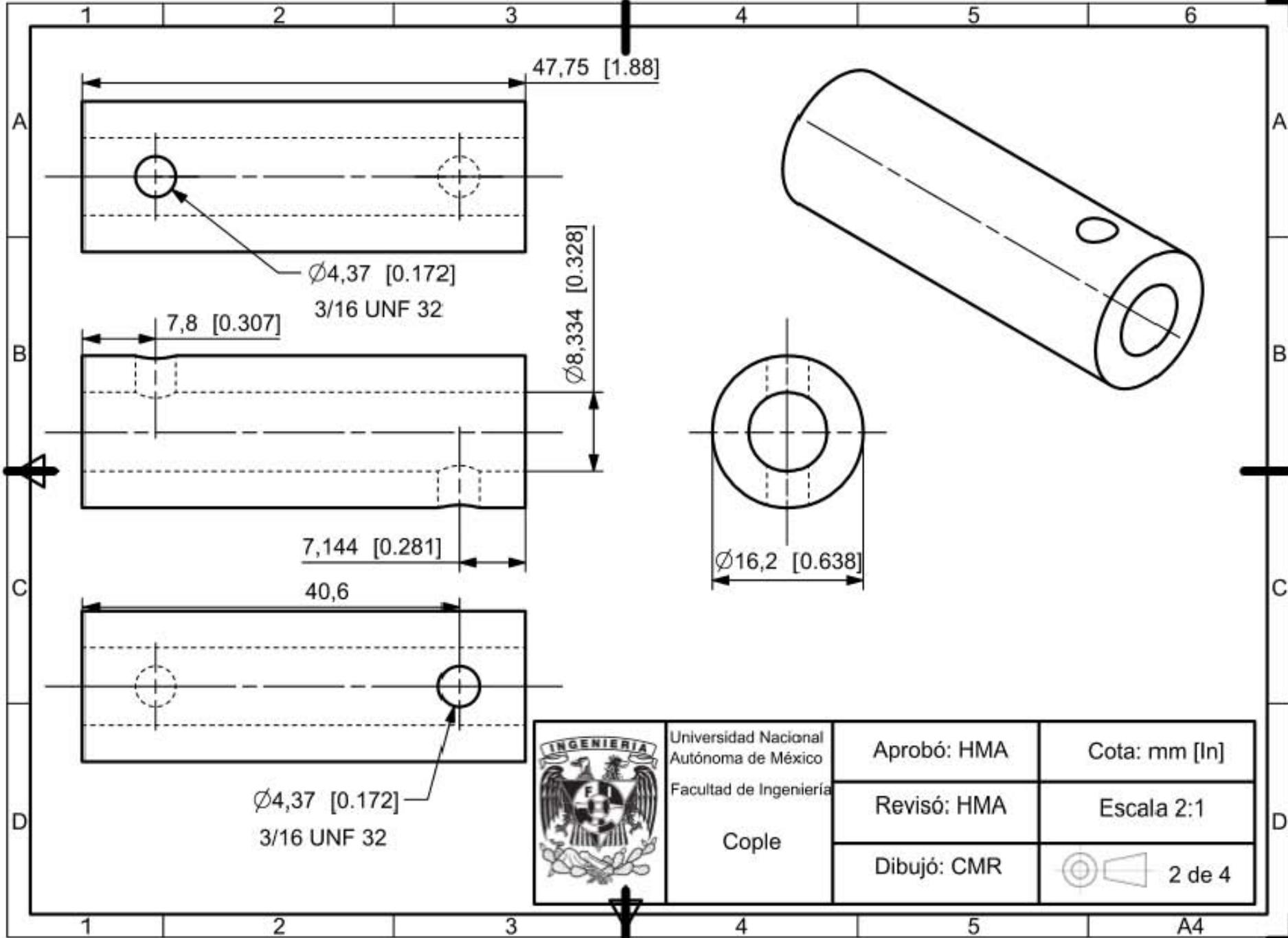


	Diámetro [mm]	Barreno [mm]	Lado [mm]	Barreno [mm]
	5.24	3		1.1
	2.29	1.016		

No.	Elemento	Ctd.	Plano	Descripción
6	TORNILLO(3.16)	4		Acero al carbón
5	TRONILLO(3MM)	4		Acero al carbón
4	COPE	1	2	Acero inox. 316
3	BRIDA_2	1	4	Acero 1018
2	BRIDA_1	1	3	Acero 1018
1	MOTOR	1		



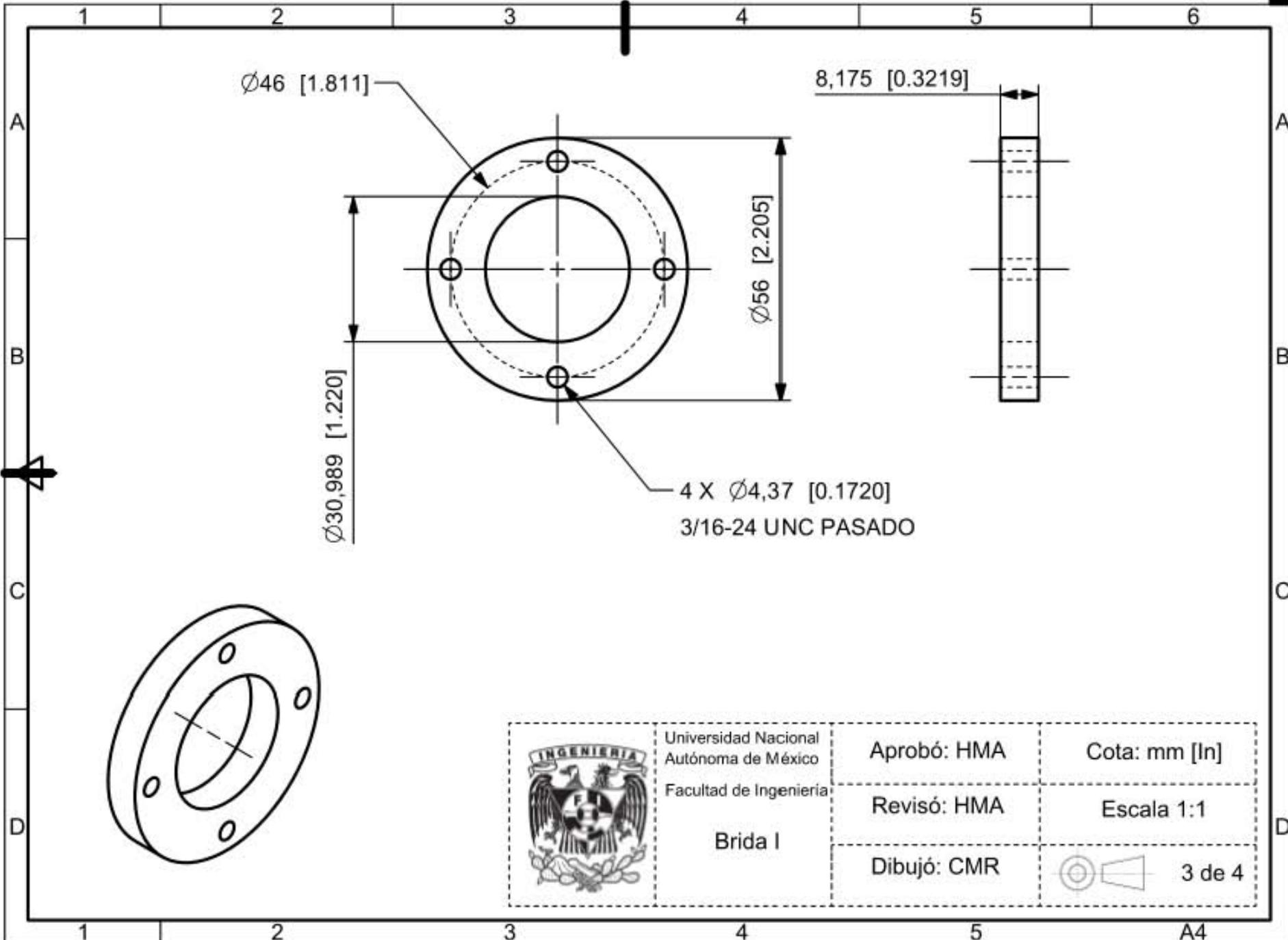
	Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	Aprobó: HMA	Cota: mm [In]
	Ensamble	Revisó: HMA	Escala 1:1
		Dibujó: CMR	 1 de 4



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
Cople

Aprobó: HMA
Revisó: HMA
Dibujó: CMR

Cota: mm [In]
Escala 2:1
2 de 4



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Brida I

Aprobó: HMA

Revisó: HMA

Dibujó: CMR

Cota: mm [In]

Escala 1:1



3 de 4

A4

