

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PÉNDULO PROPULSADO PARA
EVALUACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL

VICENTE ARANGO VILLA

UNIVERSIDAD EAFIT
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE MECANICA
MEDELLIN
2010

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PÉNDULO PROPULSADO PARA
EVALUACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL

VICENTE ARANGO VILLA

Proyecto de grado propuesto para el diseño y construcción de un péndulo
propulsado para evaluación de algoritmos de control.

Asesor:

Jairo Maya Toro

UNIVERSIDAD EAFIT
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE MECANICA
MEDELLIN
2010

Nota de aceptación:

Firma presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, 23 de Junio de 2010

CONTENIDO

	Pag.
1. DEFINICION CLARA Y CONCRETA DEL DESARROLLO	10
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. GENERAL	11
2.2. ESPECIFICOS	11
3. METODOLOGIA	13
4. ALCANCE.....	14
5. ESTADO DEL ARTE	15
5.1. COMPONENTES MECÁNICOS.....	15
5.2. COMPONENTES ELECTRO-MECÁNICOS.....	16
5.3. COMPONENTES ELECTRÓNICOS	17
6. COMO ES EL PÉNDULO PROPULSADO PROPUESTO?	22
7. MODELO MATEMÁTICO DEL PÉNDULO	24
7.1. MODELO NO LINEAL	24
7.2. MODELO LINEAL.....	24
7.3. SIMULACIÓN DEL MODELO NO LINEAL	25
7.4. CALCULO DE LA FUERZA DE EMPUJE CON LA SALIDA DEL CONTROLADOR	25
8. COMPONENTES DEL PÉNDULO.	31
8.1. MODELO FÍSICO	31
8.2. TARJETA ELECTRÓNICA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL.....	32
8.3. SOFTWARE	34
9. CONTROLADORES DEL PÉNDULO.....	37
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
11. ABSTRACT	40
12. BIBLIOGRAFIA	41
12.1. CLASICA	41
12.2. INTERNET.....	42

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Árbol Lógico de objetivos.....	12
Figura 2. Péndulo propulsado	22
Figura 3. Sistema de propulsión con hélice de paso variable	23
Figura 4. Modelo grafico simplificado del péndulo.	24
Figura 5. Algoritmo para cálculo de empuje.....	26
Figura 6. Paso vs salida del controlador	28
Figura 7. Rpm pedidas al motor vs salida del controlador	29
Figura 8. Grafica de la relación entre empuje Vs salida del controlador "U".	30
Figura 9. Diagrama bloques tarjeta.....	32
Figura 10. Tarjeta en modo interfaz.	33
Figura 11. Tarjeta en modo Control.	33
Figura 12. Tarjeta electrónica de interfaz o control	34
Figura 13. Monitoreo y control del péndulo.....	36
Figura 14. Control en cascada	37
Figura 15. Respuesta dinámica del péndulo.....	38

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
Anexo A. Programa microcontrolador.....	44

INTRODUCCIÓN

Con el presente trabajo se pretende facilitar por medio de un péndulo (modelo electro-mecánico) la comprensión de los algoritmos de control para sistemas lineales y no lineales.

En el desarrollo del modelo se utilizaron componentes comerciales de bajo costo, provenientes en su mayoría de la industria del entretenimiento (modelos de radio control), a fin de obtener un modelo práctico de laboratorio fácil de adquirir por parte de las instituciones educativas y así promover la utilización de ayudas pedagógicas como complemento académico.

El diseño del péndulo se abordó desde diferentes áreas del conocimiento, tales como sistemas de control electrónico, y componentes mecánicos.

La frontera de la mecánica y otras disciplinas como la Ingeniería eléctrica y electrónica, Ingeniería de control y sistemas avanzados de programación cada día es más difusa. Esto por un proceso de integración de los conocimientos y las técnicas que en la actualidad países con tecnologías desarrolladas han sabido articular para obtener un concepto más novedoso en el diseño de máquinas.

Así pues, la electrónica, los mecanismos de control, la neumática, la hidráulica y el manejo asistido por computadores, micro controladores y Controladores Lógicos Programables (PLC) han transformado la construcción de máquinas en procesos simplificados de diseño y muy avanzados en su operación. Las bielas, los piñones, las palancas y las bandas han sido reemplazados por Drivers, motores con encoders, PLC, electro válvulas y otros elementos que hacen que las máquinas de hoy difieran considerablemente en su fabricación y operación con las máquinas tradicionalmente diseñadas.

Es precisamente aquí donde el estudiante que en su vida académica no se interesó en estas disciplinas, encontrará las mayores dificultades para la implementación de nuevas tecnologías. Por lo tanto será un gran reto concebir que el estudio de la mecánica tradicional forma parte de un universo de

construcción que ahora ha cambiado, que trae nuevas opciones y que definitivamente involucra disciplinas no siempre ofrecidas por las facultades al estudiante, por lo tanto será él con su propio entusiasmo quien las deberá apropiarse.

Un claro ejemplo se puede apreciar en el curso de control 2 donde se considera fundamental llevar los conocimientos teóricos a la práctica, con esto se podrá asimilar de una forma más clara las competencias enseñadas al estudiante, además de generar conciencia que el modelo actual es el producto de una evolución de lo tradicional a una práctica dirigida a soluciones modernas, ágiles, novedosas y seguras.

1. DEFINICION CLARA Y CONCRETA DEL DESARROLLO

Con el presente trabajo se pretende facilitar por medio de un artefacto (modelo electro-mecánico tipo péndulo) la comprensión de los diversos algoritmos de control expuestos en clase.

En el desarrollo del modelo se utilizarán componentes comerciales, provenientes en su mayoría de la industria del entretenimiento (modelos de radio control); el propósito es disminuir el costo del banco de pruebas con el objetivo de promover las ayudas pedagógicas como complemento académico.

A propósito del artefacto que se propone diseñar, será abordado desde diferentes áreas del conocimiento tales como sistemas de control electrónico, y componentes mecánicos.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Construir un modelo electro-mecánico tipo péndulo que cumpla con una finalidad pedagógica; a partir del cual se permita evaluar diferentes algoritmos y hardware de control, mediante procesos de selección de elementos electro-mecánicos, controles, mecanismos, etc., desde el diseño metódico.

2.2. ESPECIFICOS

Objetivo 1. Definir los principales componentes mecánicos, electromecánicos y electrónicos, con el fin de construir un banco de prueba para algoritmos de control.

Nivel 1 – Conocer.

Objetivo 2. Identificar las características más relevantes desde el punto de vista técnico, del diseño, y del control, entre otros, de las posibles formas de evaluar algoritmos de control expuestos en clase y así desarrollar un modelo que se adapte a las necesidades del estudiante.

Nivel 2 – Comprender.

Objetivo 3. Dimensionar el nuevo banco de prueba mediante el análisis organizado de los componentes comerciales, su diseño, su disposición dentro del equipo, su rendimiento, sus características y demás decisiones que lo vuelvan técnicamente funcional, viable y económico.

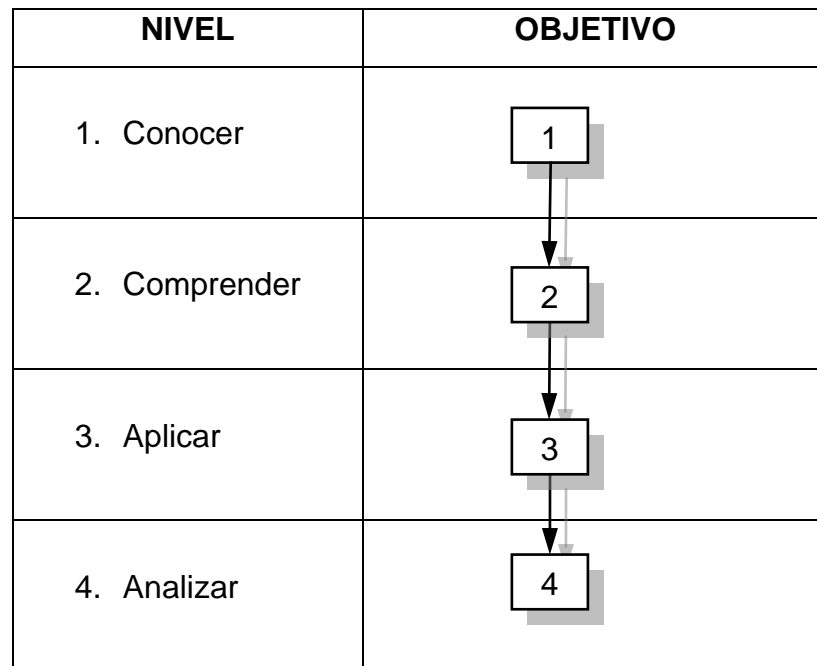
Nivel 3 – Aplicar.

Objetivo 4. Construir el banco de prueba para algoritmos de control a partir de las mejores prácticas internacionales.

Nivel 4 – Analizar.

Objetivo 5. Concluir con los principales resultados obtenidos en el desarrollo práctico.

Figura 1. Árbol Lógico de objetivos.



Fuente: Análisis de mecanismos no convencionales para la apertura de puertas de automóviles. Anteproyecto 2007

3. METODOLOGIA

El proyecto consta de tres fases, la primera es de reconocimiento en donde se realiza una investigación exhaustiva para determinar el modelo a fabricar, con esto se busca desarrollar un artefacto con comportamiento no lineal que se pueda adaptar a las diferentes necesidades del estudiante. De esta forma el estudiante podrá llevar a la práctica la teoría aprendida en clase.

La segunda fase consiste en la preparación de un diseño respaldado por los conocimientos adquiridos específicamente en las materias de diseño metódico, materiales, diseño de máquinas, mecatrónica, electrotecnia, control y apoyándose en sus respectivas bibliografías.

La tercera fase se fundamenta en la construcción del banco de prueba, el cual tendrá por objeto el estudio de algoritmos de control y posterior comparación con la teoría aprendida en clase, así se podrá relacionar las diferentes variables involucradas y sus principales características.

4. ALCANCE

Este proyecto pretende además del diseño y la construcción del banco de prueba, servir de instrumento para la evaluación de los diferentes algoritmos de control, realizar la respectiva memoria de cálculos, diagramas eléctricos, e información necesaria como señales de entrada - salida, y protocolo de comunicación con los instrumentos de captura de datos del modelo.

5. ESTADO DEL ARTE

El estado del arte, es un concepto traducido literalmente del inglés “*State of the art*” que puede significar el grado más alto de desarrollo que un producto puede alcanzar, o aquellos que representan la vanguardia o tecnología de punta de una familia de productos (EDA@2008).

Los elementos que componen un banco de prueba se describen a continuación, divididos en sus respectivas categorías.

5.1. COMPONENTES MECÁNICOS

Los componentes mecánicos son aquellos que cumplen la función de ser estructura además de cumplir con otras funciones, la estructura hace referencia a la disposición y orden de las partes dentro de un todo.

Dentro del ámbito de la ingeniería, se conoce con el nombre de estructura a toda construcción destinada a soportar su propio peso y la presencia de acciones exteriores (fuerzas, momentos, cargas térmicas, etc.) sin perder las condiciones de funcionalidad para las que fue concebida ésta (EST@2008).

Péndulo. Un péndulo es un sistema físico ideal constituido por un hilo inextensible y de masa despreciable, sostenido por su extremo superior de un punto fijo, con una masa puntual en su extremo inferior que oscila libremente en el vacío. Si el movimiento de la masa se mantiene en un plano, se dice que es un péndulo plano; en caso contrario, se dice que es un péndulo esférico. (PEND@2008).

Plataforma. Una plataforma es un tablero horizontal, descubierto y elevado sobre el suelo, donde se colocan personas o cosas, para el caso del banco de prueba es el lugar sobre el cual descansa el péndulo o soporte, de igual forma dentro de esta plataforma se encuentran los controles y motores del sistema (PFMA@2008).

Rodamientos. Un rodamiento reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste, sirviéndole de apoyo y facilitando su desplazamiento.

El contacto que exista entre las piezas determina si el rodamiento es deslizante o lineal y rotativo.

El elemento rotativo que puede emplearse en la fabricación pueden ser: bolas, rodillos o aguias.

Los rodamientos de movimiento rotativo, según el sentido del esfuerzo que soporta, pueden ser axiales, radiales y axiales-radiales (RODM@2008).

5.2. COMPONENTES ELECTRO-MECÁNICOS

La electromecánica combina las ciencias del electromagnetismo de la ingeniería eléctrica y la ciencia de la mecánica.

Los dispositivos electromecánicos combinan partes eléctricas y mecánicas para conformar su mecanismo.

Ejemplos de estos dispositivos son los motores eléctricos y los dispositivos mecánicos movidos por estos, los relés; las válvulas a solenoides; y las diversas clases de interruptores y llaves de selección eléctricas.

Algunos aparatos que solían emplear dispositivos electromecánicos para su control emplean hoy en día, de una forma más barata y efectiva, un circuito

integrado estándar (con unos pocos millones de transistores) para el cual se escribe un programa informático que lleva a cabo la misma tarea de control a través de la lógica.

Los transistores reemplazan prácticamente a todos los dispositivos electromecánicos, se utilizan en la mayoría de sistemas de control realimentados y aparecen en grandes cantidades en todos los aparatos electrónicos, desde los semáforos hasta las lavadoras (EME@2008).

Motores eléctricos. Un motor eléctrico transforma energía eléctrica en energía mecánica, y viceversa. Los motores eléctricos de tracción usados en locomotoras realizan a menudo ambas tareas, si se los equipa con frenos dinamo.

Estos motores son ampliamente utilizados en instalaciones industriales y demás aplicaciones que no requieran autonomía respecto de la fuente de energía, dado que la energía eléctrica es difícil de almacenar. La energía de una batería de varios kg equivale a la que contienen 80 g de gasolina. Así, en automóviles se están empezando a utilizar en vehículos híbridos para aprovechar las ventajas de ambos. (MOT@2008).

5.3. COMPONENTES ELECTRÓNICOS

La electrónica, es la rama de la física y fundamentalmente una especialización de la ingeniería que estudia y emplea sistemas cuyo funcionamiento se basa en la conducción y el control del flujo microscópico de los electrones u otras partículas cargadas eléctricamente.

Esta ciencia desarrolla en la actualidad una gran variedad de tareas, los principales usos de los circuitos electrónicos son el control, el procesado, la distribución de información, la conversión y la distribución de la energía eléctrica.

Estos dos usos implican la creación o la detección de campos electromagnéticos y corrientes eléctricas. Entonces se puede decir que la electrónica abarca en general las siguientes áreas de aplicación:

- Electrónica de control
- Telecomunicaciones
- Electrónica de potencia

Para el objetivo de este proyecto, el enfoque será la electrónica de control (ETCA@2008).

Indicadores tipo led. Un diodo emisor de luz o LED por sus siglas en inglés (Light-Emitting Diode) es un dispositivo semiconductor (diodo) que emite luz cuasi-monocromática, es decir, con un espectro muy angosto, cuando se polariza de forma directa y es atravesado por una corriente eléctrica. El color, (longitud de onda), depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo, pudiendo variar desde el ultravioleta, pasando por el espectro de luz visible, hasta el infrarrojo, recibiendo éstos últimos la denominación de IRED (Infra-Red Emitting Diode).

Este dispositivo se utiliza como indicador para saber cuando el modelo se encuentra encendido, aunque se le puede dar una gran cantidad de usos dependiendo de los requerimientos del estudiante(LED@2008).

Elementos de control tipo Microcontroladores. Un micro-controlador es un circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: CPU, Memoria y Unidades de E/S, es decir, se trata de un computador completo en un solo circuito integrado (PIC@2008).

Sensores.

Acelerómetro. El acelerómetro es uno de los transductores más versátiles, siendo el más común el piezoeléctrico por compresión. Este se basa en el principio de que cuando se comprime un retículo cristalino piezoeléctrico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada.

Los elementos piezoeléctricos están hechos normalmente de circonato de plomo y se encuentran comprimidos por una masa, sujeta al otro lado por un muelle y todo el conjunto dentro de una caja metálica. Cuando el conjunto es sometido a vibración, el disco piezoeléctrico se ve sometido a una fuerza variable, proporcional a la aceleración de la masa. Debido al efecto piezoeléctrico se desarrolla un potencial variable, proporcional a la aceleración, que se puede registrar sobre un osciloscopio o voltímetro (ACEL@2008).

Giróscopo:

El giroscopio o giróscopo es un dispositivo mecánico formado esencialmente por un cuerpo con simetría de rotación que gira alrededor de su eje de simetría. Cuando es sometido a un momento de fuerza que tiende a cambiar la orientación del eje de rotación su comportamiento es aparentemente paradójico ya que el eje

de rotación, en lugar de cambiar de dirección como lo haría un cuerpo que no girase, cambia de orientación en una dirección perpendicular a la dirección intuitiva (GYRO@2008).

Inclinómetro:

El inclinómetro es un instrumento para indicar la inclinación de una nave con respecto a la horizontal, en el modelo se utiliza para saber en qué dirección se encuentra la barra del péndulo (INCL@2008).

Encoder incremental:

Un encoder o codificador rotatorio, también llamado codificador del eje, es un dispositivo electromecánico usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor. Estos dispositivos se utilizan en robótica, en lentes fotográficas de última generación, en dispositivos de entrada de ordenador (tales como el ratón y el Trackball), y en plataformas de radar rotatorias. Hay dos tipos principales: absoluto y relativo.

El codificador rotatorio relativo o incremental, se utiliza cuando los métodos de codificación absolutos son demasiado incómodos. Este método también utiliza un disco unido al eje, pero este disco es mucho más pequeño marcado con una gran cantidad de líneas de la parte radial como los radios de una rueda, el interruptor óptico, parecido a un fotodiodo, genera un pulso eléctrico de modo que una de las líneas pase a través de su campo visual. Un circuito de control electrónico cuenta los pulsos para determinar el ángulo final (ENCONDER@2008).

Amplificador de potencia control de movimiento:

Un amplificador magnifica la amplitud o intensidad de un fenómeno físico mediante la utilización de energía externa, este dispositivo se utiliza para incrementar la corriente, el voltaje o la potencia de una señal, puede realizar esta función variando la relación entre la corriente y el voltaje sin variar la potencia

(amplificador pasivo), como sería el caso de un transformador. Otro tipo de amplificadores llamados amplificadores activos toman potencia de una fente de alimentación y controlan la salida para hacer coincidir la forma de onda de la señal de entrada con la de salida, pero con una amplitud mayor (AMPL@2008).

6. COMO ES EL PÉNDULO PROPULSADO PROPUESTO?

El péndulo en sus diferentes configuraciones es un modelo clásico utilizado frecuentemente en la docencia de ingeniería. La variación que se propone en el presente artículo tiene como particularidad la versatilidad que ofrece al estudiante al momento evaluar el desempeño de diferentes algoritmos de control en sistemas lineales y no lineales.

El péndulo propulsado (Figura 2) es una barra ligera articulada en un extremo y equipada con una unidad de propulsión en el extremo opuesto. La unidad de propulsión (Figura 3), ésta compuesta por un motor eléctrico tipo brushless (sin escobillas) y una hélice de paso variable con su respectivo actuador (servo electro mecánico) y genera el empuje necesario para la rotación y posicionamiento del péndulo en cualquier ángulo (0 a 360 grados).

Figura 2. Péndulo propulsado



Figura 3. Sistema de propulsión con hélice de paso variable

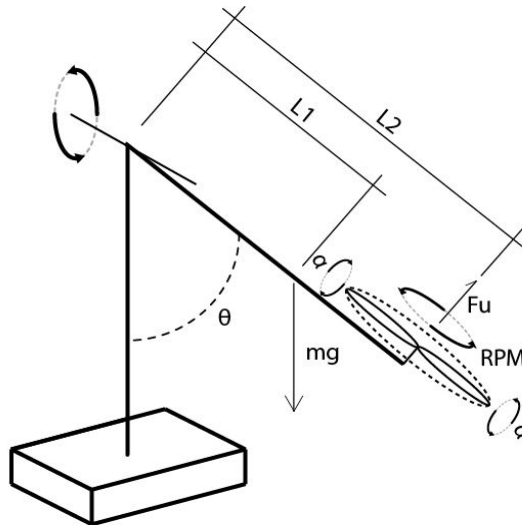


La posición angular de la barra es leída por un encoder incremental e interpretado por la tarjeta de adquisición y control del péndulo.

7. MODELO MATEMÁTICO DEL PÉNDULO

Se asume toda la masa del péndulo “m” (barra, motor y elemento de propulsión) a una distancia L_1 del centro de giro del péndulo (Figura 4). La fuerza de empuje “Fu” actúa a una distancia L_2 .

Figura 4. Modelo grafico simplificado del péndulo.



7.1. MODELO NO LINEAL

Aplicando la ley de conservación del momento se obtiene la siguiente ecuación diferencial no lineal.

$$mL_1^2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + mgL_1 \sin \theta = L_2 * Fu$$

7.2. MODELO LINEAL

Linealizando la ecuación diferencial anterior en la vecindad de un ángulo θ_0 y redefiniendo las variables como variables de desviación, se obtiene para el péndulo la siguiente función de transferencia:

$$Ft_p = \frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{L_2}{mL_1^2 \left(s^2 + \frac{g}{L_1} \cos \theta_0 \right)}$$

la cual solo puede ser utilizada para el análisis y diseño de los controladores para variaciones pequeñas del ángulo.

7.3. SIMULACIÓN DEL MODELO NO LINEAL

Cuando el ángulo θ es grande la linealización utilizada para el modelo anterior es inadecuada, por tal razón se utilizará el modelo no lineal para el péndulo.

Para la simulación del péndulo no lineal se empleará la representación discreta para el integrador (GENE@2002) con lo cual se obtiene:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \frac{1}{2}Ts(\omega(k+1) + \omega(k))$$
$$\omega(k+1) = \omega(k) + \frac{1}{2}Ts(\delta(k+1) + \delta(k))$$

En donde:

Ts = intervalo de muestreo

θ = Posición angular

W = velocidad angular

δ =aceleración angular

K= Muestra

7.4. CALCULO DE LA FUERZA DE EMPUJE CON LA SALIDA DEL CONTROLADOR

Una característica particularmente importante de un elemento propulsor es la relación entre fuerza de empuje, ángulo de las palas y velocidad angular del rotor. Esta relación surge de la velocidad inducida en el aire al pasar a través del disco del rotor. El chorro de aire es “empujado” en sentido perpendicular a las palas, por el principio de acción y reacción genera la fuerza de empuje que sostiene el péndulo.

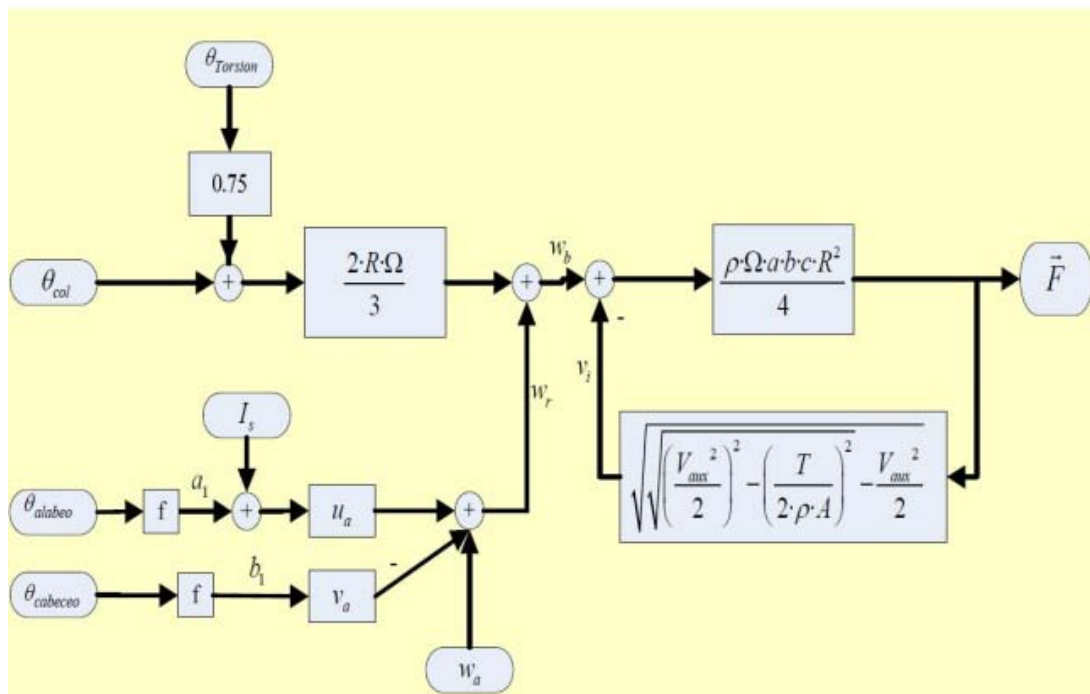
Si bien existen muchos factores que hacen complicada la determinación de la fuerza de empuje con exactitud, se puede trabajar con una aproximación de primer

orden de forma que los efectos de la velocidad inducida puedan ser moldeados con la teoría clásica del momento. La fuerza y velocidad inducida interactúan en un bucle aerodinámico retroalimentado.

En la tesis doctoral de Jaime Del Cerro Giner (JAIME@2007) se calcula para un helicóptero la fuerza de empuje como función de:

θ_{col} = Paso colectivo del rotor, θ_{alabeo} = Paso cíclico alabeo del rotor, $\theta_{cabeceo}$ = Paso cíclico cabeceo del rotor, a = área de la paleta de la barra estabilizadora, R =radio del rotor, L =longitud de la barra estabilizadora. El modelo propuesto en la tesis doctoral se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Algoritmo para cálculo de empuje.



La complejidad del algoritmo y la no disponibilidad de los parámetros para el péndulo hicieron necesaria la experimentación para encontrar la relación entre la fuerza de empuje, el paso y las RPM.

Variación del empuje “Fu” mediante numero de revoluciones

La forma más sencilla de variar el empuje entregado por un sistema motor – hélice es mediante la variación del numero de revoluciones, las palas del rotor permanecen con un ángulo de ataque fijo. De esta forma se lograra mayor o menor empuje variando la potencia entregada al motor.

Este modo de operación tiene la ventaja de ser mecánicamente muy simple pues no cuenta con el complejo mecanismo para variar el ángulo de ataque de la hélice mientras esta gira a altas RPM.

El inconveniente de este tipo de control radica en que para que varíe el número de revoluciones se requiere un cierto tiempo pues la inercia del rotor (conjunto motor y hélice) juega un papel importante en el tiempo que toma variar el empuje ante un cambio en el control. Adicionalmente para cambiar el sentido del empuje (necesario para pasar del primer al segundo cuadrante) sería necesario cambiar el sentido de giro del motor, lo que representaría un tiempo muerto aun mayor.

Por las razones descritas anteriormente se descarta el uso de esta forma de control en el modelo propuesto.

Variación del empuje “Fu” mediante paso colectivo de la pala:

En este sistema de control las palas del rotor, al contrario que en el control mediante el numero de revoluciones, no se fijan de forma rígida a la cabeza del motor con un ángulo de incidencia previamente elegido, sino que la cabeza del rotor se encuentran unas articulaciones de inclinación de las pala que permiten variar el ángulo de incidencia de las palas del rotor en operación mediante una orden del control.

El numero de revoluciones permanece constante y lo que varia es el ángulo de incidencia de las palas del rotor y con ello se logra tener control sobre el flujo o empuje del propulsor.

La indiscutible ventaja del paso colectivo de la pala reside en que permite controlar directamente los movimientos del péndulo y con un retraso o tiempo muerto bajo (50 milisegundos).

Uno de los requisitos en el control mediante el paso colectivo de la pala es que el usuario deberá controlar de forma independiente el número de revoluciones pues a medida que varía el paso el motor necesitará variar la potencia. Es decir si se requiere mantener el número de revoluciones constante a medida que cambie el paso se deberá modificar la potencia entregada al motor.

Variación del empuje “Fu” mediante paso colectivo de la pala y RPM

Para el presente trabajo se propone utilizar una relación lineal donde se relaciona la salida del controlador “U” con el paso variable de la hélice (Figura 6) y de igual forma una relación lineal por segmentos con pendiente opuesta para rangos de “U” entre 0-500 con pendiente negativa y 500-1000 con pendiente positiva. (Figura 7) para las RPM pedidas al motor.

Con lo anterior se desea mantener constante las RPM del motor independiente del empuje requerido.

Figura 6. Paso vs salida del controlador

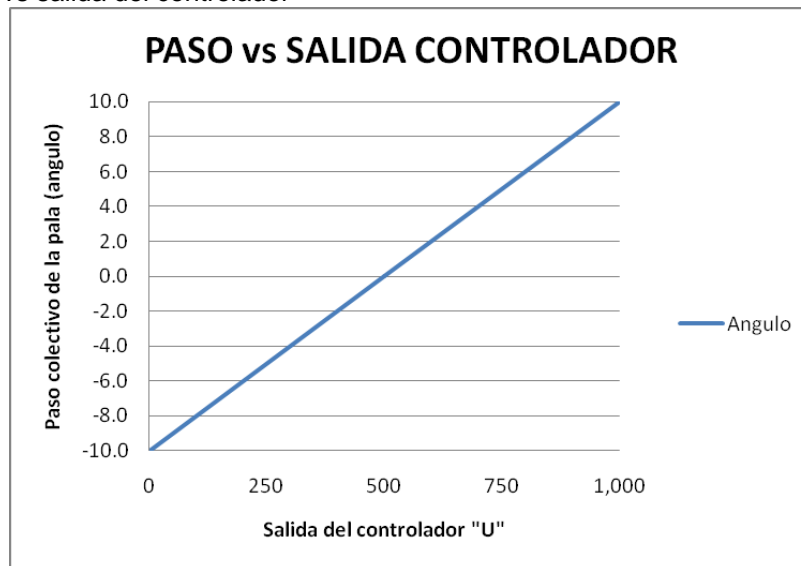
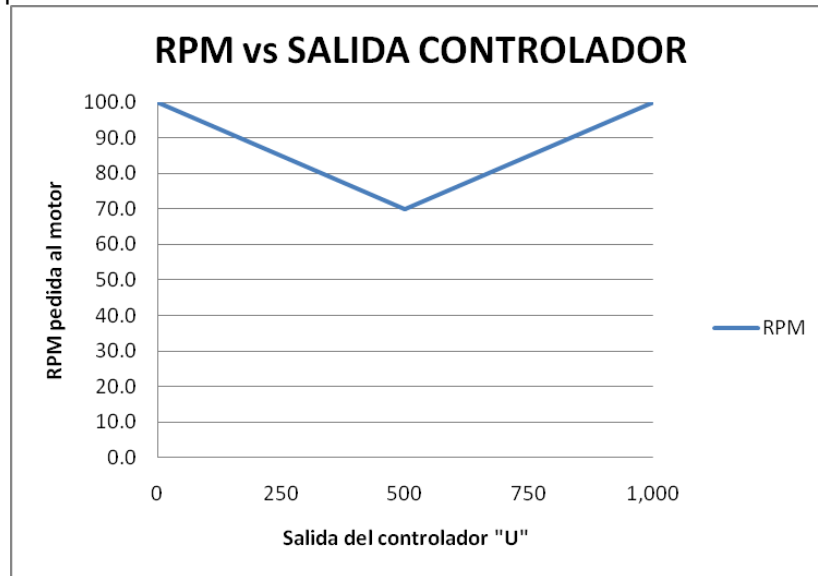


Figura 7. Rpm pedidas al motor vs salida del controlador



Para determinar el empuje estático “Fu” de la unidad propulsora y su relación con la salida del controlador “U”, se tomaron los datos mostrados en la tabla 1.

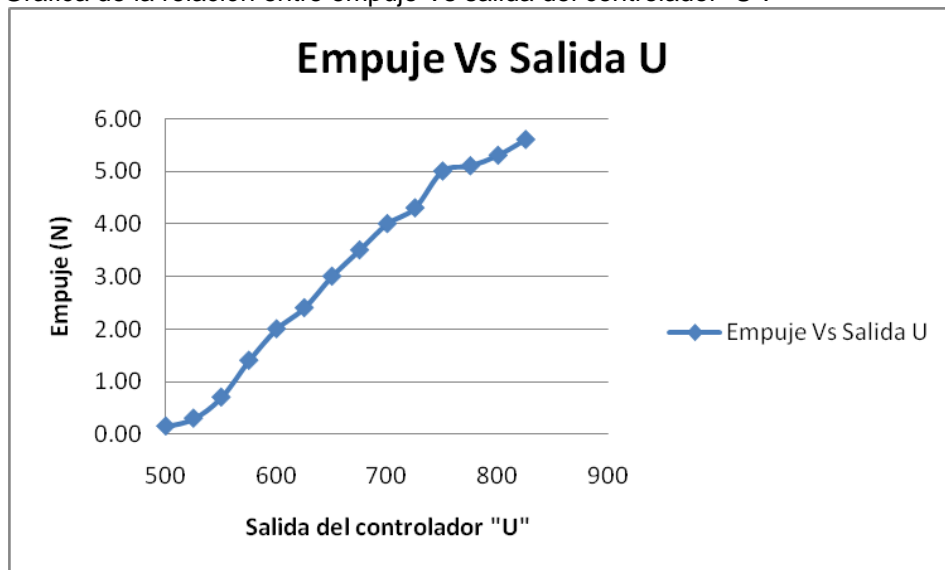
Tabla 1. Relación de empuje Vs salida del controlador “U”.

Salida del controlador “U”	Empuje unidad propulsora en (N)
500	0.15
525	0.30
550	0.70
575	1.40
600	2.00
625	2.40
650	3.00
675	3.50
700	4.00
725	4.30
750	5.00

775	5.10
800	5.30
825	5.60

En la Figura 8. se aprecia una relación aproximadamente lineal entre la salida del controlador "U" y la fuerza de empuje F_u , lo cual simplifica el proceso de diseño del control.

Figura 8. Grafica de la relación entre empuje Vs salida del controlador "U".



8. COMPONENTES DEL PÉNDULO.

El sistema tipo péndulo para evaluación de algoritmos de control está compuesto por tres partes:

- El modelo físico el cual es el péndulo como tal.
- Una tarjeta electrónica.
- El software donde se hace la programación correspondiente.

Algunas características de cada una de las partes son:

8.1. MODELO FÍSICO

Una vez identificadas las necesidades de los estudiantes se inicio el proceso de diseño del péndulo, considerando factores importantes como:

- Versatilidad para el estudio de diferentes algoritmos.
- Uso de componentes normalizados para disminuir el tiempo de ensamble y sustitución de partes.
- Adaptabilidad para nuevos modelos reutilizando las partes existentes.
- Bajo costo.

En la tabla 2 se describen los componentes fundamentales utilizados en la construcción del péndulo.

Tabla 2. Listado de componentes

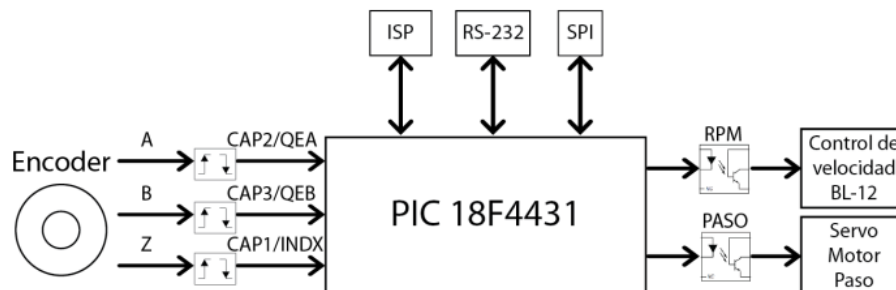
Ítem	Descripción	Marca/Modelo
1	Base o soporte del péndulo	80/20 inc. / diseño propio para el pendulo
2	Tubo de aluminio	Genérico
3	Control de velocidad para motor sin escobillas	Great Planes / BL-12 12 AMP Brushless speed control
4	Motor eléctrico sin escobillas	Great Planes / Rimfire 22M-1000 brushless motor

5	Sistema de hélice de paso variable	Great Planes / V-Pitch, variable pitch prop system
6	Servo motor utilizado para variar el paso de la hélice	Futaba / S3156
7	Encoder incremental con salida A, B, Z de 1024 pulsos/revolución	Dynamics research corp / F21AK8EDB16-1024
8	Batería de LiPo	1200mA 11.4 V Mínimo 15C

8.2. TARJETA ELECTRÓNICA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL.

Una de las partes desarrolladas fue una tarjeta electrónica basada en el micro controlador Microchip 18F4431. Este cuenta con un modulo dedicado para la captura de la señal proveniente del encoder incremental (fase A,B e index), además cuenta con suficientes entradas - salidas digitales, puerto serial y salidas con opción de modulación de ancho de pulso (señales necesarias para el control de velocidad angular y paso o ángulo de ataque de la hélice).

Figura 9. Diagrama bloques tarjeta

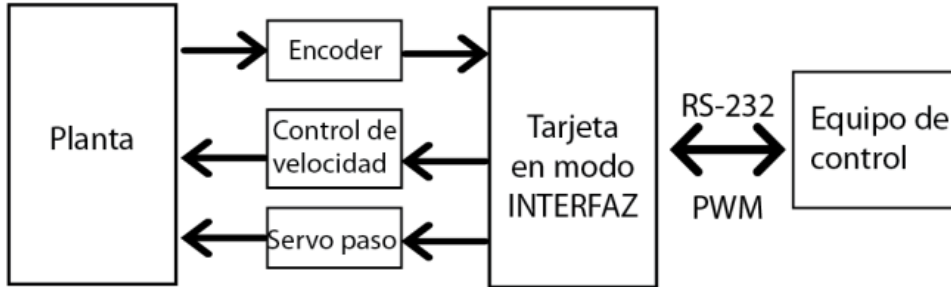


Buscando la compatibilidad del modelo para ser usado en diferentes ambientes de trabajo o según el objeto de estudio, la tarjeta ofrece dos modos de trabajo:

- Como interfaz entre el modelo físico y el equipo de control, donde la función de la tarjeta electrónica de adquisición es adquirir e interpretar los valores que suministra el modelo (ángulo del péndulo) y actuar sobre las variables necesarias (RPM y paso de las palas) según el requerimiento del control.

En este caso el estudiante deberá suministrar el equipo de control y conectarlo a la tarjeta mediante uno de los canales disponibles (RS-232, señal análoga o modulación de ancho de pulso).

Figura 10. Tarjeta en modo interfaz.



- El otro modo de uso es como unidad de control autosuficiente, y en este caso se deberá programar el micro controlador embebido en la tarjeta con el código correspondiente al control y el manejo de los periféricos (encoder, unidad de control de velocidad y ángulo de paso del las palas).
-

Figura 11. Tarjeta en modo Control.

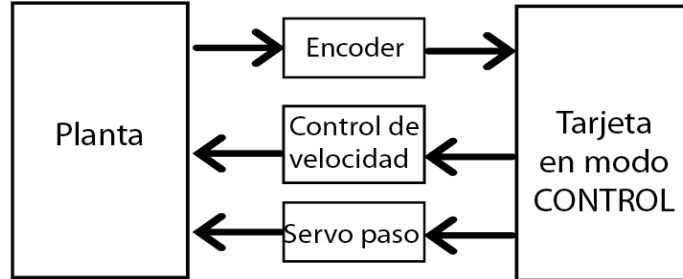
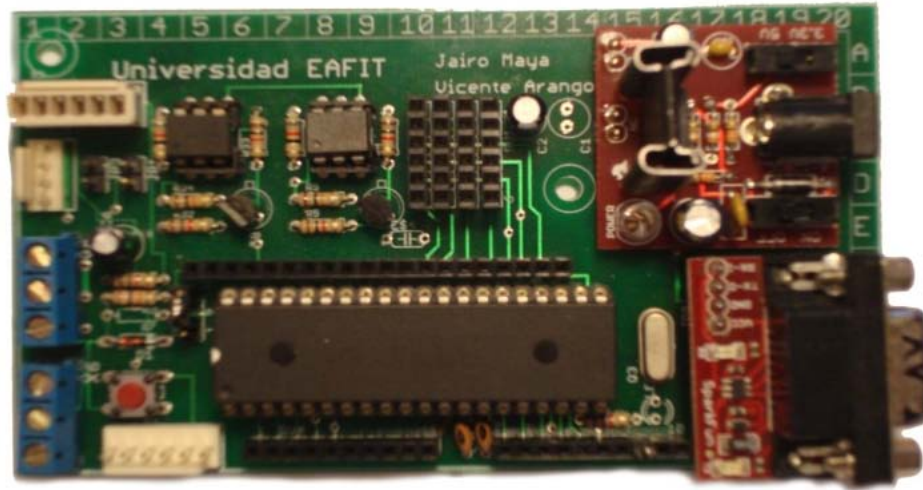


Figura 12. Tarjeta electrónica de interfaz o control



8.3. SOFTWARE

En cuanto al software existen múltiples configuraciones o posibilidades de operación; el algoritmo propuesto fue probado utilizando la tarjeta en modo interfaz y elaborando el control en un PC de escritorio el cual cuenta con el software LabView (National Instruments). La interface hombre máquina se muestra en la figura 12.

Este se comunica vía puerto serial con la tarjeta y permite al estudiante verificar diferentes algoritmos aplicando la teoría aprendida en los diferentes cursos de control o materias afines.

A continuación se describe el pseudocódigo utilizado en la tarjeta y LabView:

Tarjeta en modo interfaz:

Incluir librerías

Definir fusibles

Prioridades interrupciones: timer1, comunicación serial

Interrupción: comunicación serial {

Lectura del puerto serial

Actualización variable paso y RPM

Envío por puerto serial del ángulo de la barra}

```

//((Generador de PWM)
Interrupción: desbordamiento timer 1 {
Salida pin paso=falso
Salida pin RPM=falso
Pin salida + 1
Si pin de salida =2 entonces
Pin salida =0
Fin si}
Función main {
Configuración de puertos
Repetir
Si pin salida =0
Fijar timer 1 (Paso)
Fin si
Si pin salida =1
Fijar timer 1 (RPM)
Fin si
Esperar 5ms
Fin repetir

```

PC de escritorio (LabView)

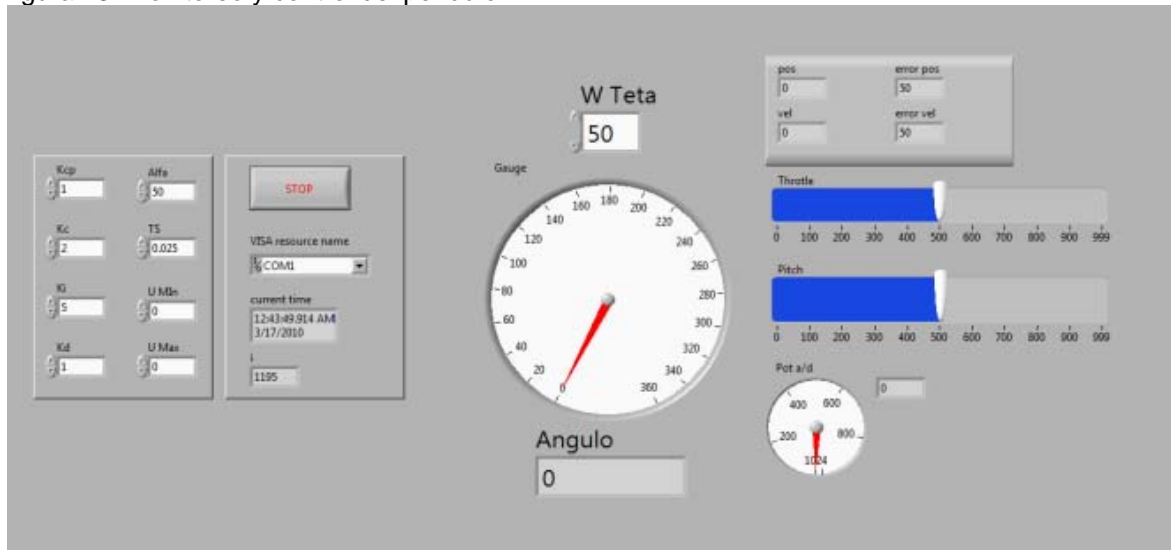
```

Lectura de variables del puerto serial
Actualiza variables muestreo anterior
Velocidad angular = ángulo – ángulo[-1] / TS
Error posición = set point – ángulo
Set point velocidad = Kcp * error posición
Error velocidad = set point velocidad – velocidad angular
UP= Kc * error velocidad
Error vel [i]=Kc * Ki * error velocidad
UI = (UI[-1]+TS) + (error vel [i] + error vel[-1])/2
U=UP+UI
Si U>1000 entonces
U=1000
Fin si
Si U<0 entonces
U=0

```

Fin si
 $U_{saturada} = U$
 Si $U_{saturada} > 500$ entonces
 $RPM = U_{saturada}$
 $Paso = U_{saturada}$
 Fin si
 Si $U_{saturada} < 500$ entonces
 $RPM = 1000 - U_{saturada}$
 $Paso = U_{saturada}$
 Fin si
 Actualiza variable de salida RPM y Paso

Figura 13. Monitoreo y control del péndulo.



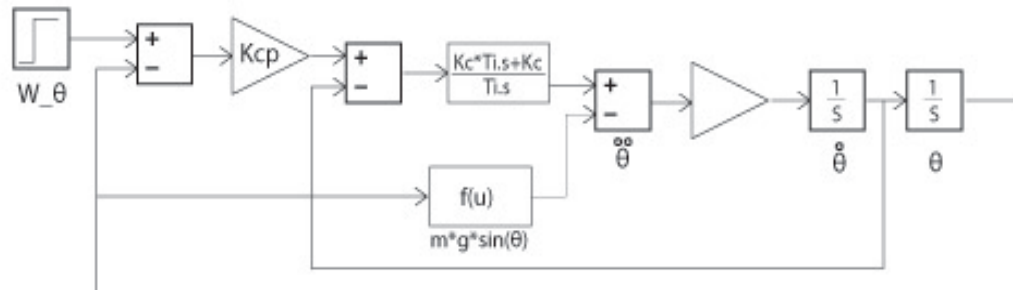
9. CONTROLADORES DEL PÉNDULO.

La componente del peso perpendicular a la barra es:

$$F = mg \sin \theta$$

Por lo tanto para acelerar de manera constante la barra por encima de 90 grados se requiere disminuir la fuerza de empuje a medida que aumenta el ángulo. Por tal motivo se utiliza para este sistema un controlador en cascada como se ilustra en la Figura 14.

Figura 14. Control en cascada

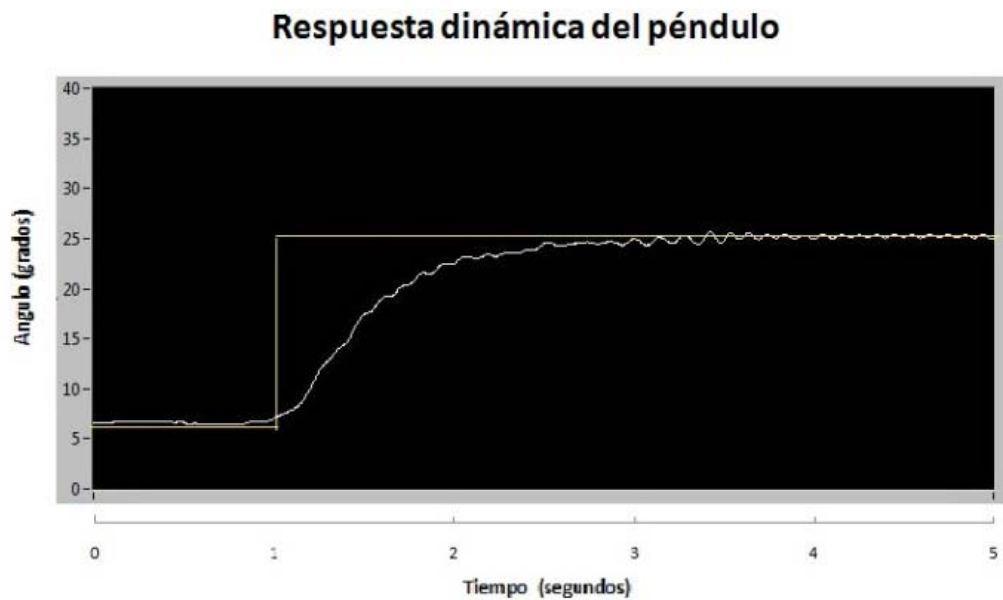


En la entrada del control se da el valor deseado para el ángulo del cual se resta el valor actual del ángulo (teta) para obtener el error que entra al control proporcional P con ganancia K_{cp} y cuya salida será el valor deseado para la velocidad angular. En el ciclo de control interno, al valor deseado para la velocidad angular se resta la velocidad angular actual para encontrar el error que entra al controlador PID para así calcular $U(t)$.

En la Figura 15 se muestra la respuesta del péndulo en cadena cerrada a un cambio escalón de 6 a 26 grados en el valor deseado de posición. Es importante resaltar que el tiempo requerido para realizar este escalón fue aproximadamente 2 segundos y no se presentan oscilaciones apreciables. ($K_{cp}=1.469$ $K_c=1.362$ $T_i=1.1146$).

Con los parámetros anteriores el comportamiento dinámico del péndulo en los demás cuadrantes no es adecuado, razón por la cual se dejará como actividad propuesta para un futuro trabajo de los estudiantes, encontrar los valores adecuados para estos parámetros, para cada uno de los cuadrantes y la realización de un algoritmo dinámico que garantice el desempeño adecuado del péndulo en los cuatro cuadrantes.

Figura 15. Respuesta dinámica del péndulo



10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La utilización de los componentes de la industria del entretenimiento (modelos de radio frecuencia) permitió construir un modelo de bajo costo (menor a \$200 dólares) para facilitar al estudiante aplicar los conocimientos teóricos vistos en clase.
- Con el presente trabajo se deja un camino abierto para que los estudiantes, según sus capacidades continúen el desarrollo de algoritmos de control y mejoras al sistema.
- La posibilidad de configurar la tarjeta diseñada en distintos modos de operación permite que estudiantes de diferentes disciplinas utilicen el péndulo según su necesidad.
- Es responsabilidad de las instituciones educativas adquirir modelos de bajo costo como el propuesto en el presente artículo, para así facilitar el proceso de aprendizaje.
- Se recomienda incorporar un sensor para medir la velocidad angular de la hélice e implementar un control adicional que permita optimizar el consumo de corriente y con ello la vida útil del motor.
- Como actividad propuesta para la capacitación se pide a los estudiantes, encontrar los valores adecuados para los parámetros del controlador, para cada uno de los cuadrantes y la realización de un algoritmo dinámico que garantice el desempeño adecuado del péndulo en los cuatro cuadrantes.

11. ABSTRACT

This paper provides a comprehensive explanation of control algorithms for linear and non linear systems through an electro mechanical pendulum.

In the development of the model, low cost commercial components from the entertainment industry were used. This with the idea of obtaining a practical model for school laboratories and promote the use of interactive study aids.

The design of the pendulum was approached from different areas, system's controls, electric controls and mechanical components.

Keywords: Control, PID, Microcontroller, study aids.

12. BIBLIOGRAFIA

12.1. CLASICA

Pallas, R. (2000). Sensors and signal conditioning. United States of America: Wiley interscienece.

(SMITH@1997)

Smith, Carlos A y Corripio, Armando B. (1997). Control Automático de procesos: Teoría y Práctica. México, Editorial Limusa.

(OGATA@1988)

Ogata, [Katsuhiko](#). (1988). Ingeniería de control moderna. México, Prentice-Hall.

(GENE@2002)

Gene F, Franklin y otros (2002), Feedback control of Dynamic Systems, USA, Prentice-Hall.

(COOPER@2004)

Cooper J, Douglas, (2004) Practical Process Control using control Station, USA, Control Station LLC

(JAIME@2007)

Del Cerro Giner, Jaime, (2007) Arquitectura abierta para el control autonomo y teleoperado de un Mini-Helicptero, Universidad Politecnica de Madrid, Espana.

12.2. INTERNET

EST@,2008

Estructura, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 12 de Abril.
Tomado de la página web:
http://es.wikipedia.org/wiki/Estructural#En_ingenier.C3.ADa

EME@2008

Electromecánica, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 12 de Abril.
Tomado de la página web:
http://es.wikipedia.org/wiki/Electromec%C3%A1nica#Situaci.C3.B3n_actual

ETCA@2008

Electrónica, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 12 de Abril.
Tomado de la página web:
http://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3nica#Aplicaciones_de_la_electr.C3.B3nica

PEND@2009

Pendulo, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 15 de Abril. Tomado de la página web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Pendulo>

PFMA@2008

Plataforma, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 12 de Abril.
Tomado de la página web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Plataforma>

MOT@2008

Motor eléctrico, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 12 de Abril.
Tomado de la página web: http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_elctrico

LED@2008

Diodo emisor de Luz, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 12 de Abril. Tomado de la página web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Led>

PIC@2008

Micro-controlador, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 12 de Abril. Tomado de la página web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Microcontrolador>

ACEL @2008

Acelerometro, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 14 de Abril. Tomado de la página web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Aceler%C3%B3metro>

GYRO@2008

Giroscopio, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 11 de Abril. Tomado de la página web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Gir%C3%B3scopo>

ENCONDER@2008

Enconder, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 12 de Abril. Tomado de la página web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Encoder>

INCL@2008

Inclinometro , [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 12 de Abril. Tomado de la página web: <http://buscon.rae.es/drael/>

AMPL@2008

Amplificador, [online]. San Francisco-EEUU-2008. Consultada el 12 de Abril. Tomado de la página web: http://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador#Amplificadores_electr.C3.B3nicos

ANEXO A. Programa microcontrolador

```
#include <18F4431.h>
#device adc=10
#DEVICE HIGH_INTS=TRUE

#FUSES NOWDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES WDT128         //Watch Dog Timer uses 1:128 Postscale
#FUSES HS             //High speed Osc (> 4mhz)
#FUSES NOPROTECT      //Code not protected from reading
#FUSES IESO           //Internal External Switch Over mode enabled
#FUSES BROWNOUT       //Reset when brownout detected
#FUSES BORV27         //Brownout reset at 2.7V
#FUSES PUT            //Power Up Timer
#FUSES NOCPD          //No EE protection
#FUSES STVREN         //Stack full/underflow will cause reset
#FUSES NODEBUG        //No Debug mode for ICD
#FUSES NOLVP          //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18)
used for I/O
#FUSES NOWRT          //Program memory not write protected
#FUSES NOWRTD         //Data EEPROM not write protected
#FUSES FCMEN          //Fail-safe clock monitor enabled
#FUSES NOWINEN        //WDT Timer Window Disabled
#FUSES T1LOWPOWER     //Timer1 low power operation when in sleep
#FUSES HPOL_HIGH      //High-Side Transistors Polarity is Active-High
(PWM 1,3,5 and 7)
#FUSES NOWRTC         //configuration not registers write protected
#FUSES NOWRTB         //Boot block not write protected
#FUSES NOEBTR         //Memory not protected from table reads
#FUSES NOEBTRB        //Boot block not protected from table reads
```

```

#FUSES NOCPB //No Boot Block code protection
#FUSES LPOL_HIGH //Low-Side Transistors Polarity is Active-High
(PWM 0,2,4 and 6)
#FUSES PWMPIN //PWM outputs disabled upon Reset
#FUSES MCLR //Master Clear pin enabled
#FUSES FLTAC1 //FLTA input is multiplexed with RC1
##FUSES SSP_RC //SCK/SCL=RC5, SDA/SDI=RC4, SDO=RC7
#FUSES SSP_RD //SCK/SCL=RD3, SDA/SDI=RD2, SDO=RD1

#use delay(clock=20000000)
#use rs232(baud=115200,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)

#priority TIMER1,RDA

#define MMC_CLK PIN_D3
#define MMC_DI PIN_D2
#define MMC_DO PIN_D1

#byte porta= 3968
#byte portb= 3969
#byte portc= 3970
#byte portd= 3971
#byte porte= 3972
#byte qeicon= 4022
#byte cap2bufh= 3943
#byte cap2bufl= 3942
#byte cap3bufh= 3941
#byte cap3bufl= 3940

#byte ovdcond= 3947

```

```

#byte ovdcons= 3946
long pos[10];
//int
chanel[10]={0b00000001,0b00000010,0b00000100,0b00001000,0b00010000,0b0
0100000,0b01000000,0b10000000};
int a_ch=0,i;
long tiemp=59103;
char ini=2;
char fin=3;
char ret=13;
char duty;
long valor,ad,encoder,encoder_1;
char recdata[20];
long spi_out, spi_in;
long pitch=550,thro=999,speed=500,cc;

void spi_exchange(int16 out, int16 *in) {
    long i;

    bit_clear(portd,4);
    for (i=0;i<16;i++) {
        output_low(MMC_CLK);
        output_bit(MMC_DO, shift_left(&out,2,0));
        delay_us(1);//mmc_delay_clk();
        shift_left(in,2,input(MMC_DI));
        output_high(MMC_CLK);
        delay_us(1);//mmc_delay_clk();
    }
    bit_set(portd,4);
}

```

```

#int_RDA
RDA_isr()
{
bit_set(portd,0);
gets(recdata);
//thro=(recdata[4]-48)+((recdata[3]-48)*10)+((recdata[2]-48)*100);
cc=recdata[2];
thro=(recdata[4]-48)+((recdata[3]-48)*10)+((cc-48)*100);
cc=recdata[5];
pitch=(recdata[7]-48)+((recdata[6]-48)*10)+((cc-48)*100);
//spi_out=make16(recdata[0],recdata[1]);
//spi_exchange(spi_out,&spi_in);
spi_in=550;
printf("%Lu %4Lu %3Lu %4Ld %3Lu %3Lu",spi_in,encoder,ad,speed,thro,pitch);

bit_clear(portd,0);
}
#int_TIMER1 HIGH
TIMER1_isr()
{

bit_clear(portb,0);
bit_clear(portb,1);
++a_ch;
if (a_ch==2){
a_ch=0;
}

}
}

```

```

void main()
{

    //setup_adc_ports(NO_ANALOGS|VSS_VDD);

    //setup_adc(ADC_OFF|ADC_TAD_MUL_0|ADC_WHEN_INT0|ADC_INT_EVERY_
    OTHER);
    setup_adc_ports(sAN1|VSS_VDD);

    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32|ADC_TAD_MUL_4|ADC_WHEN_INT0|ADC_IN
    T_EVERY_OTHER);
    setup_spi(FALSE);
    //setup_spi(SPI_MASTER | SPI_H_TO_L | SPI_CLK_DIV_16);
    setup_wdt(WDT_OFF);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL);
    //setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_1);
    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
    setup_oscillator(False);

    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(INT_TIMER1);
    enable_interrupts(GLOBAL);

    // setup_power_pwm(PWM_CLOCK_DIV_4 | PWM_FREE_RUN |
    PWM_OVERRIDE_SYNC | PWM_UPDATE_ENABLE |
    PWM_DEAD_CLOCK_DIV_2,1,15000,500,0,1,0);

    // setup_power_pwm_pins( PWM_COMPLEMENTARY , PWM_BOTH_ON ,
    PWM_OFF, PWM_OFF);

```



```

ovdcond= 0;
ovdcons= 0;
qeicon= 0b10110101;
cap3bufh= 0b00010000;
cap3bufl= 0b00000000;
    set_tris_a (0b11111111);
    set_tris_b (0b00000000);
    set_tris_c (0b10111111);
    set_tris_d (0b11100100);
    set_tris_e (0b11111000);
    set_power_pwm0_duty(250);
    set_power_pwm2_duty(1000);
    set_power_pwm4_duty(1750);

    set_adc_channel(1);
    delay_us(10);
bit_set(portd,4);
output_high(MMC_CLK);

for (i=0;i<=8;++i)
{
    pos[i]=59103;
}

while(1){
/*
valor = read_adc();
valor =valor*2;

```

```

set_power_pwm2_duty(valor);
ovdcond= 0b00001000;
delay_ms(50);
ovdcond= 0b00000100;
delay_ms(70);

*/
encoder= make16(cap2bufh,cap2bufl);
speed=encoder-encoder_1;
//ad=read_adc();
ad=555;
pos[0]=(thro*4)+55800;
pos[1]=(pitch*4)+55800;

if (a_ch==0){
    set_timer1(pos[0]);
    bit_set(portb,0);
}

if (a_ch==1){
    set_timer1(pos[1]);
    bit_set(portb,1);
}

encoder_1=encoder;
delay_ms(5);
// pos[1]=(read_adc()*4.2)+55800;

}
}

```