



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

**AUTOMATIZACIÓN DE UN CUERPO DE ACELERACIÓN  
MEDIANTE UN MOTOR A PASOS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECATRÓNICO**

PRESENTA:

**ANTONIO LEONEL HERNÁNDEZ MARTÍNEZ**

DIRECTOR:

**DR. LUIS AGUSTÍN ÁLVAREZ-ICAZA LONGORIA**

**Cd. Universitaria, D. F. 2014**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Mtro. Juan María de la Salud Ocáriz Castelazo

Vocal: Dr. Luis Agustín Álvarez Icaza Longoria

Secretario: Dr. Jesús Manuel Dorador González

1er suplente: Mtro. José Guadalupe Gómez Fuentes

2o suplente: M.I. Guillermo Becerra Núñez

La Tesis se realizó en:

**Instituto de Ingeniería-UNAM**

DIRECTOR DE TESIS:

---

**Dr. Luis Agustín Álvarez-Icaza Longoria**



# Agradecimientos

A mis padres Benito Hernández y Rosario Martínez  
A la Universidad Nacional Autónoma de México



# Índice general

## Índice de figuras

## Índice de cuadros

<b>1. Introducción</b>	<b>15</b>
1.1. Justificación	17
1.2. Estado del arte sobre el control de admisión electrónica	18
1.3. Válvula de admisión de aire	20
1.4. Definición del problema	22
1.5. Objetivo	22
1.6. Descripción del contenido	23
<b>2. Descripción del sistema original</b>	<b>25</b>
2.1. Motor Piaggio 500cc	25
2.2. Principio de funcionamiento del acelerador	26
2.3. Sensor de posición	27
2.4. Entrada de aire	27
<b>3. Diseño del sistema propuesto</b>	<b>29</b>
3.1. Acondicionamiento Mecánico	29
3.1.1. Acoplamiento mecánico	29
3.1.2. Soporte para el motor a pasos	30
3.2. Motor a pasos	31
3.2.2. Selección de motor a pasos	34
3.3. Microcontrolador Xmega128 A1	34
3.3.1. Características	34
3.4. Diseño de programación	37
3.4.1. Señal de posicionamiento angular	37
3.4.2. Identificación de señal de velocidad	37
3.4.3. Configuración de interrupciones	38
3.5. Interfaz de usuario	38
3.6. Diseño de control de velocidad	39
<b>4. Diseño electrónico</b>	<b>43</b>
4.1. Etapa de potencia para motor a pasos	43
4.2. Acondicionamiento de las señales de microcontrolador	44
4.3. Acondicionamiento del sensor de velocidad	45
<b>5. Pruebas y resultados</b>	<b>46</b>
5.1. Resultados experimentales	46
5.2. Controlador PID.	49



<b>6. Conclusiones</b>	<b>51</b>
<b>A. Código del programa del microcontrolador</b>	<b>53</b>
A.1. Archivo Main .....	53
A.2. Configuración del puerto COM para interfaz USB .....	54
A.3. captura de señal de velocidad .....	54
A.4. Posicionamiento angular .....	55
A.5. Controlador PID .....	56

## **Bibliografía**



# Índice de figuras

Fig.1.1. Elementos principales del MCI. 1. Pistón, 2.Biela, 3.Válvula, 4.Bujía, 5. Inyector, 6.Admisión de aire, 7.Escape, 8.Mono bloc.

Fig.1.2. Configuración de válvula

Fig.1.3. Vista de perfil del movimiento de apertura de la válvula mariposa. Cierre completo, Apertura angular, Apertura completa.

Fig.1.4. Conexión tradicional entre acelerador y válvula de admisión de aire.

Fig.2.1. Elementos principales de MCI Piaggio 500cc

Fig.2.2. Cuerpo de acelerador de motor Piaggio 500cc

Fig.2.3. Filtro de aire de motor Piaggio 500cc

Fig.3.1. Acoplamiento: Motor a pasos - Eje de acelerador

Fig.3.2. Soporte para motor a pasos

Fig.3.3. Motor de imán permanente de dos polos y cuatro embobinados

Fig.3.4. Motor de reluctancia variable de 8 dientes y 12 bobinas

Fig.3.5. Estructura de motor a pasos híbrido

Fig.3.6. Diagrama que muestra el movimiento del motor a pasos híbrido

Fig.3.7. Tarjeta de evaluación ATXMega A1

Fig.3.8. Diagrama de bloques de XMEGA 128 A1

Fig.3.9. Censor de efecto hall del motor Piaggio 500cc

Fig.3.10. Interfaz de usuario

Fig.3.11. Diseño general del control de velocidad del sistema propuesto

Fig.3.12. Respuesta a señal escalón para obtener parámetros por Ziegler-Nichols

Fig.3.13. Respuesta a señal escalón para obtener parámetros por Ziegler-Nichols

Fig.3.14. Señal de apertura a 5 grados, se deduce que:  $k_p = 1.4$ ,  $k_i = 0.6$ ,  $k_d = 0.15$

Fig.3.15. Señal de apertura a 7 grados, se deduce que:  $k_p = 1.1$ ,  $k_i = 0.8$ ,  $k_d = 0.2$

Fig.3.16. Señal de apertura a 7 grados, se deduce que:  $k_p = 2.7$ ,  $k_i = 0.7$ ,  $k_d = 0.2$

Fig.4.1. Microstep driver 06AC

Fig.4.2. Amplificador operacional en configuración no inversor

Fig.4.3. Circuito implementado para la captura de la señal de velocidad Fig.5.1. Señal de velocidad correspondiente a una apertura de  $5^\circ$ .

Fig.5.2. Señal de velocidad correspondiente a una apertura de  $7^\circ$ .

Fig.5.3. Señal de velocidad correspondiente a una apertura de  $10^\circ$ .

Fig.5.4. Señal de velocidad correspondiente a una apertura de  $12^\circ$ .

Fig.5.5. Señal de velocidad correspondiente a una apertura de  $14^\circ$ .

Fig.5.6. Señal de velocidad correspondiente a señal escalón de 800 Hz

Fig.5.7. Señal de velocidad correspondiente a señal escalón de 1500 Hz



# Índice de tablas

Tabla.2.1. Características de MCI

Tabla.3.1. Parámetros Ziegler-Nichols



# Capítulo 1

## Introducción

La industria automotriz es la mayor industria en el mundo y se ha transformado a sí misma en términos tanto de sus productos, los automóviles, como en los métodos de producción desde la introducción de los dispositivos electrónicos. El uso de controladores embebidos basados en microprocesadores ha acelerado de manera significativa los procesos de manufactura basadas en robótica en las líneas de ensamble, las máquinas herramientas y el manejo de materiales. Antes de la introducción masiva de los microcontroladores en el mercado, los únicos componentes eléctricos en un automóvil eran el radio, el arrancador, el generador y el sistema de carga de la batería. Los subsistemas de motor, transmisión y frenos eran controlados por medios mecánicos o hidromecánicos. En la actualidad el motor de un automóvil tiene un microcontrolador incorporado que controla el tiempo y la cantidad de inyección de combustible basado en la información que entregan los sensores de carga, velocidad, emisiones, temperatura y presión en “tiempo real”. De este modo mejora la eficiencia de combustible, se reducen emisiones y aumenta el desempeño.

La mayoría de todos los dispositivos mecánicos tradicionales en los automóviles se han convertido en la actualidad en dispositivos electromecánicos.

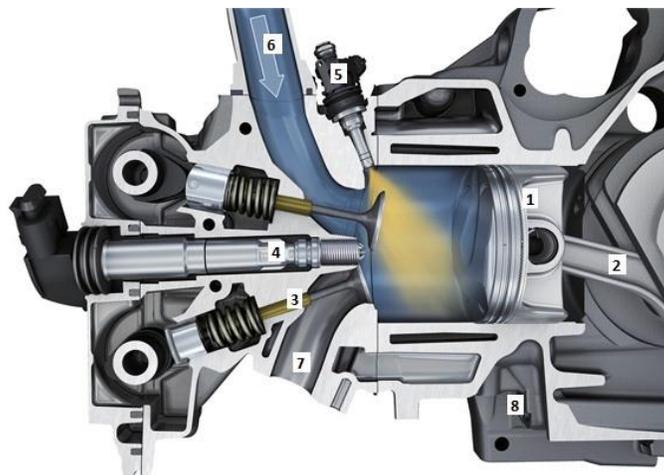


Fig.1.1. Elementos principales del Motor de Combustión Interna (MCI). 1. Pistón, 2.Biela, 3.Válvula, 4.Bujía, 5. Inyector, 6.Admisión de aire, 7.Escape, 8.Mono bloc.

La evolución de los motores a lo largo de la historia ha tenido tendencias de acuerdo a los requerimientos de la sociedad. Actualmente uno de los factores de mayor importancia es el consumo de combustible. En los últimos años, la optimización en el uso de los recursos ha requerido una atención importante debido al incremento en el costo y a la escasez del petróleo. En el entorno del transporte, se trata de cambiarlo por algún combustible que provenga de energías renovables o de reducir su consumo para que la operación sea más

económica. Lo anterior es el motivo principal para el desarrollo de las tecnologías de los vehículos híbridos.

En los vehículos convencionales, que solo cuentan con el motor de combustión interna (MCI), al variar la velocidad, el motor se mueve constantemente dentro de su rango de operación y esto impacta de manera negativa sobre la eficiencia. Además, los incrementos de carga repentinos producen un aumento del consumo de combustible y de emisiones. En los vehículos híbridos debido a la fuente alternativa de potencia, es posible controlar el rango de operación del motor de combustión, para mantenerlo en una región de alta eficiencia, donde el consumo de combustible sea menor y se disminuyan las emisiones. Además, en el vehículo híbrido es posible aprovechar la energía del frenado, almacenándola en la batería cuando la máquina eléctrica actúa como generador. Esta energía se pierde en un vehículo convencional.

Se ha comprobado que se contribuye de manera importante a la optimización de los vehículos convencionales si se implementan sistemas electrónicos para asistir o sustituir a los sistemas mecánicos. En general a esta tendencia se le conoce como “sistema por cable”, y tiene como objetivo principal evitar la conexión mecánica entre el mando y los sistemas sobre los que estos actúan, es decir, sustituye los componentes tradicionales tales como las bombas, mangueras, bandas, fluidos y cilindros, por sensores y actuadores electrónicos.

Los sistemas “por cable” ya se han implementado en diferentes áreas del transporte como los trenes, aeronaves y desde luego en la industria automotriz. En 1987, BMW presentó la segunda generación del “serie 7” (conocida como E32) el cual implementó un sistema electrónico para el acelerador (BMW The Secret Seven, 2009), este dispositivo es también conocido como “mariposa motorizada”. Esta es una tecnología que reemplaza las conexiones convencionales entre el pedal de aceleración del vehículo y el cuerpo de la válvula de admisión de aire del motor. En la actualidad la mayoría de los automóviles usan sensores de posición para determinar el movimiento del plato de la válvula, cada vez que el pedal de aceleración es activado por el conductor.

En la actualidad el sistema de admisión de aire se ha vuelto más complejo, ya que se han añadido un conjunto de sensores, por medio de los cuales el control electrónico de la válvula determina la apertura necesaria del conducto de admisión. Estos sensores pueden ser de posición del pedal de aceleración, velocidad del motor, carga o potencia y velocidad del vehículo. Las variables censadas permiten generar una evaluación que envía una señal para posicionar a la mariposa con la asistencia de un actuador impulsado por un pequeño motor eléctrico.

Los beneficios principales del control electrónico de la mariposa son la rapidez y precisión, características que colaboran con la transmisión y el sistema de emisión para lidiar rápidamente con los cambios repentinos en el ambiente, temperatura, presión atmosférica y humedad, los cuales normalmente se encuentra fuera de la percepción del conductor.

Actualmente, la aplicación de sistemas electrónicos no se limita al control de velocidad del automóvil, ya que también se han implementado en otros sistemas como los frenos, el volante, además de sensores adicionales (proximidad, obstáculos) que pueden asistir al conductor para mejorar su control en la conducción del vehículo.

Este trabajo tiene el propósito de implementar un sistema electrónico para la válvula de admisión de aire en un motor de combustión con el fin de realizar pruebas de control de velocidad, y coadyuvar en la construcción de un banco de pruebas para el motor de combustión.

## **1.1. Justificación**

En los últimos años hemos vivido una escalada en los precios del petróleo. La realidad muestra que los combustibles fósiles suponen el 80% de la energía primaria demandada en el mundo, porcentaje escasamente inferior al mostrado en 1973 cuando representaban el 86%. Décadas después de las crisis de los años setenta, la matriz mundial de demanda energética, si bien es más equilibrada, sigue descansado en los combustibles fósiles.

Es indudable que se está dando una progresiva sustitución del petróleo, un recurso natural e inevitablemente extinguido, por otras fuentes energéticas alternativas, pero el ritmo está siendo muy lento. Si se consiguiera esta diversificación, la dependencia del mundo respecto del petróleo se atenuaría, contribuyendo, de esta manera, a rebajar la tensión geopolítica actual; además, la demanda de petróleo se reduciría y, consiguientemente, los precios. Paradójicamente, el elevado precio del petróleo y sus expectativas de agotamiento constituyen uno de los principales estimulantes para el ahorro y la eficiencia energética, el desarrollo de otras fuentes energéticas y las grandes inversiones de prospección y explotación en el propio sector petrolero. En cuanto a las energías renovables, lo cierto es que se están desarrollando débilmente, y mientras que en los países industrializados el uso del petróleo para la generación de electricidad está disminuyendo, en los países en vías de desarrollo la tendencia es prácticamente la contraria.

Indudablemente la diversidad de fuentes energéticas es la base de un sistema energético fuerte. Para ello es primordial desarrollar nuevas fuentes de energía, así como mejorar procesos para obtener mayores rendimientos, lo que está estrechamente ligado con el desarrollo tecnológico en este ámbito, que también determinará qué nuevas opciones energéticas están disponibles y qué mejoras de eficiencia pueden introducirse en los servicios energéticos (CEET, 2008).

Por las razones mencionadas, en la actualidad se tiene la premisa de optimizar el uso de la energía para el transporte. Se busca generar avances tecnológicos que contribuyan a reducir el impacto de las emisiones sobre las condiciones ambientales, sobre todo en las grandes ciudades, en donde existe una gran concentración de vehículos.

La UNAM realiza investigaciones acerca de vehículos híbridos, buscando distintas alternativas para optimizar el uso del combustible. Ejemplo de esto, es el diseño y construcción de un banco de pruebas, que tiene como objetivo principal probar un sistema de propulsión híbrido con una configuración serie-paralelo. En este banco se probarán nuevas estrategias para distribuir el flujo de potencia entre la máquina eléctrica y el motor de combustión interna.

Las ventajas del empleo del control de velocidad electrónico es importante y atractivo ya que proporciona beneficios al medio ambiente y a la economía de la población. Por lo tanto, la elaboración de esta tesis ayuda a conseguir la implementación de tecnologías recientes y contribuye a la investigación de nuevas estrategias o sistemas que optimicen el uso de los combustibles.

## **1.2. Estado del arte sobre el control de admisión electrónica**

A continuación se mencionarán algunos trabajos realizados del control de la admisión de aire el cual generalmente es implementado con motores de corriente directa (CD). Se verá que los trabajos tienen una aplicación específica en su desarrollo, lo que indica la utilidad que puede tener el control de la válvula de admisión:

De acuerdo a Paolo Mercorelli, (2009) en los sistemas de inyección clásicos, la eficiencia del motor y las emisiones son afectadas por el control del plato de la mariposa, en particular por su posición angular. Este artículo considera dos problemas; el primero es el diseño de un observador de velocidad basado en mediciones de la corriente. La posición angular se alcanza a través de una operación en cascada entre el estimador de velocidad y el sistema eléctrico. Esta propuesta permite evitar una estructura más compleja para el observador y el uso de sensores voluminosos. El segundo problema es la robustez del sistema de seguimiento. Este trabajo presenta un regulador proporcional derivativo (PD), que compensa el error causado por la medición y retroalimentación inexacta.

Según Quyang Zeng, (2011), un cuerpo de aceleración regula el flujo de aire que alimenta al motor de combustión. Sin embargo, por la existencia de no linealidades incluyendo la fricción, resorte no lineal, es difícil controlar esta válvula. En este artículo se propone un controlador PID no lineal, donde se ajustan constantemente los parámetros de ganancia considerando el cambio en el error. Los resultados experimentales muestran que el ajuste en tiempo real de los parámetros del controlador PID asegura un seguimiento satisfactorio de la señal de referencia en la válvula mariposa.

En Ting Wang, (2010), se tiene el objetivo de mejorar la mezcla aire-combustible, considerando que hay una evaporación de combustible inyectado, debido a los estados transitorios del motor, es decir, aquellos estados en donde se tiene una variación de velocidad y de potencia. Un control PID difuso se implementó en el Cuerpo de Aceleración Electrónico (CAE) y se ligó a la inyección de combustible considerando la variación del ángulo de la válvula del cuerpo de aceleración. Al realizar la implementación del sistema de control los resultados mostraron que el máximo error en la razón de mezcla fue de 5%, mientras que sin el control de inyección fue de 20%, por lo tanto se mejora el proceso. Las pruebas se realizaron haciendo que el motor acelerara y la presión se incrementara en proporción al ángulo de apertura de la válvula, por lo que la velocidad de vaporización de la capa de combustible se reducía y la mezcla de gases disminuía.

La teoría de control es un conocimiento que se puede aplicar ampliamente al funcionamiento del motor de combustión, en MezaAguilar, (2013) se presenta una ley de control que toma en cuenta la dinámica del actuador, un motor CD. El MCI es controlado por algoritmo de retroalimentación. Entonces, la señal de entrada del controlador (ángulo de mariposa) es usada como una señal de referencia para el actuador, el cual es operado a través de un motor CD. Un controlador de módulos deslizantes de alto orden es aplicado al actuador para poder seguir la señal de entrada del controlador para finalmente regular la velocidad de MCI.

Hay una serie de factores externos o ambientales que afectan a los actuadores utilizados en los automóviles que tienen que funcionar en diferentes ambientes con un amplio rango de temperaturas, ruido, disturbios y vibraciones de señales y fuentes de alimentación que hacen difícil satisfacer los requerimientos de velocidad y confiabilidad en el control angular, para mejorar la seguridad en la implementación de los actuadores, en Jian Wu, (2012) se presenta un algoritmo para diagnóstico de fallas basado en la estimación de parámetros, que usa una versión simplificada del modelo de un motor CD para minimizar el cálculo computacional.

Los trabajos presentados son evidencia de que el control electrónico de la válvula de admisión es un requerimiento importante, ya que en la actualidad la precisión y la optimización son factores cruciales en los procesos. Además, la interacción entre los variados dispositivos que se han integrado a la tecnología de control, hace necesaria la implementación de un sistema automático que conjunte las variables necesarias para el correcto funcionamiento del sistema. En la industria automotriz, el uso de estos dispositivos es cada vez más amplio, por esto la válvula de admisión electrónica es un requerimiento para hacer más eficiente el uso de combustible, así como para lograr un uso más cómodo del automóvil ya que permite asistir al usuario en la activación del plato de admisión, considerando variables como la velocidad de salida del MCI. El acondicionamiento mecánico y electrónico de la válvula es necesario para lograr una activación automatizada, favoreciendo la optimización de procesos a través de este sistema de control. Cabe mencionar que la tarea a realizar en esta tesis se enfoca en la implementación de un motor a pasos para automatizar el plato de admisión de aire, este actuador se considera como una tecnología adecuada y versátil para el control de la válvula de admisión, así también se tiene el objetivo de conseguir el control de velocidad del MCI.

La revisión bibliográfica elaborada ayuda a tener un panorama mejor del uso y acondicionamientos que se han realizado en una válvula de admisión de aire.

### 1.3. Válvula de admisión de aire

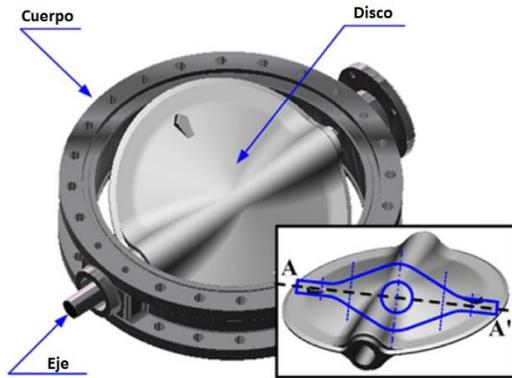


Fig.1.2. Configuración de válvula

La válvula de admisión es también conocida como válvula mariposa, o simplemente mariposa, está formada por un disco de metal cruzado diametralmente por un eje que le permite girar, pudiéndose inclinar en el conducto de admisión para permitir que pase más o menos aire.

Cuando está muy abierta (la superficie del disco es paralela al eje del conducto de aire) permite mayor paso de aire y proporciona mayores cantidades de mezcla aire-combustible al motor

por lo que este desarrolla más potencia y tiende a acelerar. Pero si la válvula de mariposa está poco inclinada para estrangular u obturar la mayor parte del paso de aire, entonces sólo son suministradas pequeñas cantidades de mezcla y el motor produce menos potencia.

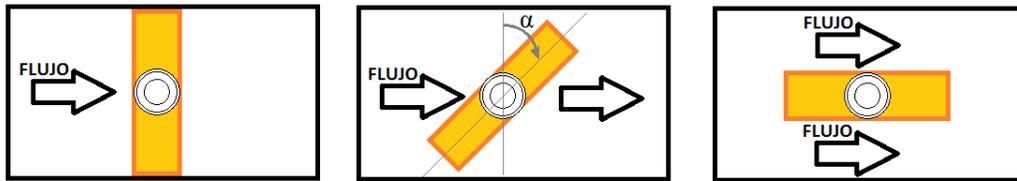


Fig.1.3. Vista de perfil del movimiento de apertura de la válvula mariposa  
Cierre completo, Apertura angular, Apertura completa.

La mariposa está conectada con el pedal acelerador, situado en el compartimiento del conductor por un acoplamiento mecánico. El acoplamiento puede consistir de una serie de palancas y varillas, o palancas y cable interconectados. Con cualquiera de las disposiciones el movimiento del pedal del acelerador hace que la válvula de aire varíe su posición en la cámara admisión. De esta manera el conductor puede colocar la mariposa de manera que su posición sea adecuada a los requisitos del funcionamiento.

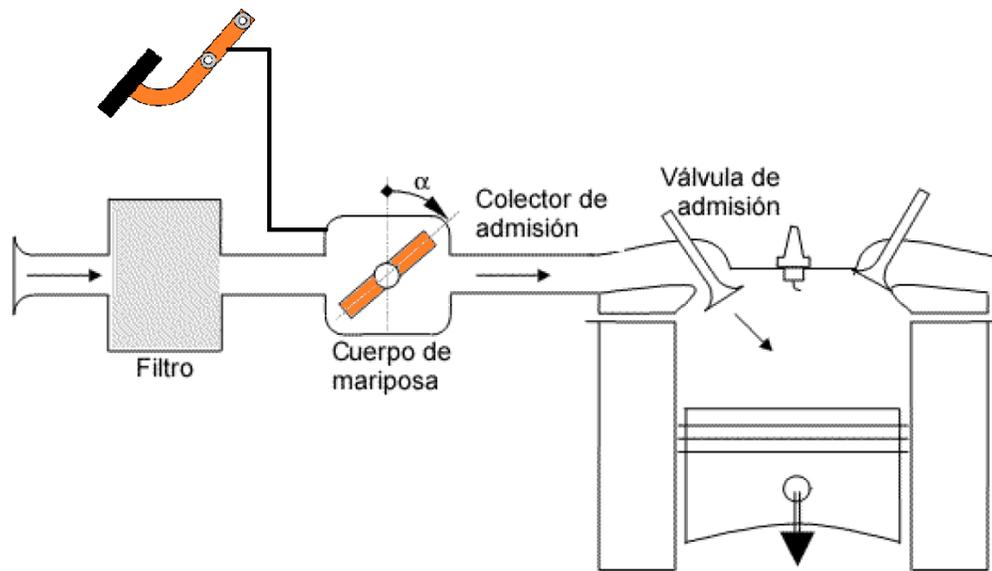


Fig.1.4. Conexión tradicional entre acelerador y válvula de admisión de aire.

Las válvulas de barril y las válvulas deslizables son otras dos configuraciones que a veces se encuentran en los cuerpos del acelerador, regularmente como aplicaciones para los autos de carreras.

Las válvulas de barril y las deslizables permiten mayor flujo de aire que las válvulas de mariposa, pero no controlan el aire tan bien. Incluso cuando están completamente abiertas, la placa y palanca del acelerador de la válvula de mariposa bloquean una cierta cantidad de aire. Adicionalmente, la placa del acelerador de la válvula de mariposa provoca turbulencias en el flujo de aire, lo que puede ser negativo cuando están montadas muy cerca de la cabeza del cilindro o del inyector de combustible. La turbulencia que viene de la placa del acelerador puede girar alrededor como un mini tornado, dejando un punto muerto de aire justo detrás. Si este punto muerto coincide con el lugar del inyector de combustible, entonces el combustible no se mezclará con la corriente de aire, lo que conduce a una quema irregular de combustible en la cámara de combustión y un desempeño pobre. Sin embargo, esta turbulencia también ayuda a que la válvula de mariposa sea más precisa que los otros tipos de válvula. Es por esta razón que las válvulas de barril y deslizables son utilizadas casi exclusivamente en los motores poderosos y con altas revoluciones por minuto; los conductores de automóviles de carreras están regularmente completamente sobre o completamente fuera del acelerador, por lo que la naturaleza de encendido/apagado de este tipo de válvulas no impacta negativamente en el desempeño.

El desarrollo de la válvula de mariposa es más reciente que otro tipo de válvulas. Una mayor conciencia en el ahorro energético y mejoras tecnológicas favoreció su introducción, ya que su pérdida de carga es pequeña.

El funcionamiento básico de las válvulas de mariposa es sencillo pues sólo requiere una rotación de 90° del disco para abrirla por completo. La operación es como en todas las válvulas rotativas rápida. Poco desgaste del eje, poca fricción y por tanto un menor par, que resulta en un actuador más barato. El actuador puede ser manual, hidráulico o motorizado eléctricamente, con posibilidad de automatización. La geometría de la válvula de mariposa es sencilla, compacta y de revolución, por lo que es una válvula barata de fabricar, tanto por el ahorro de material como la mecanización. El menor espacio que ocupan facilita su montaje en la instalación. En este sentido, las válvulas de compuerta y globo resultan muy pesadas y de geometría compleja. Cuando la válvula está totalmente abierta, la corriente circula de forma aerodinámica alrededor del disco.

Las válvulas de mariposa pueden estar preparadas para admitir cualquier tipo de fluido gas, líquido y hasta sólidos. A diferencia de las válvulas de compuerta, globo o bola, no hay cavidades donde puedan acumularse sólidos impidiendo la maniobrabilidad de la válvula.

## **1.4. Definición del problema**

Se ha mencionado que uno de los principales procesos para el mejoramiento de los medios de transporte, se enfoca en el ahorro de combustible, para lo cual se necesitan que los motores de combustión tengan un buen desempeño. Este trabajo es parte del proyecto del banco de pruebas para un vehículo híbrido eléctrico en el cual se requiere realizar pruebas con diferentes señales de velocidad que arrojarán los datos necesarios para evaluar los beneficios y las mejoras que se deberán realizar en el diseño de vehículos más eficientes.

El sistema de admisión de aire actual no permite controlar automáticamente el posicionamiento angular, por ello uno de los retos es emplear un sistema electrónico que permita ajustar la apertura y mantener la velocidad del MCI en la referencia deseada.

## **1.5. Objetivo**

Acondicionamiento del cuerpo de aceleración de un MCI para la implementación de un control electrónico de la válvula de admisión de aire, con el fin principal de controlar velocidad del MCI.

## 1.6. Descripción del contenido

A continuación se presenta una descripción general del contenido de cada capítulo.

En el primer capítulo se presenta la introducción que busca dar un panorama general del tema de tesis. En este apartado también se trazan los objetivos acotando los problemas, necesidades y soluciones posibles. Se dan las razones de por qué es importante dar solución al problema planteado.

En el segundo capítulo se describe el motor de combustión utilizado en este trabajo, haciendo especial enfoque en la válvula de admisión de aire, la cual es la que se automatiza, también se consideran los dispositivos principales que conforman el sistema con el propósito de presentar el funcionamiento de estos componentes y dejar claro los aspectos sobre lo cual se tendrá que trabajar para lograr las pruebas de control de velocidad.

El tercer capítulo muestra el diseño e implementación de las tecnologías que se usaron para acondicionar a la válvula de admisión de aire. En la primera parte se encuentra el diseño de la parte mecánica del nuevo sistema que contempla el acoplamiento mecánico y el soporte necesario para el motor a pasos. Seguido de esto, se exponen las características del microcontrolador utilizado, así como el diseño de programación para generar y capturar las señales de control, se describe la interfaz gráfica que mostrará los datos requeridos y por último se mencionan las características del controlador implementado.

En el cuarto capítulo se muestran los circuitos que se implementaron para acondicionar las señales de salida y entrada al microcontrolador, así como la distribución de puertos correspondientes para cada señal.

En el quinto capítulo se muestran y analizan los resultados de las pruebas realizadas a un motor de combustión ya con el acondicionamiento de la válvula de admisión de aire. Las primeras pruebas se realizan para obtener la relación entre ángulo y velocidad controlando el ángulo de apertura de la mariposa y registrando su velocidad correspondiente; usando los resultados para determinar los parámetros del controlador PID. La segunda etapa de pruebas se enfoca en verificar la respuesta del motor al controlador diseñado, con referencias de velocidad fijadas por señales de escalón.

En el sexto y último capítulo se enuncian las conclusiones y se da el panorama del trabajo que resta por hacer.



## Capítulo 2

### Descripción del sistema original

En este segundo capítulo se describe el motor de combustión utilizado en este trabajo, haciendo especial enfoque en la válvula de admisión de aire, la cual es la que se automatiza, también se consideran los dispositivos principales que conforman el sistema con el propósito de presentar el funcionamiento de estos componentes y dejar claro los aspectos sobre lo cual se tendrá que trabajar para lograr las pruebas de control de velocidad.

#### 2.1. Motor Piaggio 500cc

El objetivo de esta tesis es automatizar un motor de combustión, para esto se concentra en el acondicionamiento del MCI de una motocicleta el cual se presenta a continuación así como sus características principales:

Motor Piaggio 500cc
Número de cilindros: 1
Número de tiempos: 4
Tipo de enfriamiento: líquido
Masa del motor: 56kg
Incluido: sistema de inyección
No incluido: llanta trasera
Poder máximo nominal: HP:39, kW:28.6 a 7250rpm medido en el cigüeñal HP:33, kW:24.3 a 7250rpm medido en la transmisión
Torque máximo nominal: Kgm:4.1, Nm:40.4 a 6000rpm medido en el cigüeñal Kgm:3.5, Nm:34.3 a 6000rpm medido en la transmisión

Tabla.2.1. Características de MCI

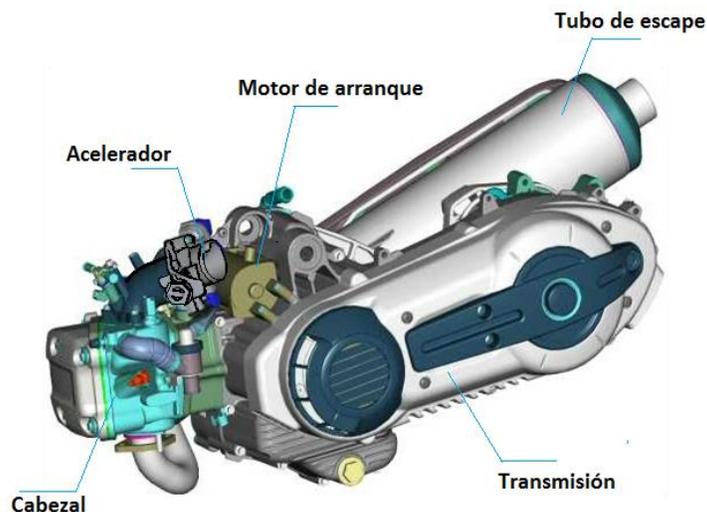


Fig.2.1. Elementos principales de MCI Piaggio 500cc

## 2.2. Principio de funcionamiento del acelerador

Un motor de combustión interna aumenta y disminuye su potencia por medio del mecanismo de obstrucción-apertura, es decir el acelerador, el cual controla la entrada de los gases necesarios para la combustión. En este caso específico, la válvula reguladora que controla directamente la cantidad de aire que entra en el motor también forma parte del sistema que controla la carga de quemado (aire-combustible) en cada ciclo dirigido por el inyector de combustible, manteniendo una relación de aire/combustible relativamente constante. En un vehículo de motor de combustión, el conductor es el que dirige el movimiento de la válvula de aire por medio de un sistema mecánico conocido como pedal del acelerador.

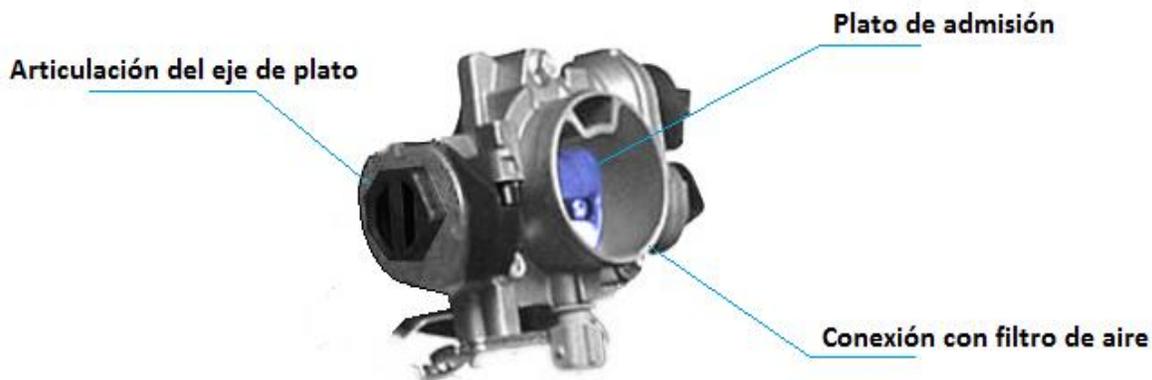


Fig.2.2. Cuerpo de acelerador de motor Piaggio 500cc

En motores de combustión, la válvula de mariposa se encuentra en la entrada del colector de admisión, o alojado en el cuerpo del acelerador.

La implementación de sistemas electrónicos para el control del acelerador es una de las aplicaciones más recientes para los vehículos con motor de combustión, en el cuál el acelerador sigue siendo mecánico, pero con la intervención de una unidad de control electrónico que redirige la posición de la mariposa para encontrar un estado óptimo con el fin de evitar la emisión de contaminantes y maximizar el rendimiento.

La pieza más grande en el interior del cuerpo del acelerador es el plato, que es una válvula de mariposa el cual regula el flujo de aire con la intervención del pedal, que se encuentra en la cabina del conductor. Por lo general, hay un conjunto de sensores que detectan el flujo de aire y posición, los cuales envían señales para controlar la inyección de combustible con el fin de obtener la relación deseada de aire-combustible, así también para verificar el correcto funcionamiento.

El sistema de la válvula de admisión de aire, también puede contener válvulas y ajustes para controlar el caudal de aire mínimo en reposo.

La mayoría de los automóviles tiene un solo cuerpo de admisión de aire, pero existen también autos que emplean más de uno, los cuales se encuentran concatenados entre sí con el objetivo de mejorar la respuesta del acelerador. En los autos de rendimiento extremo, como el E92 BMW M3 y motocicletas de alto rendimiento como la Yamaha R6; utilizan un cuerpo de acelerador por separado para cada cilindro, a menudo se les llama, cuerpos de aceleración individuales o ITB (Individual Throttle Bodies por sus siglas en inglés).

### 2.3. Sensor de posición

El sensor de posición de la válvula de admisión de aire es usado para monitorear la posición del plato de admisión. El sensor usualmente se encuentra en eje de la válvula mariposa de modo que puede detectar directamente la posición del plato de admisión. Existen dispositivos avanzados para monitorear la posición, los cuales se usan para mantener un flujo mínimo en estado de reposo.

Hay sistemas que, también, incluyen un sensor de apertura completa, comúnmente usado en los sistemas de transmisión automática, lo cuales tienen como objetivo alcanzar una mejor eficiencia en la combustión comparando la posición del acelerador y la apertura de la mariposa.

Los sensores modernos ya no son de contacto físico, pueden ser inductivos, magnéticos, ópticos, resistivos, entre otros. En el caso de los sensores de potenciómetro, un sensor de metal de tipo manecilla que hace contacto con una cinta resistiva, y cambia su posición de contacto de acuerdo al movimiento del plato de admisión, la resistencia resultante es usada como dato de entrada para la unidad de control del motor.

### 2.5. Entrada de aire

El cuerpo de admisión de aire cuenta con un conducto que permite recibir el volumen de aire dirigido por la válvula de mariposa. Por este conducto fluye el aire que pasará a la cámara de combustión del motor, previo a este conducto el aire pasa por un filtro que elimina las partículas innecesarias para la combustión.

Un filtro de aire es un dispositivo que elimina partículas sólidas como por ejemplo polvo, polen y partículas del aire. Los filtros de aire son útiles ya que la calidad de aire es relevante, especialmente en motores tales como los de combustión interna, compresores de gas, compresores para bombas de aire, turbinas de gas y demás.

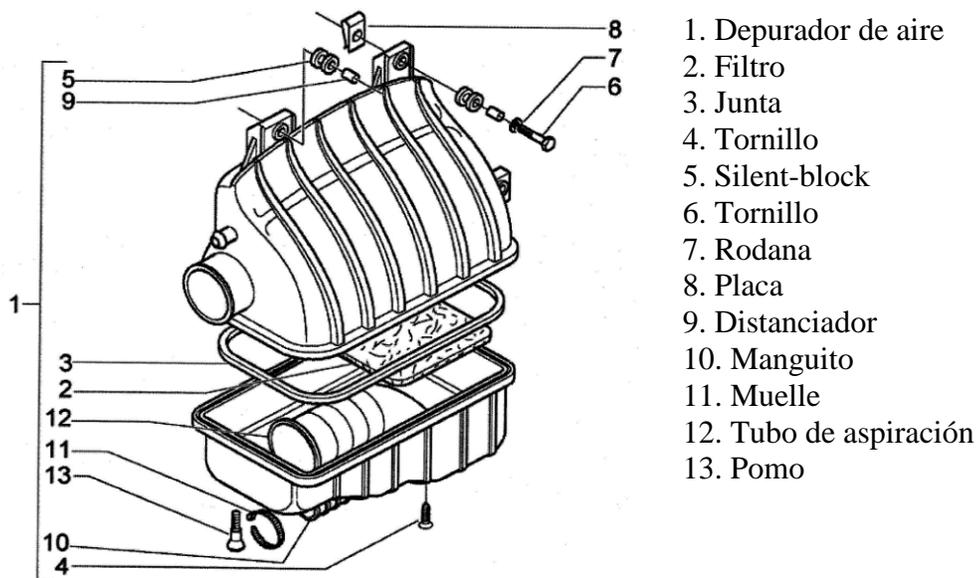


Fig.2.3. Filtro de aire de motor Piaggio 500cc

Los filtros de aire tienen un extenso uso, por ejemplo en edificios, así como aeronaves y otros entornos creados por el hombre (ej. satélites o lanzaderas espaciales) utilizan filtros a partir de espuma, papel plegado, o fibra de vidrio cruzada. Otro método usa fibra o elementos con carga eléctrica estática, que atraen las partículas de polvo. Las tomas de aire de motores de combustión interna o de compresores suelen usar fibras de papel, espuma o algodón. Los filtros bañados en aceite han ido desapareciendo. La tecnología para los filtros en las tomas de aire de turbinas de gas ha avanzado significativamente en los últimos años, gracias a mejoras en la aerodinámica y dinámica de fluidos.

El filtro de aire de combustión evita que materias abrasivas penetren en el cilindro del motor, que pudieran provocar un desgaste mecánico o contaminación del aceite del motor. La mayoría de los vehículos con inyección de combustible se sirven de un filtro de papel plegado de forma plana. El filtro suele instalarse dentro de un recipiente de plástico conectado al cuerpo de la válvula de aceleración por medio de un tubo.

## Capítulo 3

# Diseño del sistema propuesto

En este tercer capítulo se muestra el diseño e implementación de las tecnologías que se usaron para acondicionar a la válvula de admisión de aire. En la primera parte se encuentra el diseño de la parte mecánica del nuevo sistema que contempla el acoplamiento mecánico y el soporte necesario para el motor a pasos. Seguido de esto, se exponen las características del microcontrolador implementado, así como el diseño de programación para generar y capturar las señales de control, por último se describe la interfaz gráfica que mostrará los datos requeridos.

### 3.1. Acondicionamiento Mecánico

El control de posición del plato de admisión de aire deberá actuar con precisión, generando las condiciones necesarias para poder controlar la apertura y cierre del mismo, además de mantener un acoplamiento firme con el motor a pasos que lo activará. En las siguientes secciones se describen cada uno de los elementos que pertenecen al acondicionamiento mecánico, comenzando por el acoplamiento actuador-mariposa.

#### 3.1.1. Acoplamiento mecánico

El objetivo principal del acoplamiento mecánico entre el motor eléctrico, en este caso motor a pasos, y el plato de la válvula de admisión de aire, es poder controlar la apertura y cierre de la mariposa, para lo cual se debe considerar que hay que vencer la resistencia de los resortes presentes y así también mantener una posición estable al paso del aire cuando el motor se encuentre funcionando.

Por practicidad la elección del acoplamiento fue basado en la geometría del elemento externo que se encuentra unido al eje del plato de la válvula de admisión, el cual es un hexágono, que además de permitir un acoplamiento no destructivo también posibilitó la implementación de un dado hexagonal para tuercas, que es una herramienta convencional en el mercado, el tamaño de este dado es de 1 1/8", este dado se acopló satisfactoriamente al elemento externo del eje de la mariposa y a su vez se acopló al eje de motor a pasos por medio de un tornillo transversal al eje.

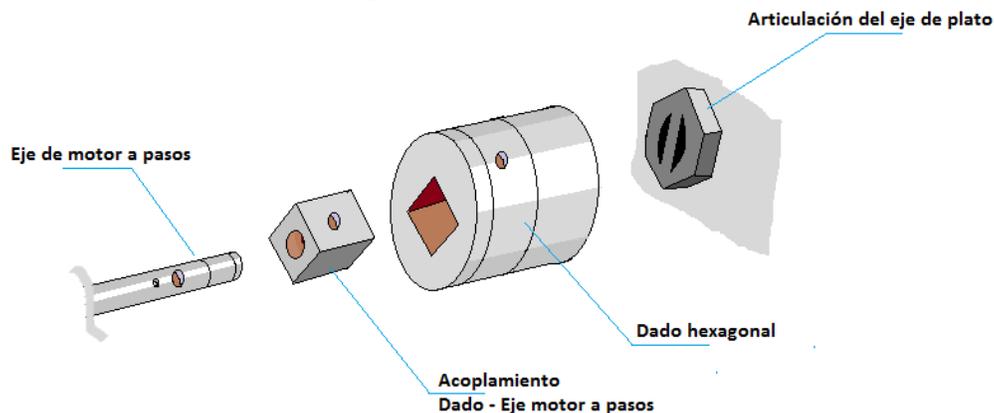


Fig.3.1. Acoplamiento: Motor a pasos - Eje de acelerador

### 3.1.2. Soporte para el motor a pasos

Para soportar y acoplar el motor al eje del plato de la válvula de admisión, se requirió la construcción de una base. Los principales requerimientos que esta debe de poseer son: una configuración geométrica que se pueda atornillar al MCI y que permita alinear adecuadamente el eje del motor con el eje del plato, además de permanecer a la distancia justa para que el “cople” (dado hexagonal) quede empalmado con el elemento externo del plato de admisión de aire.

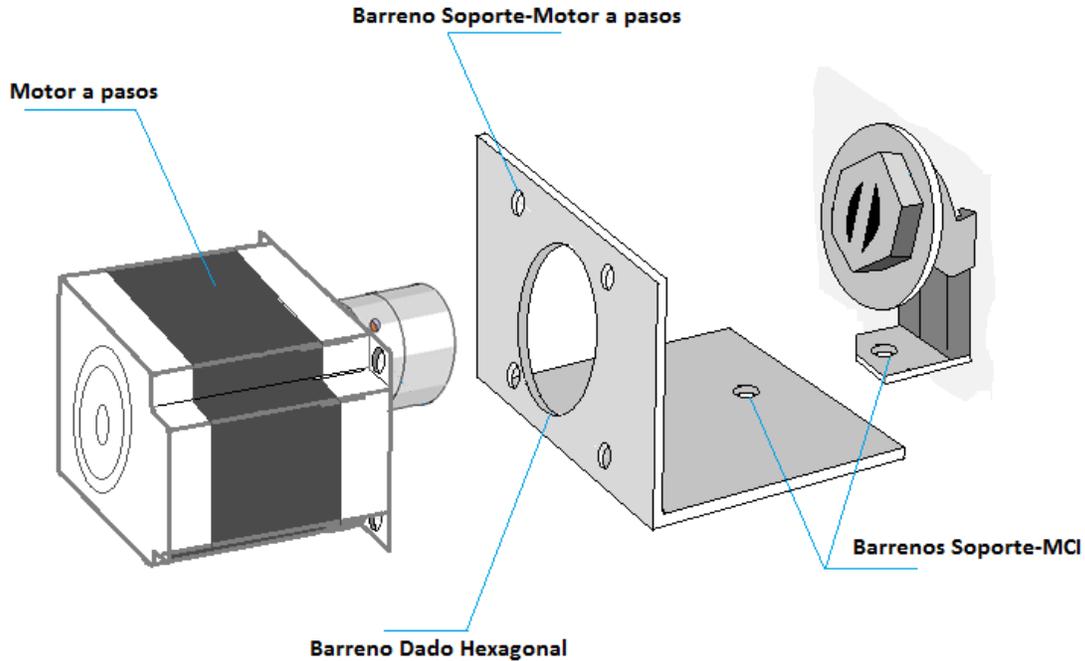


Fig.3.2. Soporte para motor a pasos

En la configuración de la base, mostrada en la Fig.3.2, la placa mostrada será la que soporte directamente al motor, fijado a esta mediante un conjunto de 4 tornillos con un diámetro de 0.2". Por otro lado, a través de la perforación circular que se observa, saldrá el eje del motor para conectarse al eje del plato de la válvula con la ayuda del cople mecánico antes mencionado.

Para fijar esta base, se realizó una perforación de 1/2" para atornillarlo a un sitio cercano del motor de combustión, como se indica en la imagen.

### 3.2. Motor a pasos

El motor a pasos es un dispositivo que convierte una serie de impulsos eléctricos en movimientos mecánicos proporcionales. Cada revolución de eje del motor a pasos es realizada a través de pasos discretos. Un paso es definido como la rotación angular producida por la salida del eje cada vez que es que el motor recibe un pulso eléctrico.

Este tipo de motores son ampliamente usados en controles digitales y en robótica por tener alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento.

Los motores a pasos tienen varias aplicaciones en la industria, incluyendo periféricos de computadoras (lector de disco, impresora), máquinas de oficina (copiadoras, clasificador de tarjetas), procesos de control (líneas de ensamblaje, dispensadoras) y en herramientas (taladros, cortadoras laser, soldadoras automáticas), por mencionar algunos.

En el mercado se usan principalmente tres tipos de motores a pasos, de imán permanente, reluctancia variable e híbridos.

Los motores de imán permanente, operan por medio de la reacción entre el rotor magnetizado de forma permanente y el campo electromagnético del estator. En la Fig.3.3. se muestra una configuración básica de dos polos. La separación entre los embobinados y la superficie del rotor son limitados, por lo cual solo habrá un número determinado de dientes del rotor que se alineen con la bobina energizada. El número de dientes del estator y rotor determinan el paso angular que se moverá cada vez que la polaridad de los embobinados cambie. A más cantidad de dientes, más chico será el paso angular.

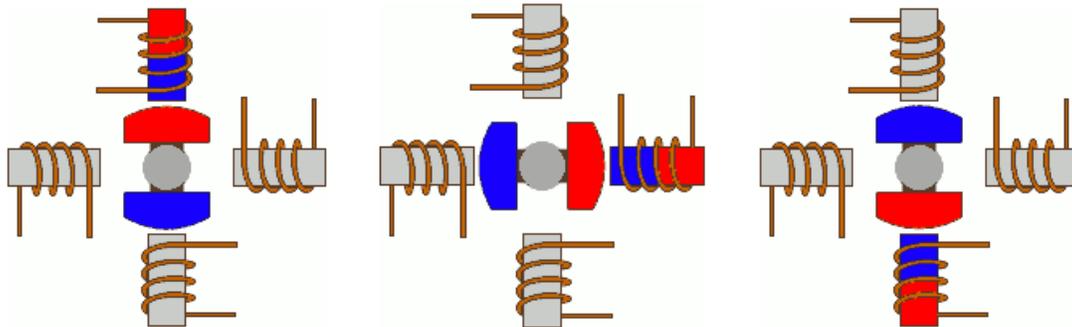


Fig.3.3. Motor de imán permanente de dos polos y cuatro embobinados

Cuando un motor de imán permanente recibe una señal constante de voltaje continuo en una de sus bobinas, el rotor supera el torque residual y se alinea con el campo magnético de la bobina. El torque de retención es definido como la cantidad de torque requerido para girar el rotor a un paso completo con el estator energizado. Una característica importante de los motores de imán permanente es que pueden mantener el torque indefinidamente mientras el rotor está detenido. Cuando las bobinas no están energizadas, se genera una pequeña fuerza magnética entre el estator y el rotor. Esta fuerza es conocida como residual o torque detenido. Este torque puede percibirse rotando el eje manualmente, generalmente corresponde a una décima del torque de retención.

El segundo tipo de motores a pasos, es de reluctancia variable, difiere del imán permanente ya que su rotor no es un imán y por lo tanto no hay toque residual que se oponga al giro cuando el motor se encuentra apagado. Cuando las bobinas son energizadas, el rotor se alinea con las bobinas energizadas, alternando la activación estas bobinas el motor cambia a una nueva posición. El estator de reluctancia variable, está constituido por un núcleo magnético junto con una serie láminas de acero. La relación entre el ángulo, dientes de rotor y bobinas del estator es expresado a través de la siguiente ecuación:

$$\alpha = (N_e - N_r / N_e N_r) 360^\circ$$

Donde  $\alpha$  : paso angular

$N_e$ : número de bobinas del estator

$N_r$ : número de dientes de rotor

En la Fig.3.4. se muestra una configuración de ocho dientes y doce bobinas, en el cual el rotor tiene menos dientes que bobinas, esto asegura que solo un conjunto específico de dientes coincidan en dado instante.

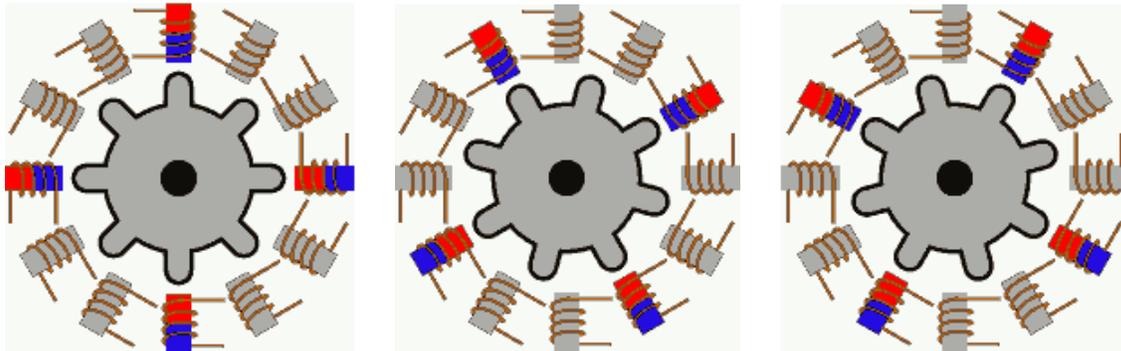


Fig.3.4. Motor de reluctancia variable de 8 dientes y 12 bobinas

De acuerdo con la ecuación 2.1, el rotor mostrado en la figura anterior gira  $15^\circ$  por cada impulso aplicado. Como se puede ver se genera una secuencia de activación para los 6 pares de bobinas para girar el rotor en sentido horario y se usa la secuencia contraria para moverlo en sentido anti horario.

El actuador usado en este trabajo es un motor a pasos híbrido, el cual se caracteriza por tener varios dientes en el estator y en el rotor, el rotor con un imán concéntrico magnetizado axialmente alrededor de su eje. Se puede ver que esta configuración es una mezcla de los tipos, de reluctancia variable (RV) e imán permanente. La principal diferencia con motores RV es que sólo se alinea un diente de rotor con un embobinado cuando en motor híbrido pueden alinearse varios dientes de rotor con el mismo embobinado. (IndustrialElectronics-Simpson1996)

El motor híbrido consiste en un estator dentado y un rotor de tres partes, que son dos piezas de polos separados por un imán permanente, con los dientes opuestos desplazados en una mitad de un salto de diente para permitir una alta resolución de paso angular.

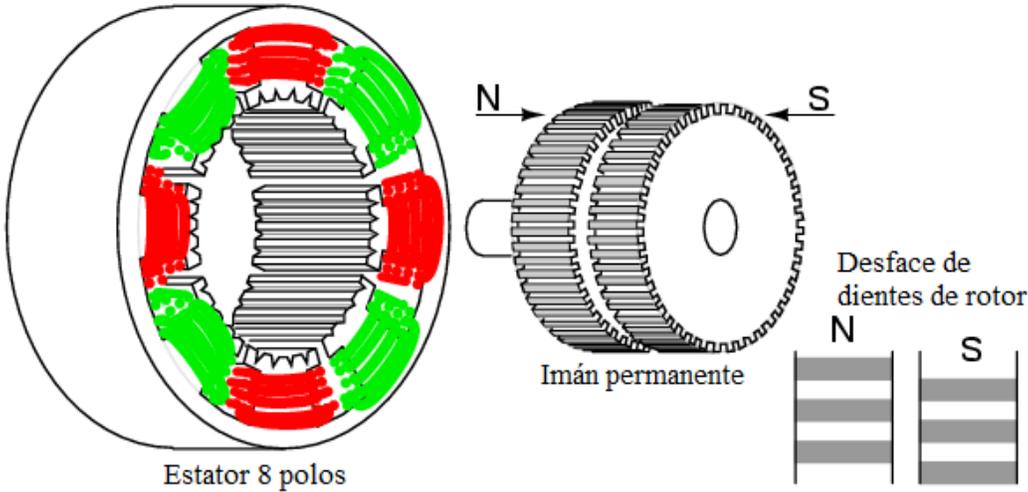


Fig.3.5. Estructura de motor a pasos híbrido

Este tipo de motor tiene una alta precisión y alto par y se puede configurar para suministrar un paso angular tan pequeño como 1.8°.

Los motores a pasos son clasificados en términos del número de pasos por segundo (razón de paso), el paso angular y el torque ofrecido en N-m. La velocidad actual del motor depende del ángulo y la razón de paso, el cual es calculado con la siguiente ecuación:

$$N = (\text{paso angular}^\circ)(\text{paso por segundo}) / 6$$

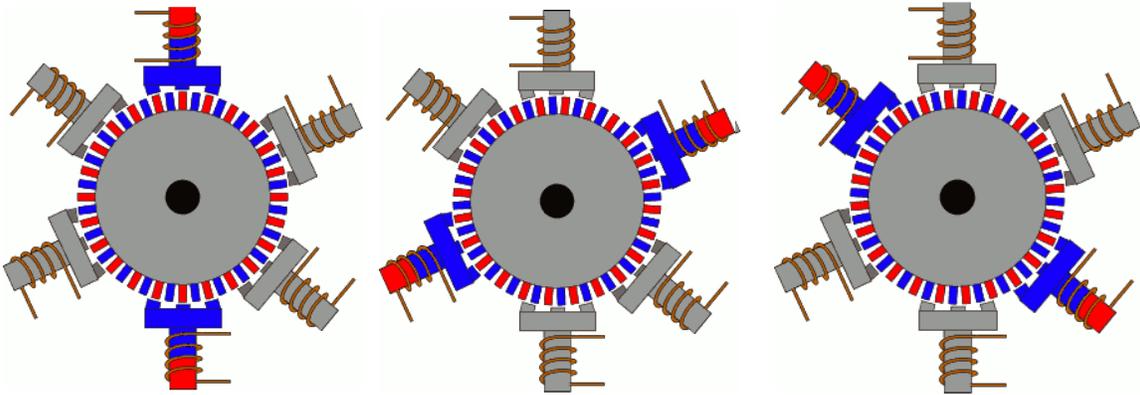


Fig.3.6. Diagrama que muestra el movimiento del motor a pasos híbrido

### **3.2.1. Selección de motor a pasos**

Para la selección del motor a pasos usado en este trabajo se realizó una prueba en cuanto al torque requerido para girar el plato de la válvula de admisión, para realizar este proceso se utiliza un dinamómetro de resorte, el cual registró la fuerza aplicada al girar el plato de admisión hasta su posición final (posición de apertura completa), el radio de giro usado para esta medición es el radio que tendrá el acoplamiento mecánico, es decir de 1 1/8" (2.8 cm), esto permite seleccionar un motor con suficiente potencia para mantener el plato de admisión de una posición estable. Al realizar la medición se registró un torque de 58.8 [N.m], esto se relaciona con la potencia eléctrica continua ( $P = V \cdot I$ ) que debe tener el motor a pasos, el cual debe ser al menos de 58.8 [W].

### **3.3. Microcontrolador Xmega128A1**

El uso de un microcontrolador (uC) es fundamental para este trabajo ya que es el dispositivo que registra y opera las señales que se distribuyen en todo el sistema. Este elemento es un circuito integrado que contiene un procesador, memoria (ROM, RAM) y periféricos (Entrada/Salida) programables. Los uC han sido diseñados para aplicaciones integrales, en contraste con los microprocesadores usados en las computadoras personales y otras aplicaciones de propósito general. Los uC son usados en productos automatizados, tales como en el sistema de control del motor de un automóvil, en implantes médicos, controles remotos, máquinas de oficina, electrodomésticos, herramientas y embebidos en otros sistemas. Para reducir el volumen y el costo, comparado con sistema que usa un microprocesador, los uC realizan el control digital de hasta varios dispositivos y procesos, algunos uC llegan a usar una magnitud de palabra de hasta cuatro bits y una frecuencia de reloj tan bajo como 32kHz para un consumo bajo. Así también son aptos para retener funcionalidades, es decir, esperar por la ejecución de eventos para activar algún proceso, algunos ejemplos de estos detonadores son la presión de botones, uso de registros, actualización variables u otro tipo de interrupción, esto permite que sean usados en aplicaciones en donde requiere una buena optimización de energía, plenamente también son ideales para ser usados en procesos en donde se requiere un procesamiento crítico, en los cuales es necesario operar señales a altas velocidades y requerir un alto consumo de energía.

#### **3.3.1. Características**

Para la aplicación en este trabajo se empleo el microcontrolador ATXmega128A1, este pertenece a la familia de uC AVR de la compañía ATMEL, se caracteriza por ser un uC de baja-energía, alto rendimiento y periféricos de 8/16 bits, basado en la arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Code). Este uC ejecuta complejas instrucciones en un solo ciclo de reloj, alcanzando un millón de instrucciones por segundo (MIPS), esto permite al programador; ajustar el consumo de energía con la velocidad de procesamiento.



Fig.3.7. Tarjeta de evaluación ATXMega-A1

El CPU AVR combina una consistente estructura de programación con un conjunto 32 registros de propósito general, estos registros están conectados directamente con la unidad lógica aritmética (ALU por sus siglas en inglés), esto permite que dos registros independientes puedan ser accedidos en una sola instrucción, ejecutado en un ciclo de reloj. Esta familia de uC está provista de las siguientes características:

- Pines programables 78
- Voltaje de operación de 1.6 - 3.6 V
- Memoria de datos de 128 kB
- EEPROM de 2 kBytes
- Controladores de DMA (Direct Memory Access por sus siglas en inglés)
- Sistema de detección de eventos
- Timers/Counters de 16 bits
- Comunicación SPI
- Convertidores Analógicos Digitales
- Convertidores Digitales Analógicos
- Pines de entrada-salida para interrupciones externas
- Frecuencia de operación de hasta 32 MHz
- Interfaz de programación y depuración de código: JTAG, PDI (Program and Debug Interface por sus siglas en inglés)

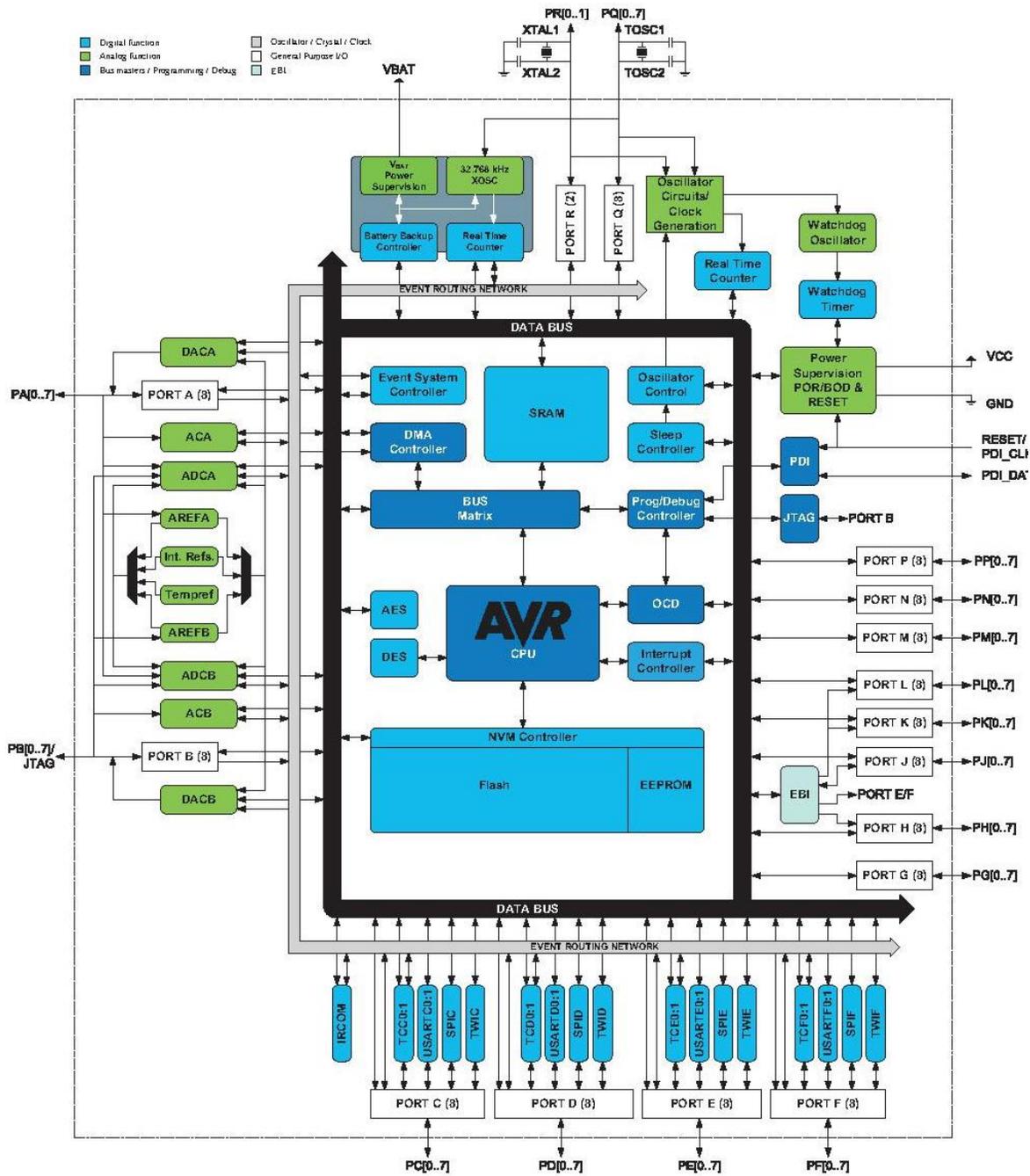


Fig.3.8. Diagrama de bloques de XMEGA 128 A1

En la Fig.3.8. se presenta un diagrama de bloques presentando todos los periféricos disponibles en ella, además de los enlaces que existen entre los puertos de salida existentes y los periféricos mencionados anteriormente.

### 3.4. Diseño de programación

La automatización del motor de combustión se basa principalmente en dos señales, los cuales corresponden a la posición angular de la válvula de admisión de aire y la velocidad del motor. El registro y operación de estas señales es realizada por el microcontrolador. El diseño de programación es generado en una secuencia lógica de tareas que se deben ejecutar cada cierto periodo de tiempo.

#### 3.4.1. Señal de posicionamiento angular

La señal de entrada del sistema es la posición angular del acelerador ya que, como se ha comentado en capítulos anteriores, este tiene un impacto determinante en la velocidad del MCI, esta señal es enviada por el uC por dos de sus puertos, configurados como salidas, activados de forma individual, ya que uno manda la señal para un giro dextrógiro y otro para el levógiro. La salida de estos puertos es una onda cuadrada con una magnitud de 0 y 3.6V a una frecuencia constante de 700Hz, frecuencia a la que sigue funcionando de adecuadamente el motor a pasos, como se especifica en la hoja de datos. La cantidad de pulsos enviada por estos puertos tiene una equivalencia con el ángulo, el cual depende de las divisiones (micropaso) que se le programe al paso base del motor, que es de 1.8 grados, para llevar un control y determinar el ángulo del motor. En la programación se almacena una variable que guarda el número de pulsos enviados, operando estos datos como una adición o sustracción dependiendo del movimiento angular de que se trate.

Esta señal emitida por el uC pasa por una etapa de potencia para poder ser detectado por el driver del motor a pasos, esta etapa se explica en el siguiente capítulo.

#### 3.4.2. Identificación de señal de velocidad

El MCI cuenta con un sensor de efecto hall embebido en el cigüeñal, este elemento se encarga de informar la velocidad del motor emitiendo un pulso por cada excitación magnética generado por los dientes de un engrane ubicado en esta sección del cabezal, la característica de esta señal es de una amplitud que varía de 5V a 12V dependiendo de la magnitud de la velocidad.

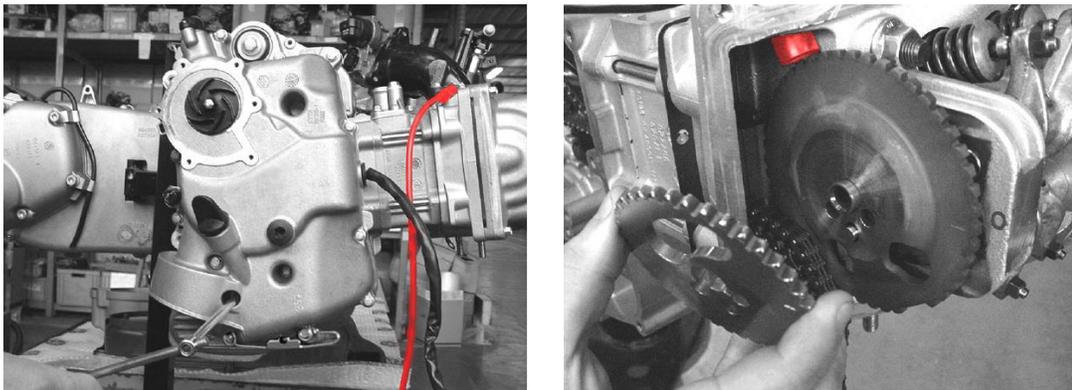


Fig.3.9. Censor de efecto hall del motor Piaggio 500cc

La magnitud de esta señal pasa por una etapa de acondicionamiento para mantener su magnitud a un voltaje de 3.6V ya que este es el voltaje que soporta el microcontrolador, el circuito para este sensor se especifica en el siguiente capítulo.

### **3.4.3. Configuración de interrupciones**

El primer paso en la programación del uC es la especificación de las interrupciones, la cual indica el nivel de prioridad que tendrán las funciones. Estos niveles se establecen dentro de los estándares establecidos por el uC los cuales son: bajo, medio y alto. A partir de este paso lo que sigue es configurar los periféricos, es decir, especificar en la programación cual será la función de cada puerto y cada uno de los pines, para de esta manera buscar una organización adecuada de los pines que se utilizan. A continuación se describe el procedimiento y las características que se consideraron para capturar y producir las señales:

Posicionamiento angular: en la generación de esta señal se declaran dos pines en modo de salida, los cuales corresponden al puerto F, PIN0 PIN1. El encendido de estos pines se realiza de forma coordinada, encendiendo solamente uno a la vez, ya que el movimiento del plato se efectúa sólo en una dirección por vez.

Señal de velocidad: esta señal es tomada del sensor de efecto hall que se encuentra en el MCI. Para capturar este dato se establece un Timer/Counter (TC), este contador puede ser usado para diferentes funciones, pero en este caso se configura en modo de captura de frecuencia, esta composición se activa por flancos de subida y bajada por parte del sensor de velocidad. Este dato es almacenado en el registro de contador de 16 bits para ser usado después en controlador implementado.

Señal de referencia de velocidad y ángulo: la señal de referencia se cambia desde el software por el usuario, ya que estos valores son almacenados en dos variables que permiten ordenar al microcontrolador para que alcance los valores solicitados.

## **3.5. Interfaz de usuario**

La interfaz de usuario es el medio de comunicación entre el usuario y la máquina. Este canal de comunicación debe generar una interacción amigable e intuitiva. En este caso el software a través del cual se programa el microcontrolador es ATMEL STUDIO 6.0 que proporciona un entorno compacto y fácil de usar para escribir, compilar y “debugear” las aplicaciones escritas en C/C++ o en código ensamblador para microcontroladores Atmel.

Este entorno de programación ofrece la posibilidad de mandar datos a través de la conexión USB mostrando el valor de las variables requeridas por medio de un emulador de terminal que viene incluido. Los datos de velocidad y posicionamiento angular son valores numéricos que se muestran al usuario para revisar el correcto funcionamiento de la programación, así también para evaluar el estado actual de los sensores al verificar que hay una correspondencia lógica entre el valor mostrado en la terminal y el posicionamiento físico.

En la siguiente figura se muestra la interfaz de usuario usada para mostrar y registrar los datos de las mediciones realizadas con el microcontrolador:

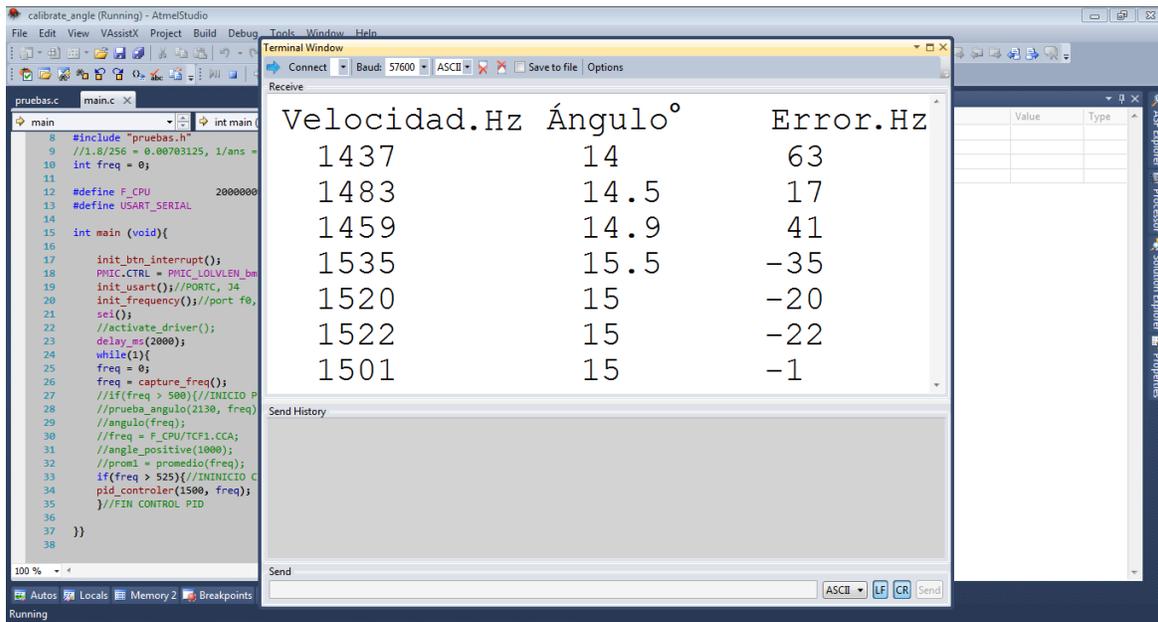


Fig.3.10. Interfaz de usuario

### 3.6. Diseño del control de velocidad

Para realizar el control de velocidad, se ajusta la apertura angular del acelerador dependiendo de la magnitud de la velocidad del MCI y la velocidad de referencia. Si la velocidad de referencia es mayor, la apertura angular sigue aumentando, de lo contrario la apertura disminuye. El mecanismo que se usa en este caso es un controlador PID con retroalimentación que calcula la desviación o error entre la velocidad medida y el valor que se requiere obtener. El algoritmo de control se da por medio de tres parámetros distintos: proporcional, integral y derivativo. El término básico en el controlador PID es el proporcional P, que origina una actuación de control correctiva proporcional al error.

El término integral I brinda una corrección proporcional a la integral del error. Esta acción tiene la ventaja de asegurar que en última instancia se aplicará suficiente acción de control para reducir el error de regulación a cero. Sin embargo, la acción integral también tiene un efecto desestabilizador debido al corrimiento de fase agregado.

El término derivativo D da propiedades predictivas a la actuación, generando una acción de control proporcional a la velocidad de cambio del error. Tiende a dar más estabilidad al sistema pero suele generar grandes valores en la señal de control. La suma de estas tres reacciones es usada para ajustar el movimiento del motor a pasos para la posición de la válvula de admisión de aire.

En la siguiente figura (Fig.3.11) se presenta un diagrama que representa un esquemático del diseño general del control de velocidad propuesto.

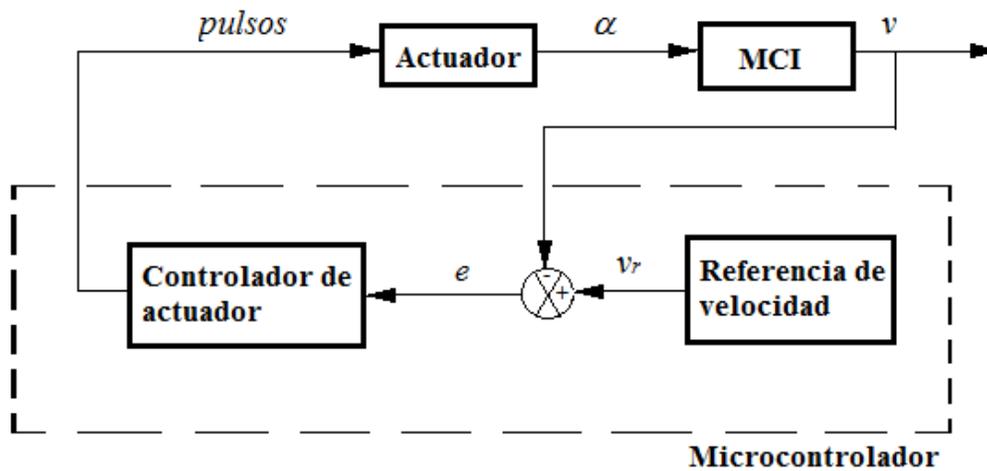


Fig.3.11. Diseño general del control de velocidad del sistema propuesto

La señal de apertura se basa en el procesamiento del error y la correspondencia de pulsos por grado, que en este caso es de  $1^\circ = 142$  pulsos, esta relación se obtiene al usar un micropaso de 252. El controlador genera una señal de pulsos basada en la siguiente ecuación:

$$Pulsos = k_p \cdot e_n + k_i (e_n + e_{n-1})\Delta t + k_d(e_n - e_{n-1})/\Delta t$$

Donde:  $k_p$ :cte. Proporcional,  $k_i$ :cte. Integral,  $k_d$ :cte. Derivativa;  
 $e_n$ :error actual,  $e_{n-1}$ :error anterior,  $\Delta t$ :tiempo de muestreo.

El diseño de controladores se realiza en función del modelo del sistema, es decir, considerando las variables del sistema y las restricciones del mismo. Los métodos de sintonización permiten determinar los parámetros del controlador basándose en estudios experimentales para cada sistema en particular. Uno de los procedimientos más usados es el método de Ziegler-Nichols en el cual se obtiene experimentalmente la respuesta del sistema a una entrada escalón y si la respuesta no tiene oscilaciones y además posee un retardo tal que se forma una “ese”, pueden obtenerse los parámetros del controlador PID. En la figura 3.12. se observa la respuesta en forma de s. Como puede apreciarse, la respuesta del sistema presenta un retardo, también llamado tiempo muerto, representado por L. Para calcular los parámetros se comienza por trazar una línea recta tangente a la señal de salida del sistema.

El tiempo L corresponde al tiempo muerto, que es el tiempo que tarda el sistema en comenzar a responder. Este intervalo se mide desde que la señal escalón sube, hasta el punto de corte de la recta tangente con el valor inicial del sistema.

El tiempo T es el tiempo de subida. Este tiempo se calcula desde el punto en el que la recta tangente corta al valor inicial del sistema hasta el punto en el que la recta tangente llega al valor final del sistema.

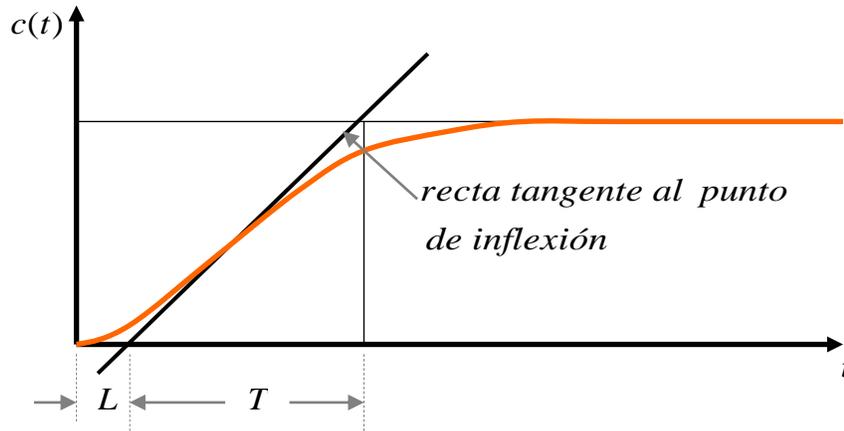


Fig.3.12. Respuesta a señal escalón para obtener parámetros por Ziegler-Nichols

Para obtener L y T, se traza una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta, la intersección con el eje del tiempo y con el valor final de la amplitud forman las distancias L y T, con estos valores se obtienen los parámetros del controlador PID utilizando la siguiente tabla:

Tipo de controlador	$k_p$	$k_i$	$k_d$
P	$T / L$	$\infty$	0
PI	$0.9 (T / L)$	$L / 0.3$	0
PID	$1.2 (T / L)$	$2 L$	$0.5 L$

Tabla.3.1. Parámetros Ziegler-Nichols

Los parámetros del controlador PID implementado se obtuvieron en base a las gráficas que se presentan a continuación, las cuales corresponden a la señal en lazo abierto de cinco, siete y diez grados. Tomando los valores determinados se obtiene un promedio para cada uno de los parámetros, el cual corresponde a los valores de:  $k_p = 1.7$ ,  $k_i = 0.7$ ,  $k_d = 0.2$ .

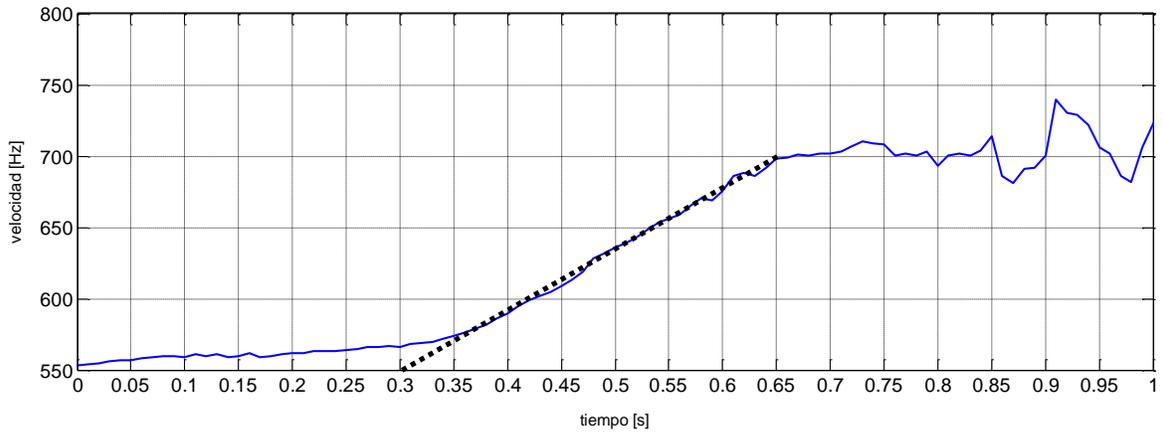


Fig.3.13. Señal de apertura a 5 grados, se deduce que:  $k_p = 1.4$ ,  $k_i = 0.6$ ,  $k_d = 0.15$

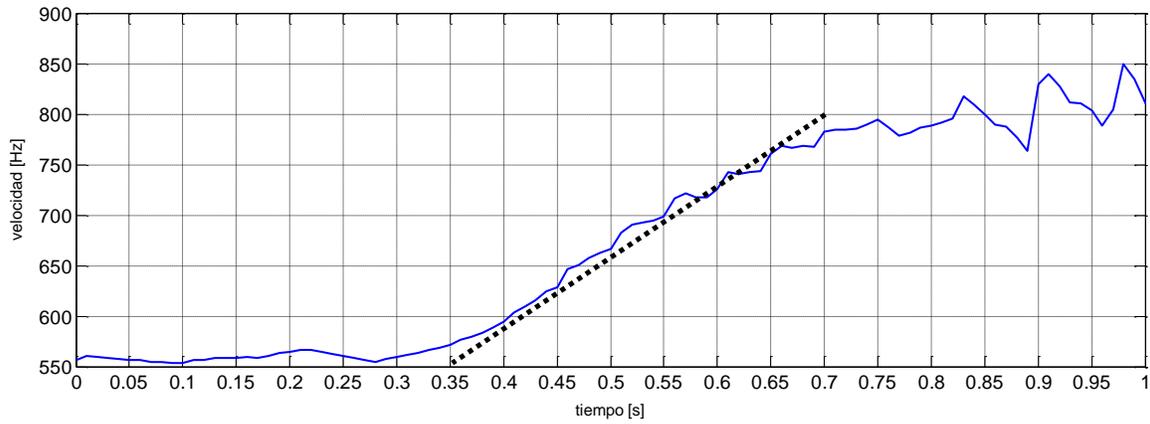


Fig.3.14. Señal de apertura a 7 grados, se deduce que:  $k_p = 1.1$ ,  $k_i = 0.8$ ,  $k_d = 0.2$

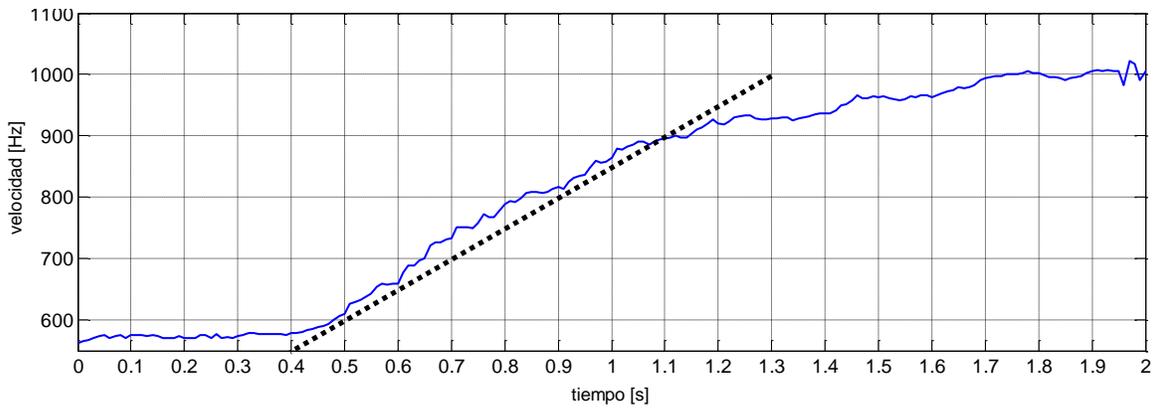


Fig.3.15. Señal de apertura a 10 grados, se deduce que:  $k_p = 2.7$ ,  $k_i = 0.7$ ,  $k_d = 0.2$

# Capítulo 4

## Diseño electrónico

En las siguientes secciones se muestra el diseño de los circuitos electrónicos que forman parte del nuevo sistema. Recordemos que la electrónica será el medio de comunicación por donde se generarán las señales que recibirá el motor a pasos, además de establecer comunicación con una computadora.

### 4.1. Etapa de potencia para motor a pasos

El motor a pasos, como se mencionó anteriormente, tiene que ofrecer al menos 58W de potencia eléctrica continua, a partir de esta característica se revisó que el motor pueda resistir 2 A y 24 V, y para lo cual se necesita una etapa de potencia que permita generar estos valores de voltaje y corriente. El controlador que se usó es el modelo “microstep driver 06AC”, con este dispositivo se puede elegir la corriente que se entrega al motor, así también con las divisiones que se requieren hacer al “paso base” del motor alcance movimientos angulares tan chicos como 1.8/256. Esto permite que el movimiento angular se ajuste con mucha precisión, lo cual posibilita un control mucho más preciso de la velocidad.

Características:

- Controlador de corriente de salida de 1 a 6 A
- Amplio rango de voltaje de 24 a 50 V
- hasta 256 micropasos
- Aislamiento optico de señal de control
- Protección de corriente y voltaje
- Filtro de ruido del motor
- Tiempo de respuesta de 100 kHz
- Conexión directa corriente alterna de 127 V

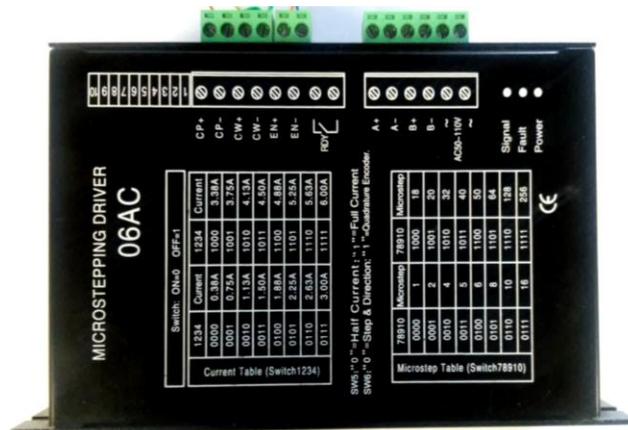


Fig.4.1. Microstep driver 06AC

## 4.2. Acondicionamiento de las señales de microcontrolador

La señal que entrega el uC tiene un voltaje de 3.6 V lo cual no es detectado por el controlador del motor a pasos, es por eso, que se implementó una etapa de amplificación por medio de un amplificador operacional configurado en modo de amplificador no inversor, a continuación se muestra el diagrama del circuito que se usó:

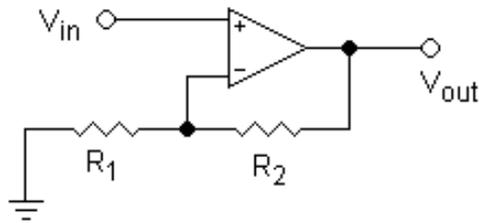


Fig.4.2. Amplificador operacional en configuración no inversor

La relación de aplicación es generada por las resistencias que se muestran en la configuración y se expresa en la siguiente ecuación:

$$V_o = V_i (1 + R_2 / R_1)$$

Donde:  $V_o$ : voltaje de salida

$V_i$ : voltaje de entrada

$R_2, R_1$ : resistencias de amplificación

Basado en la ecuación antes mencionada se calcularon los valores de resistencias para aumentar 3.6V a 5V, para poder conectarlo al controlador y poder operar la posición angular del motor a pasos por medio de los pulsos provenientes del uC. Los valores calculados son  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 2.5 \text{ k}\Omega$ , resultado:  $V_o = 5V$ .

### 4.3. Acondicionamiento del sensor de velocidad

El sensor de efecto hall que registra la velocidad del motor es un dispositivo que entrega una señal senoidal que varía su amplitud de 5 a 9 V de acuerdo a la velocidad del motor, al aumentar la velocidad aumenta el voltaje y esta señal se debe entregar al microcontrolador, que no soporta voltajes mayores a 3.6 V, por esta razón se requiere atenuar esta señal para mantenerlo al valor ideal del uC, para esto al principio del acondicionamiento se implementó un diodo Schottky para evitar magnitudes negativas, esto con el fin de homogenizar la alimentación, seguido se implementó un circuito trigger Smith para convertir la onda senoidal del sensor de efecto hall en una onda cuadrada y con una amplitud constante, después de este proceso se entrega la señal al microcontrolador para su procesamiento y determinación de la frecuencia, gracias a este procedimiento garantiza que la señal se mantenga en 3.6 V de forma constante.

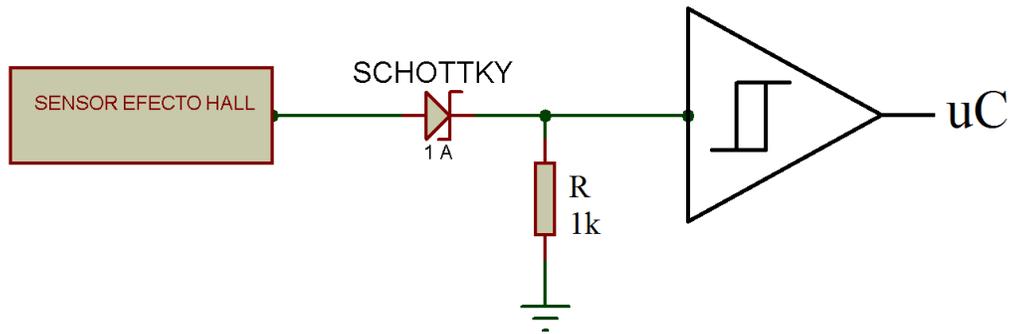


Fig.4.3. Circuito implementado para la captura de la señal de velocidad



# Capítulo 5

## Pruebas y resultados

En este quinto capítulo se muestran y analizan los resultados de las pruebas realizadas a un motor de combustión ya con el acondicionamiento de la válvula de admisión de aire. Las primeras pruebas se realizan para obtener la relación entre ángulo y velocidad controlando el ángulo de apertura de la mariposa, así también como registrando la velocidad del motor de combustión en prueba, revisando que la etapa de potencia implementada esté respondiendo correctamente. También se verificará que los elementos mecánicos implementados estén funcionando de manera estable y confiable. La segunda etapa de pruebas se enfoca en verificar la respuesta del motor al controlador diseñado, con referencias de velocidad fijadas por señales de escalón y rampa. Por último se realizarán pruebas con señales que simularán la conducción de un vehículo en uso cotidiano, registrando los datos de respuesta del sistema electrónico implementado así como la respuesta del motor de combustión.

### 5.1. Resultados experimentales

En esta primera etapa de prueba se tiene como objetivo encontrar una correspondencia entre el ángulo de la válvula de admisión de aire y la velocidad del motor. Para realizar estas pruebas se posicionó el plato de la válvula en un ángulo durante 15 segundos, el cual fue el tiempo suficiente para que la velocidad del motor se estabilizara. Estas gráficas son la base para determinar los parámetros del controlador PID por medio del método de Ziegler-Nicols. A continuación se presenta las gráficas de la velocidad correspondientes a cada ángulo, así también se muestran los valores determinados del controlador:

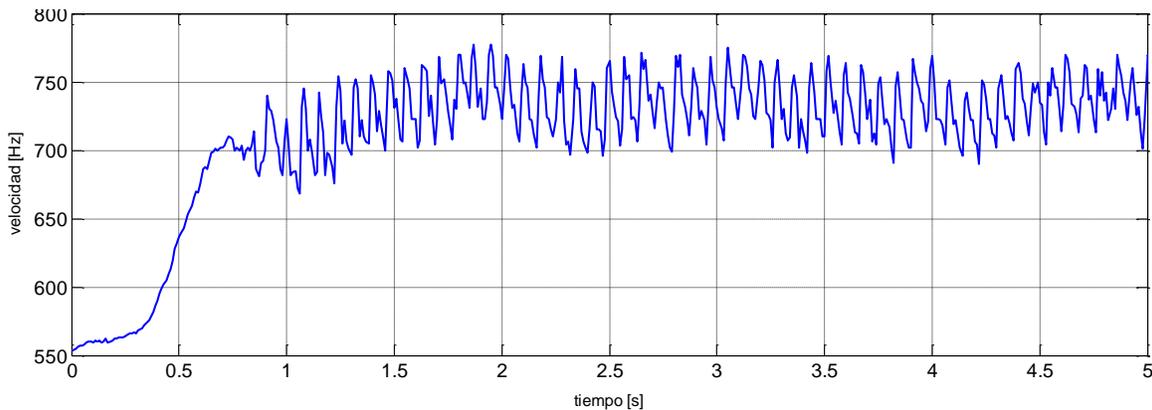


Fig.5.1. Señal de velocidad correspondiente a una apertura de 5°.

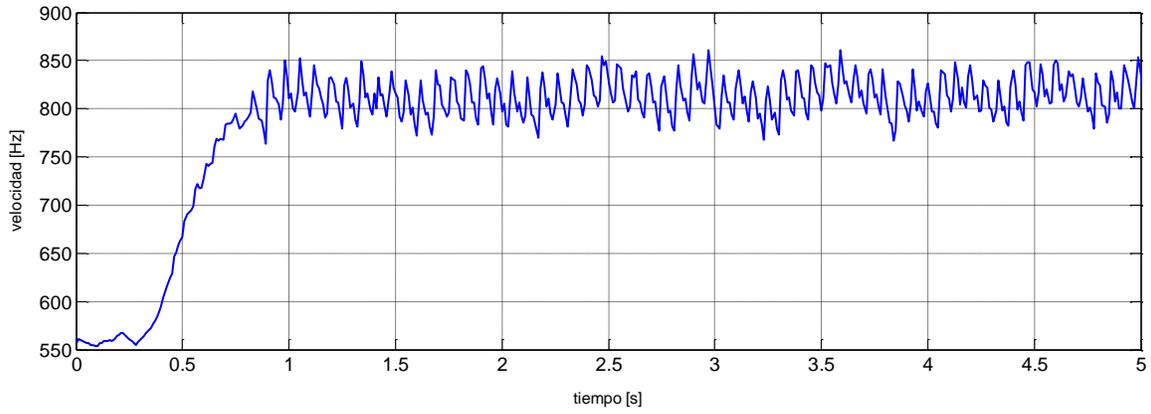


Fig.5.2. Señal de velocidad correspondiente a una apertura de  $7^\circ$ .

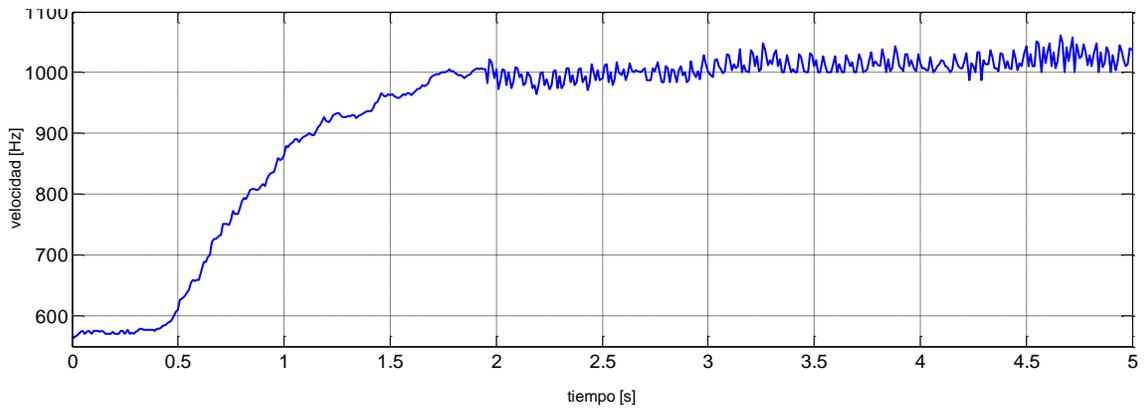


Fig.5.3. Señal de velocidad correspondiente a una apertura de  $10^\circ$ .

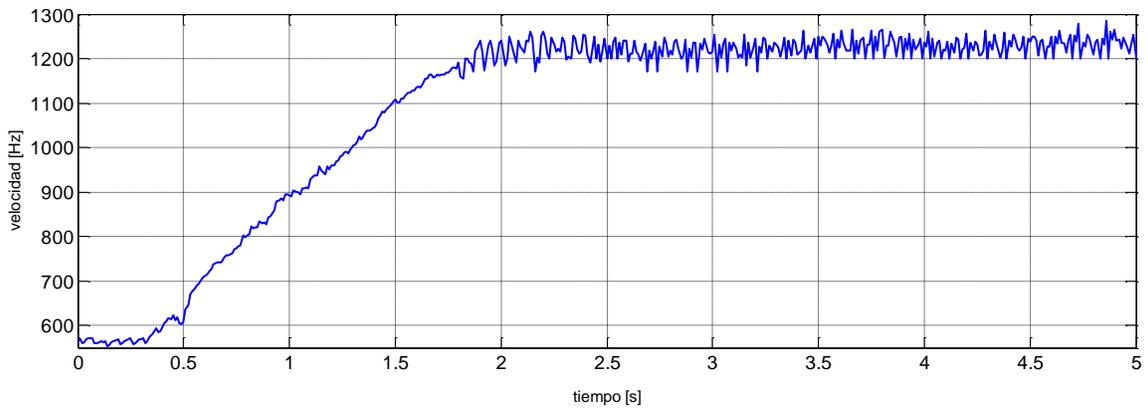


Fig.5.4. Señal de velocidad correspondiente a una apertura de  $12^\circ$ .

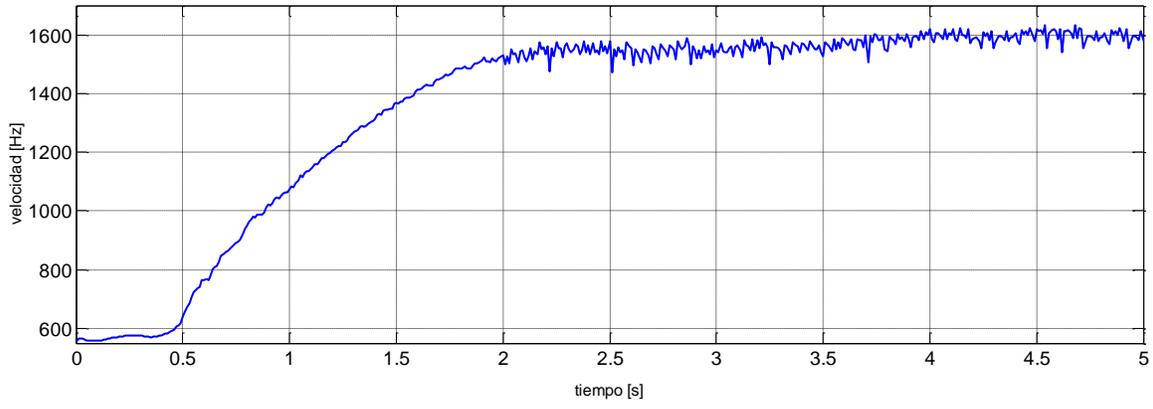


Fig.5.5. Señal de velocidad correspondiente a una apertura de 15°.

## 5.2. Controlador PID

En esta segunda etapa de prueba se ingresaron señales de referencia de velocidad utilizando el controlador PID para alcanzar el valor solicitado. Como se muestra en la siguiente figura el sobrepaso es de 80 Hz y el error en estado permanente se encuentra en un rango de  $\pm 50$  Hertz esto pasa porque la medición se realizó en el cabezal donde el movimiento de la viela genera una señal que fluctúa y que impacta de la misma manera a la medición, sin embargo el controlador mantiene la velocidad en estos rangos.

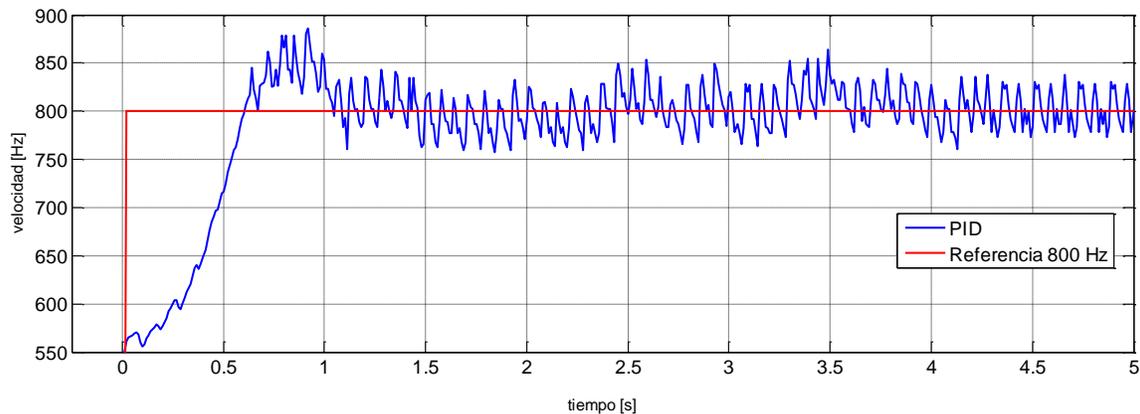


Fig.5.6. Señal de velocidad correspondiente a la referencia de 800 Hz

En la siguiente figura se muestra la implementación del controlador PID con una señal de referencia de 1500 Hz, el cual se alcanza con un sobrepaso de 200 Hz y un error en estado permanente de  $\pm 30$  Hz.

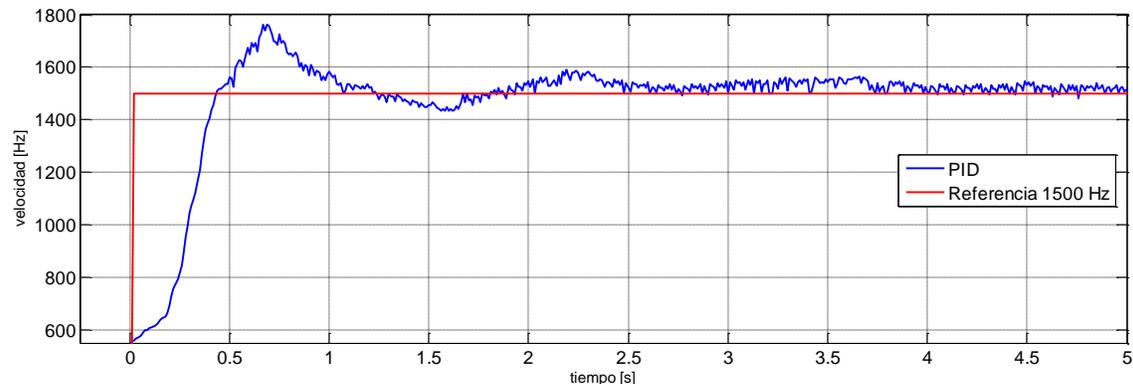


Fig.5.7. Señal de velocidad correspondiente a una referencia de 1500 Hz

Las pruebas realizadas ofrecen información el tiempo de reacción del motor de combustión y el error en estado permanente que se genera con respecto a la referencia, con la señal de 1500 Hz se puede ver que la señal se estabiliza en un tiempo de 3.5 segundos.

# Capítulo 6

## Conclusiones

La elaboración de esta tesis representa un paso importante para la construcción del banco de pruebas de un vehículo híbrido eléctrico, ya que se generaron acondicionamientos cruciales en el procesamiento de señales, diseño del algoritmo de programación y la generación de información sobre las características del motor de combustión.

El objetivo de acondicionar el cuerpo de aceleración de un motor de combustión interna para la implementación de un control electrónico de la válvula de admisión de aire, con el fin principal de controlar velocidad del motor, se cumplió de manera satisfactoria. Para alcanzar este objetivo se realizaron varios procedimientos, como la revisión de las características generales del motor de combustión en donde el propósito fue detectar los elementos principales para controlar la velocidad del motor de combustión. Se encontró que el componente que impacta directamente en la velocidad del motor es la válvula de admisión de aire, por lo que se procedió a acondicionarlo, esta tarea se efectuó con un motor a pasos, el cual es un dispositivo que convierte una serie de impulsos eléctricos en movimientos mecánicos proporcionales. Este tipo de motores tiene la característica de tener alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento; permitiendo movimientos angulares de hasta milésimas de grado, esta particularidad disminuye drásticamente los errores de posicionamiento angular.

En cuanto al procesamiento de los datos se diseñó un algoritmo en lenguaje C++ para su utilización en microcontrolador, en este paso se contempló la admisión de la señal de velocidad y su utilización en los cálculos del controlador, así también como el envío de pulsos para el movimiento angular de la válvula de admisión y se programó la interfaz de usuario que muestra los datos para revisar el correcto funcionamiento del sistema.

La teoría de control utilizada en este trabajo fue de un controlador PID, para implementarlo se realizaron pruebas en lazo abierto para determinar los valores correspondientes a los parámetros  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$ . Una vez calculados estos valores se procedió a realizar pruebas con diferentes setpoints para revisar la respuesta del controlador, lo cual como se vio en gráficas previas; tuvo un sobrepaso máximo de 200 Hz y un tiempo de estabilización de 8 segundos, el código realizado se podrá utilizar como plantilla y solo requerirá reemplazar el valor de las constantes del controlador PID.

En cuanto al trabajo futuro, el sistema construido se utilizará en el banco de pruebas, donde se realizarán estudios de potencia y consumo de combustible, empleando como base el código programando y los circuitos construidos.

Finalmente, haciendo una evaluación general del trabajo, puede concluirse que se ha cumplido con el objetivo que se planteó al inicio de la tesis y por lo cual se han logrado avances importantes en el desarrollo e investigación sobre fuentes de potencia híbridas.



# A. Código del programa del microcontrolador

## A.1. Archivo Main

```
#include "tc.h" /*configura los registros de contadores*/
#include "SerialFunc.h" /*código para configurar transmisión de datos*/
#include "angle.h" /*código para configurar el movimiento angular*/
#include "pruebas.h" /*código que configura el controlador*/

int freq = 0;

#define F_CPU      2000000UL
#define USART_SERIAL    &USARTC0

int main (void){

    init_interrupt(); /*inicializa los niveles de interrupción*/
    init_usart(); /*inicializa el puerto C(J4) para envío de datos*/
    init_frequency(); /*configura Puerto F (J1) para recibir señal de velocidad*/
    sei(); /*confiura las banderas de interrupción*/
    delay_ms(2000);

    while(1){

        freq = 0;
        freq = capture_freq(); /*captura la frecuencia*/

        //angle_positive(5); /*código usado para posicionamiento angular*/

        /* controlador implementado*/
        if(freq > 525){ //filtro para evitar ruido

            pid_controler(3000, freq);

        }

    }

}}
```

## A.2. Configuración de puerto COM para interfaz USB

```
#define USART_SERIAL                &USARTC0
#define USART_SERIAL_BAUDRATE      57600
#define USART_SERIAL_CHAR_LENGTH   USART_CHSIZE_8BIT_gc
#define USART_SERIAL_PARITY        USART_PMODE_DISABLED_gc
#define USART_SERIAL_STOP_BIT      false

void init_usart(void){
    board_init();
    static usart_rs232_options_t USART_SERIAL_OPTIONS = {
        .baudrate = USART_SERIAL_BAUDRATE,
        .charlength = USART_SERIAL_CHAR_LENGTH,
        .paritytype = USART_SERIAL_PARITY,
        .stopbits = USART_SERIAL_STOP_BIT
    };
    usart_init_rs232(USART_SERIAL, &USART_SERIAL_OPTIONS);}
```

## A.3. Captura de señal de velocidad

```
void init_frequency(){ /*función para inicializar y configurar captura de frecuencia*/

    /*configuración de TC para activación en flaco de subida y bajada*/
    PORTF.PIN0CTRL = PORT_OPC_PULLDOWN_gc | PORT_ISC_RISING_gc;
    EVSYS.CH0MUX = EVSYS_CHMUX_PORTF_PIN0_gc;
    EVSYS.CH0CTRL = EVSYS_DIGFILT_8SAMPLES_gc;

    /*configuración de TCF1 para captura de frecuencia por medio del evento 0*/
    TCF1.CTRLB = TC1_CCAEN_bm;
    TCF1.CTRLD = TC_EVACT_FRQ_gc | TC_EVSEL_CH0_gc;
    TCF1.PER = 0xFFFF;

    /*inicializar TCF1 con prescaler de 1*/
    TCF1.CTRLA = TC_CLKSEL_DIV1_gc;
}
```

## A.4. Posicionamiento angular

//Número de pulsos

```
int angle_positive(int a){
    PORTA.DIR = 0xFF;
    PORTA.OUT = 0xFF;
    PORTA.OUTCLR = PIN0_bm;
    for (int b = 0; b < a; b++ )
    {
        PORTA.OUTCLR = PIN0_bm;
        delay_us(200);
        PORTA.OUTSET = PIN0_bm;
        delay_us(200);
    }
    PORTA.OUTCLR = PIN0_bm;
}

int angle_negative(int b){
    PORTA.DIR = 0xFF;
    PORTA.OUT = 0xFF;
    PORTA.OUTCLR = PIN1_bm;
    for (int c = 0; c < b; c++ )
    {
        PORTA.OUTCLR = PIN1_bm;
        delay_us(200);
        PORTA.OUTSET = PIN1_bm;
        delay_us(200);
    }
    PORTA.OUTCLR = PIN1_bm;
}
```

## A.5. Controlador PID

```
int pid_controler(int setpoint, int measured_value){
    int _error, previous_error, integral, dt = 1, derivative;

    int kp = 1.7, ki = 0.7, kd = 0.2.; //parametros del controlador PID

    _error = setpoint - measured_value;
    integral = integral + _error*dt;
    derivative = (_error - previous_error)/dt;
    _error = kp*_error + ki*integral + kd*derivative;
    previous_error = _error;

    if (_error > 0){
        angle_positive(_error); //apertura de mariposa
        deg2 = deg2 + _error/142; //variable del ángulo
    }else {
        angle_negative(_error); //cierre de mariposa
        deg2 = deg2 + _error/142; //variable del ángulo
    }

    delay_ms(500); //tiempo de muestreo

    print_number(measured_value);
    print_number(deg2);
    print_number(_error);
}
```

# Bibliografía

El petróleo y la energía en la economía - Centro de Estudios Económicos Tomillo, CEET 2008

The Secret Seven - BMW 2009

Adaptive Backstepping Controller for Internal Combustion Engine with Actuator Dynamics - Meza Aguilar 2013

Nonlinear PID Control of Electronic Throttle Valve - Quyang Zeng 2011

Research in Fuel Injection Revision Control of Gasoline Engine based on the Electronic Throttle during Transient Condition - Ting Wang 2010

Model-Based Fault-Diagnosis of Electronic Throttle System - Jian Wu 2012

Multidisciplinary optimization of a butterfly valve - Guan Song 2008

Control de MCI - Anselmo Salinas 2007

Service Station Manual Engine 500cc - Piaggio 2001

Industrial Electronics - Colin D. Simpson 2006

Fundamentos de Motores - VW 2002

XMega Manual - Atmel Corporation 2012

XMega Schematics - Atmel Corporation 2012

Advanced Control Engineering - Roland S. Burns 2001