



Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

**Análisis del suministro de energía para alimentar un
motor híbrido de baja potencia de dos pistones**

presentada por

Ing. Isaí González Sarabia

como requisito para la obtención del grado de
**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. Jarniel García Morales

Codirectora de tesis

Dra. Marisol Cervantes Bobadilla

Cuernavaca, Morelos, México. Noviembre de 2025.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 04/noviembre/2025

Oficio No. SAC/254/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ISAÍ GONZÁLEZ SARABIA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"ANÁLISIS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA PARA ALIMENTAR UN MOTOR HÍBRIDO DE BAJA POTENCIA DE DOS PISTONES"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

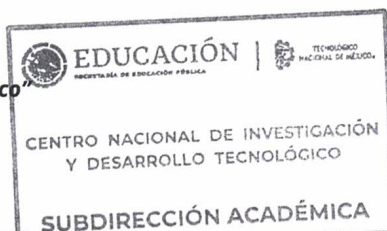
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; 27/octubre/2025

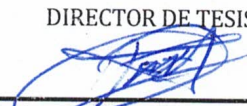
Oficio No. DIE/187/2025

Asunto: Aceptación de documentos.

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. ISAÍ GONZÁLEZ SARABIA**, con número de control **M22CE079** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"ANÁLISIS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA PARA ALIMENTAR UN MOTOR HÍBRIDO DE BAJA POTENCIA DE DOS PISTONES"**, y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

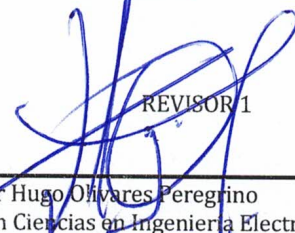
DIRECTOR DE TESIS


Dr. Jarniel García Morales
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 11106825

CODIRECTOR DE TESIS


Dra. Marisol Cervantes Bobadilla
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 11607393

REVISOR 1


Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5999002

REVISOR 2


Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional 3431842

C.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/ibm



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2224,
e-mail: die@cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



Resumen

En este trabajo se muestra el modelado de un motor de combustión interna de baja potencia de un pistón: se realizó la simulación con parámetros de un motor de combustión interna de 25 centímetros cúbicos y se retomaron las simulaciones de un trabajo doctoral de un motor reciprocante magnético, ambos basados en la estructura de un motor de combustión interna convencional. Se realizó y evaluó la cantidad de energía suministrada al motor de combustión interna monocilíndrico con la finalidad de poder evaluar la viabilidad de acoplarlo a un motor reciprocante magnético monocilíndrico. Se desarrollaron y evaluaron submodelos que describen el funcionamiento del motor de combustión interna, los cuales son los siguientes: Modelo de combustible: analiza el suministro, inyección, vaporización y dinámica en el colector de admisión, así como la mezcla aire-combustible, identificando variables que afectan la eficiencia. Modelo de aire: determina el flujo de aire que pasa a través de la válvula de mariposa, la presión en el múltiple de admisión y el volumen de aire que ingresa al cilindro, asegurando una relación estequiométrica adecuada. Modelo de combustión: determina el trabajo neto, la potencia indicada, la potencia al freno y el par motor al freno, mostrando cierta concordancia con las curvas de un motor HONDA GX de 25 centímetros cúbicos. Con los modelos, se replicó la curva de potencia y par de un motor reciprocante magnético en el motor de combustión interna, integrando el análisis y suministro de energía tanto para el pistón de combustible como para el pistón magnético, logrando obtener una comparación conjunta de los pares obtenidos para cada motor.

Abstract

This work presents the modeling of a low-power single-piston internal combustion engine. A simulation was carried out using the parameters of a 25-cubic-centimeter internal combustion engine, and the simulations from a doctoral study on a magnetic reciprocating engine were revisited, both based on the structure of a conventional internal combustion engine. The amount of energy supplied to the single-cylinder internal combustion engine was evaluated in order to assess the feasibility of coupling it with a single-cylinder magnetic reciprocating engine. Submodels describing the operation of the internal combustion engine were developed and analyzed, as follows: Fuel model: examines fuel supply, injection, vaporization, and intake manifold dynamics, as well as the air–fuel mixture, identifying variables that affect efficiency. Air model: determines the airflow passing through the throttle valve, the pressure in the intake manifold, and the volume of air entering the cylinder, ensuring an adequate stoichiometric ratio. Combustion model: determines net work, indicated power, brake power, and brake torque, showing reasonable agreement with the performance curves of a 25-cubic-centimeter HONDA GX engine. Using these models, the power and torque curve of a magnetic reciprocating engine was replicated in the internal combustion engine, integrating the energy supply and analysis for both the fuel piston and the magnetic piston, thereby enabling a comparative evaluation of the torque obtained for each engine.

Dedicatoria

A Dios por brindarme sabiduría, fortaleza de carácter, resiliencia y las herramientas para superar el estudio de un posgrado en ciencias.

A mi madre y a mi padre con especial dedicatoria, a toda mi familia en general por ser mi constante fuente de inspiración y motivación diaria para concluir este logro.

A mis amigos, Iliana Lizbeth Alvarado Lara, Guadalupe Sinai Mora García, Pedro Eusebio Alvarado Méndez, Jorge Yusef Colín Castillo, Gabriel Cervantes Mejía, Dryden Gilberto Estrada Téllez, Jonathan Arenas Robles, Luis Enrique Hernandez Melendez, Ana Seli Santana Marquina, Ezequiel Dominguez Lagunas por todo el apoyo, amistad y ánimo que han sido invaluable durante todo este proceso.

A mis mentores, en especial a la Dra. Marisol Cervantes Bobadilla, al Dr. Jarniel García Morales, mis directores de tesis y guía, por su sabiduría y orientación en mi recorrido académico. Este logro es resultado del esfuerzo y apoyo de todos ustedes.

A todos aquellos que, sin ser parte de mi familia, me han brindado su apoyo incondicional por sus palabras de aliento su compañía y todo lo que ha sido fundamental para mí en este viaje. Gracias por estar siempre ahí.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo que me proporcionó para alcanzar una meta adicional.

Al Tecnológico Nacional de México (TECNM), por animarme a estudiar la maestría en Ciencia en Ingeniería Electrónica, con especialidad en Energía Renovable y Eficiencia Energética.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y a todo el personal de la institución por su dedicación y esfuerzo. Por inspirar en mí el interés por la investigación tecnológica.

Al Dr. Jarniel García Morales, le agradezco profundamente por su apoyo tanto académico como personal. Gracias por brindarme su amistad, confianza y conocimientos, y por estar siempre al pendiente de mí.

Al Dra. Marisol Cervantes Bobadilla, una persona sumamente comprometida con su trabajo. Muchas gracias por brindarme su tiempo y conocimiento.

Al Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, por su contribución a mi desarrollo personal y académico a través de sus clases. Estoy profundamente agradecido por su tiempo y esfuerzo invertidos en mi formación.

Al Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino, por su dedicación y orientación a lo largo de este proceso. Sus valiosos comentarios y sugerencias han enriquecido significativamente mi trabajo de tesis.

Además, quiero expresar mi gratitud a mis compañeros y amigos. Por todo su compañerismo y ánimo durante todo este camino.

También quiero agradecer a los profesores y profesoras con los que he tenido el placer de convivir durante este tiempo. Su dedicación, conocimiento han enriquecido mi formación académica y personal.

Contenido

Resumen	I
Abstract	II
Dedicatoria.	III
Agradecimientos	IV
Listado de figuras	VIII
Listado de tablas	X
Simbología	XI
Capítulo I. Antecedentes y motivación.	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Antecedentes.	1
1.3 Planteamiento del problema.	3
1.4 Objetivos.	4
1.4.1 Objetivo general.	4
1.4.2 Objetivos específicos.	4
1.5 Metas.	4
1.6 Justificación.	5
1.7 Organización del documento.	5

CONTENIDO

Capítulo II. Marco teórico.	6
2.1 Motor de combustión interna.	6
2.2 Motor reciprocante magnético.	8
2.3 Modelo matemático motor reciprocante magnético.	10
2.3.1 Fuerza de repulsión magnética.	11
2.3.2 Par motor.	11
2.3.3 Velocidad y aceleración.	13
2.3.4 Comportamiento de la corriente.	14
 Capítulo III. Estado del arte.	 15
3.1 Motores eléctricos magnéticos	15
3.1.1 Vehículos híbridos.	23
 Capítulo IV. Modelado del motor de combustión interna.	 26
4.1 Modelo combustible.	26
4.1.1 Inyección.	26
4.2 Modelo del aire.	30
4.2.1 Válvula mariposa.	30
4.2.2 Rendimiento volumétrico.	32
4.2.3 Válvula de admisión.	32
4.3 Modelo del colector de admisión.	34
4.4 Combustión y par motor.	35
4.4.1 Trabajo neto.	35
4.4.2 Potencia indicada.	37
4.4.3 Potencia al freno.	37
4.4.4 Par motor.	38
 Capítulo V. Resultados en simulación.	 40
5.1 Simulación motor combustión interna 25 centímetros cúbicos.	40
5.2 Simulación motor reciprocante magnético.	47
5.3 Simulación motor combustion interna ajustado.	48
5.4 Análisis y suministro de energía para el motor híbrido con 2 fuentes de alimentación.	52

CONTENIDO

Capítulo VI. Conclusiones.	54
6.1 Alcance.	54
6.2 Conclusiones.	54
6.3 Originalidad.	54
6.4 Aportaciones.	55
6.5 Trabajos futuros.	55
 Referencias.	 56
 Anexo	 61

Listado de figuras

2.1	Tiempos de funcionamiento motor de combustión interna [9].	7
2.2	Mecanismo manivela, biela y pistón [11].	8
2.3	Motor reciprocante magnético de un solo pistón. (Rios, 2024).	9
2.4	Diagramas de cuerpo libre de los componentes del motor: a) Pistón, b) Biela y c) Cigüeñal. [4]	12
4.1	Diagrama a bloques del flujo de masa de combustible inyectada.	27
4.2	Dinámica del combustible que ingresa al cilindro.	28
4.3	Masa de aire en el múltiple de admisión.	30
4.4	Diagrama a bloques utilizado en matlab simulink, para determinar la masa aire válvula de mariposa.	32
4.5	Diagrama a bloques utilizado en matlab simulink, para determinar la masa de aire que ingresa al cilindro.	34
4.6	Diagrama a bloques construido en matlab simulink, para determinar la presión del colector de admisión.	35
4.7	Diagrama esquemático utilizado en matlab simulink del modelo del trabajo neto.	36
4.8	Submodelos interconectados del motor de combustión interna.	39
5.1	Esquema completo de la interconexión de los sub-modelos que intervienen en el modelado del motor de combustión interna.	41
5.2	Relación apertura válvula de entrada y rpm de salida.	41
5.3	Coeficiente de descarga de la válvula de mariposa de un motor monocilíndrico.	42
5.4	Masa de combustible.	43
5.5	Masa aire que atraviesa la válvula e ingresa al cilindro.	43
5.6	Presión múltiple de admisión.	44
5.7	Trabajo neto.	44
5.8	Potencia indicada.	45

LISTADO DE FIGURAS

5.9	Curva de potencia y par motor en modelo del MCI.	46
5.10	Potencia y par motor de un motor monocilíndrico de combustión interna de 25cc reportado en ficha del fabricante [55].	46
5.11	Relación aire combustible medido.	47
5.12	Relación corriente de entrada y rpm de salida.	48
5.13	Apertura válvula de mariposa.	48
5.14	Masa aire que atraviesa la válvula de mariposa.	49
5.15	Masa aire cilindro.	50
5.16	Masa de combustible.	50
5.17	AFR medido.	51
5.18	Potencia y par motor MCI.	52
5.19	Potencia y par motor MRM [4].	52

Listado de tablas

3.1	Parámetros de motores reciprocantes magnéticos con estructura de motor de combustión interna.	22
5.1	Parámetros del mecanismo del motor de 25cc.	40
5.2	Parámetros de velocidad y energía suministrada al motor.	53
0.1	Especificaciones técnicas del motor	62

Simbología

A_{th}	Área del conducto donde está acoplada la válvula de mariposa en m^2 .
$a = \frac{d}{D}$	Relación entre el diámetro del eje y el diámetro del conducto del acelerador.
A	Ampere (Amperio), unidad de corriente eléctrica.
AFR	Relación aire-combustible.
A_{th}	Área del conducto donde está acoplada la válvula de mariposa en m^2 .
$\vec{B}_{ext}$	Campo magnético externo.
B_x, B_y	Componentes de la fuerza transmitida por la biela.
C_d	Coeficiente de descarga, proporcionado por el proveedor.
C_{iny}	Caudal combustible inyectado (mg/ms).
D	Diámetro del conducto del acelerador.
d	Diámetro del eje de la válvula de mariposa.
Dp	Diámetro del pistón.
$F_{atracción}$	Fuerza de atracción magnética lateral.
$\vec{F}$	Vector de fuerza.
F_{gp}	Peso del pistón.
F_{IP}	Fuerza inercial del pistón.
F_{Ix}, F_{Iy}	Fuerzas inerciales de la biela.
$\vec{F}_{mag}$	Fuerza magnética generada por un campo magnético externo.
F_{ox}, F_{oy}	Reacciones en el apoyo del cigüeñal.
F_p	Fuerza magnética que impulsa al pistón.
hRa	Término correctivo por la geometría del sistema.
I	Corriente.
Imc	Etapa de carga bobina MRM .
Imd	Etapa de descarga bobina MRM.
J	Joule (Julio), unidad de energía, trabajo o calor.
$k = \frac{C_p}{C_v}$	Relación de calores específicos a presión constante y volumen constante.
ℓ	Longitud de la biela.
ℓ_A	biela punto A.
ℓ_B	biela punto B.
Lm	Longitud de la manivela, 1.2 cm.
m_a	Masa de aire de una solaarga al cilindro.
m_f	Masa combustible.
m_{fi}	Masa combustible inyectada.

SIMBOLOGÍA

m_l	Masa líquida.
m_{lc}	Masa líquida conducto.
m_{lv}	Masa líquida válvula.
m_m	Masa de mezcla.
m_r	Masa residual que equivale al 5 % de la masa de mezcla m_m .
$\dot{m}_{acil}$	Masa de aire que ingresa al cilindro.
$\dot{m}_{aval}$	Masa de aire que pasa a través de la válvula de mariposa.
$\dot{m}_{fl}$	Masa de combustible líquida que entra al interior del cilindro.
$\dot{m}_{flc}$	Masa combustible líquida sobre el colector.
$\dot{m}_{flv}$	Masa combustible líquida sobre la válvula de admisión.
$\dot{m}_{fvc}$	Masa combustible vapor sobre el colector.
$\dot{m}_{fvv}$	Masa combustible vapor sobre la válvula de admisión.
n	revoluciones por minuto (<i>rpm</i>).
n_m	Eficiencia mecánica.
n_{vol}	Eficiencia volumétrica.
Nm	Newton-metro, unidad de momento de fuerza (torque).
Par	Par motor.
P_{adm}	Presión del múltiple de admisión.
P_{atm}	Presión atmosférica en Pa.
P_b	Potencia al freno.
P_i	Potencia indicada.
P_{oci}	Potencia de salida combustión interna.
P_{om}	Potencia de salida magnético.
Q_{HV}	Poder calorífico del combustible (4000 kJ/kg).
r_c	Relación de compresión.
R	Constante de los gases ideales en J/(kg · K).
Ra	Radio de la manivela.
R_{elec}	Resistencia de 300W (experimental).
$R_{inductor}$	Resistencia interna de la bobina (experimental).
rpm	Revoluciones por minuto.
t_0	Tiempo muerto inyector.
t_i	Tiempo de inyección.
T_{adm}	Temperatura del múltiple de admisión en °K.

SIMBOLOGÍA

T_{IC}	Par inercial del cigüeñal.
T_{IG}	Par inercial de la biela.
V	Volt (Voltio), unidad de potencial eléctrico o voltaje.
V	Volumen de llenado equivalente a V_d en m^3 .
V, S	Volumen y superficie del imán, respectivamente.
V_c	Volumen comprimido.
V_d	Volumen desplazado en m^3 .
V_{in}	Voltaje de entrada.
W	Watt (Vatio), unidad de potencia.
w_{net}	Trabajo neto (J).
$\dot{x}_m$	Velocidad del centro de gravedad del cigüeñal en el eje X.
$\ddot{x}_m$	Aceleración del centro de gravedad del cigüeñal en el eje X.
$\dot{x}_m, \dot{y}_m$	Velocidades derivadas de la posición respecto al tiempo.
$\ddot{x}_m, \ddot{y}_m$	Aceleraciones derivadas de la velocidad respecto al tiempo.
$\dot{y}_m$	Velocidad del centro de gravedad del cigüeñal en el eje Y.
$\ddot{y}_m$	Aceleración del centro de gravedad del cigüeñal en el eje Y.
Z	Combustible líquido.
Z_c	Combustible líquido en el conducto de admisión.
Z_v	Combustible líquido sobre la válvula de admisión.
α	Ángulo de apertura de la válvula de mariposa.
α_0	es el ángulo cuando la mariposa se encuentra en posición de ralentí.
β	Ángulo de la biela respecto a la vertical.
η_c	Eficiencia de combustión.
η_T	Eficiencia térmica.
θ	Ángulo de la manivela.
ρ_m	Densidad volumétrica de carga magnética.
σ_m	Densidad superficial de carga magnética.
$\Sigma_1^{n_{cil}}$	Número de cilindros.
τ_m	Par del motor.
$(1 - Z)$	Fracción de combustible en forma de vapor.

Constantes

SIMBOLOGÍA

a	0.03.
AFR	14.6.
d	0.03 <i>cm.</i>
D	1 <i>cm.</i>
K	1.4.
P_{atm}	101330 <i>Pa.</i>
R	$287 \frac{J}{Kg \cdot K}.$
T_{atm}	298.15 <i>K.</i>
Z	0.3.
τ_{fl}	0.08.

Abreviaturas

MCI	Motor de combustión Interna.
MRM	Motor reciprocante magnético.
PMS	Punto muerto superior.
PMI	Punto muerto inferior.

Capítulo I. Antecedentes y motivación.

1.1 Introducción.

En la actualidad el motor de combustión interna acapara el mercado automovilístico debido a su utilización en la gran mayoría de los vehículos. El creciente interés en la optimización del funcionamiento de la máquina de combustión interna ha contribuido en el ámbito de la movilidad del ser humano y el desarrollo de la industria automovilística, la cual genera un porcentaje considerable de la economía a nivel mundial. En [1] por otra parte, las energías renovables han demostrado ser las mejores aliadas para afrontar la problemática referente a la emisión de contaminantes hacia la atmosfera. La dificultad para introducir energías limpias en el sistema energético a nivel mundial radica en los intereses económicos de las grandes marcas comerciales. Se han presentado nuevas alternativas al uso de motores de combustión interna, como es el caso de autos híbridos y eléctricos. Sin embargo, su costo elevado únicamente permite el acceso a una reducida parte de la población, provocando que los vehículos con motor de combustión interna continúen en el dominio del mercado automovilístico. Por lo anterior, en este trabajo de investigación se propone estudiar la eficiencia de un motor de dos pistones, el cual será capaz de utilizar dos fuentes de energía (combustible y electricidad), es decir una fuente de suministro de energía para cada pistón. El principal objetivo de la investigación es analizar y evaluar la cantidad de energía suministrada a un motor de combustión interna monocilíndrico con la finalidad de poder evaluar la viabilidad de acoplarlo a un motor recíprocante magnético monocilíndrico.

1.2 Antecedentes.

En el CENIDET se han desarrollado estudios sobre motores de combustión interna; entre ellos, la tesis titulada “Análisis de Ruido Electroquímico en una Aleación de Aluminio Expuesta a la Mezcla Gasolina-Etanol” presentado por Arellano Perez [1], que muestra que uso de etanol en vehículos que suelen funcionar con gasolina genera problemas de corrosión, desgaste tanto en las partes metálicas como en las de plástico y caucho. Estos problemas de corrosión se deben a la facilidad con la que el etanol absorbe agua del medio ambiente y a los componentes del etanol que pueden variar dependiendo de su fabricación como es el caso de algunos cloruros o ácido acético. La principal contribución de esta investigación es la propuesta de un método para analizar las señales de ruido electroquímico usando la combinación de la transformada Synchrosqueezing y la energía de Shannon para determinar el tipo de corrosión y la velocidad de corrosión de una aleación de aluminio expuesta a diferentes electrolitos.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.

Otro antecedente del CENIDET es la tesis titulada “Desarrollo e Implementación de Una Estrategia de Control para el Ángulo de Encendido de un Motor de Combustión Interna” presentado por Carbot Rojas [2]; en este trabajo, se presenta el modelado matemático de un motor de combustión interna (CI) el cual es alimentado con múltiples combustibles, así como también se presenta un esquema de control para el ángulo de encendido. El objetivo de este trabajo es controlar el ángulo de encendido cuando el motor es alimentado con una mezcla E10 (90 % gasolina y 10 % etanol) enriquecida con hidrógeno sin tener pérdidas de eficiencia y torque en diferentes puntos de operación. El control del ángulo de encendido se realizó utilizando una red neuronal artificial (RNA), la cual tiene una estructura 2-6-1, dos neuronas en la capa de entrada, seis neuronas en la capa oculta y una neurona en la capa de salida, la ANN tiene como entradas de flujo de masa de aire y el torque, y como salida el ángulo de encendido. La importancia de controlar el ángulo de encendido del motor de CI reside en que el hidrógeno y el etanol tienen una velocidad mayor de combustión que la gasolina.

Otro trabajo que retoma el motor de combustión interna es el trabajo de “Implementación de un Sistema de Control para un Proceso de Combustión Interna Empleando Múltiples Combustibles” presentado por García Morales [3]; en este trabajo se muestran los resultados experimentales de la formulación de un esquema de control para la inyección de una mezcla E10, enriquecida con hidrógeno (10 % de etanol y 90 % de gasolina) en un motor de combustión interna de ignición por chispa. El hidrógeno fue producido bajo demanda por un electrolizador. Se considera que sólo el 8 % del aire total que pasa a través de la válvula de mariposa reacciona con el gas hidrógeno, manteniendo la relación estequiométrica hidrógeno-aire a 34.3. Para regular la producción de gas hidrógeno, la corriente de alimentación al electrolizador se controla mediante un controlador PI de retroalimentación. Los resultados experimentales mostraron que el consumo de la mezcla E-10 se reduce. Además, las eficiencias térmicas y de combustión aumentan, sin pérdidas de la potencia del motor.

En el trabajo presentado por Ríos Enriquez [4], se presenta el estudio de un motor reciprocante magnético, la tesis tiene por nombre “Modelado y Control de un Motor Reciprocante Magnético” que muestra una nueva alternativa para mitigar la contaminación del aire producida por la quema de combustibles fósiles usados en los motores de combustión interna, este tipo de motores presentan una característica principal: utilizan la estructura de un motor de combustión interna y sustituyen el uso de combustible fósil por campos

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.

magnéticos. Al igual que los motores de combustión interna, para mantener la operación del motor magnético en condiciones óptimas, se requiere tener el diseño de modelos matemáticos y controladores para determinar sus puntos de operación. En esta tesis se presenta el diseño y la formulación del modelo matemático de un motor reciprocante magnético tipo monocilíndrico basado en el enfoque energético Euler-Lagrange junto al diseño y aplicación de un controlador tipo neuronal para controlar la velocidad del motor. El desarrollo del modelo matemático se estructura de dos partes: primero se formula el modelo matemático utilizando el enfoque energético de Euler-Lagrange y después se desarrolla la parte magnética para representar la fuerza de repulsión magnética del motor magnético y completar el modelo matemático. Dentro de la tesis, se presenta la metodología utilizada para la construcción del motor reciprocante magnético junto a la plataforma de operación utilizando el software de LabVIEW. Además, se presentan las pruebas realizadas para poder validar el modelo matemático, la determinación de los ángulos de operación y la fuerza magnética generada entre un imán de neodimio y un electroimán de configuración tipo solenoide multicapa. Finalmente con los resultados obtenidos de esta tesis fue desarrollar un modelo matemático que represente la dinámica del MRM y proponer una estrategia de control que permita mantener la velocidad del motor a partir de la variación de los ángulos de energización del motor para diferentes puntos de operación con el fin de obtener la mejor velocidad angular y par del motor.

1.3 Planteamiento del problema.

De acuerdo con las investigaciones realizadas sobre el bajo aprovechamiento energético del motor de combustión interna (MCI) y las emisiones de gases contaminantes que generan, es necesario generar alternativas energéticas que permitan aprovechar la infraestructura desarrollada para los MCI y conjuntamente disminuyan la emisión de gases contaminantes al medio ambiente. Atendiendo esta necesidad, las investigaciones se han enfocado en analizar los efectos de utilizar combustibles renovables (etanol, bioetanol, hidrógeno, biogás etc.) en los MCI obteniendo una disminución en la emisión de gases contaminantes. Por otra parte, han surgido algunos trabajos en los que se reporta la utilización de campos magnéticos en motores monocilíndricos para sustituir la quema de combustibles. Sin embargo, la utilización de campos magnéticos en motores monocilíndricos es una investigación reciente que aún se encuentra en fase de desarrollo. La problemática principal de este trabajo de investigación

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.

radica en lograr un equilibrio entre las fuerzas transmitidas por los pistones hacia el cigüeñal, debido a la naturaleza de sus diferentes fuentes independientes de alimentación. Se tiene un pistón alimentado con combustible fósil el cual puede generar mayor potencia durante su funcionamiento en comparación con el pistón accionado por el efecto de campos magnéticos. Es fundamental mantener equilibradas las fuerzas que aportaran ambos pistones para obtener un buen desempeño del sistema y al mismo tiempo obtener la máxima eficiencia energética del sistema.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Analizar y evaluar la cantidad de energía suministrada a un motor de combustión interna monocilíndrico con la finalidad de poder evaluar la viabilidad de acoplarlo a un motor reciprocante magnético monocilíndrico.

1.4.2 Objetivos específicos.

1. Analizar el modelo matemático de un motor de combustión interna monocilíndrico.
2. Determinar las principales variables que impactan en un motor de combustión interna monocilíndrico.
3. Simular el sistema de un motor monocilíndrico de combustión interna.
4. Evaluar y comparar la potencia obtenida de un motor monocilíndrico de combustión interna con respecto a un motor monocilíndrico de reciprocante magnético.

1.5 Metas.

1. Obtener el comportamiento de un motor de combustión interna con la posibilidad de acoplarlo a un motor reciprocante magnético mediante simulación.
2. Analizar el suministro de combustible de un motor de combustión interna con la finalidad de poder acoplarlo a un motor reciprocante magnético.

1.6 Justificación.

El presente trabajo de investigación tiene como propósito parametrizar y simular el funcionamiento de un motor de combustión interna de baja potencia, con el objeto de obtener un panorama integral de su desempeño. Esta caracterización permitirá compararlo con un motor reciprocante magnético de baja potencia, evaluando tanto su consumo de combustible, como el consumo de energía eléctrica requerido por el motor magnético.

La investigación aportará al conocimiento científico y al desarrollo tecnológico ya que, de acuerdo con la revisión del estado del arte, no se han encontrado estudios previos que realicen una comparación directa del consumo energético entre estos dos tipos de motores. Adicionalmente, se generará una investigación original desarrollada en México sobre esta temática, lo que podría constituir una base para futuras propuestas de diseño y construcción de motores híbridos que integren tecnologías de combustión interna y magnéticas.

1.7 Organización del documento.

El presente documento se divide en seis capítulos, a continuación se describe brevemente el contenido de cada uno. En el capítulo 2 se presenta el marco teórico. En el capítulo 3 se muestra el estado del arte. En el capítulo 4 modelado del motor de combustión interna. En el capítulo 5 se presentan resultados. En el capítulo seis conclusiones y trabajos futuros.

Capítulo II. Marco teórico.

2.1 Motor de combustión interna.

Desde mediados del siglo XIX, diversos hitos marcaron la evolución del motor de combustión interna. En 1860, el motor de Lenoir [5], abrió el camino, seguido en 1876 por Nikolaus Otto [6], quien estableció el ciclo de cuatro tiempos como base de la operación moderna. Poco después, Rudolf Diesel [7], introdujo el principio de autoencendido por compresión, lo que amplió significativamente el rango de aplicaciones al ofrecer altos niveles de par. A lo largo del siglo XX, estos motores se consolidaron en el transporte y la maquinaria, surgiendo variantes como el motor rotativo Wankel [8]. Posteriormente, con la incorporación de la electrónica automotriz, se perfeccionaron aspectos clave como la inyección controlada, el encendido preciso y el tratamiento de emisiones, lo que transformó su desempeño y confiabilidad.

El propósito de los motores de combustión interna es producir energía mecánica a partir de energía química contenida en el combustible. En la cámara de combustión se transmite energía de los gases quemados a alta presión y temperatura dentro del cilindro, a través del mecanismo manivela-biela-corredera o (pistón). En términos cinemáticos, los motores de gasolina y los motores diésel comparten la misma secuencia de funcionamiento en cuatro tiempos: admisión, compresión, combustión-expansión y escape. Sin embargo, se diferencian en el mecanismo de encendido y en el ciclo termodinámico ideal que los describe. Mientras que los motores de gasolina se aproximan al ciclo Otto, caracterizado por el encendido mediante chispa, los motores diésel se ajustan al ciclo diésel, definido por el auto encendido provocado por la alta compresión. A continuación, en la figura 2.1, se presentan las fases del ciclo de cuatro tiempos, comunes a ambos en lo referente al desplazamiento del pistón y al accionamiento de las válvulas.

Admisión: el pistón desciende, apertura de válvula de admisión permitiendo el ingreso de la mezcla de aire y gasolina al cilindro (válvula de escape cerrada).

Compresión: el pistón sube y la válvula de admisión se cierra, provocado por el escape cerrado, el pistón comprime la mezcla de aire y combustible.

Explosión: el pistón llega al máximo de su recorrido, es cuando la bujía produce una chispa eléctrica que provoca la explosión y el pistón es impulsado hacia abajo.

Escape: el pistón sube, la válvula de escape se abre para permitir la salida de los gases quemados.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

La figura 2.1 muestra el ciclo Otto el principio de funcionamiento de los motores de combustión interna de encendido por chispa, compuesto por cuatro fases: admisión, compresión, combustión y escape. En este proceso, la mezcla aire-combustible ingresa al cilindro, se comprime y se enciende mediante una chispa, liberando energía que impulsa el pistón y posteriormente expulsa los gases quemados, repitiéndose de manera continua para transformar energía química en energía mecánica.

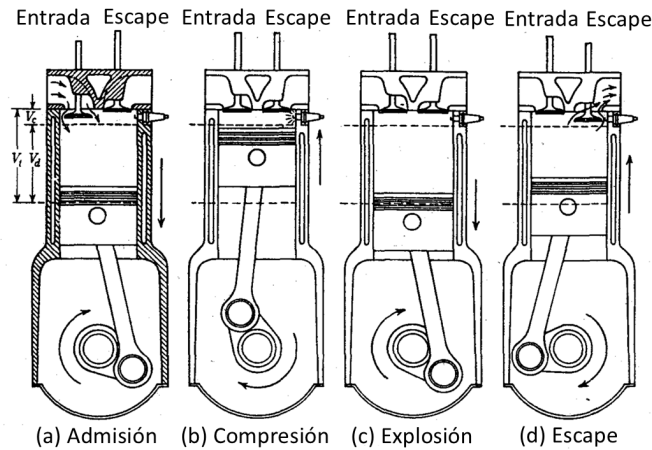


Figura 2.1: Tiempos de funcionamiento motor de combustión interna [9].

La eficiencia media de un motor de combustión interna, es la relación entre la energía útil que el motor entrega (trabajo mecánico efectivo) y la energía total que contiene el combustible suministrado. Considerando un ciclo completo de funcionamiento, en [10], se muestra la eficiencia media de un motor ciclo de Otto y ronda el 28 % a 38 %, es decir, solo un poco más de la cuarta parte de la energía calorífica se transforma en energía mecánica, mientras que el resto de la energía se pierde principalmente en forma de calor a través de los gases de escape, la transferencia térmica hacia las paredes del cilindro y el sistema de refrigeración, la fricción mecánica en los componentes móviles, el trabajo de bombeo requerido para la aspiración y expulsión de los gases, así como por radiación térmica, ruidos y vibraciones estructurales.

Considerando lo anterior, solo una fracción de la energía química del combustible se convierte en trabajo útil en el eje, a través del mecanismo manivela-biela-pistón. La figura 2.2, presenta un esquema del mecanismo manivela-biela-pistón. En él se observa el pistón deslizándose a lo largo de la pared del cilindro, la biela y la manivela apoyada en el rodamiento principal del cigüeñal. Se señalan además las posiciones extremas del pistón: el punto muerto

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

superior (PMS) y el punto muerto inferior (PMI), que delimitan la carrera. La manivela describe una trayectoria circular cuya posición se expresa mediante el ángulo de manivela; a medida que este varía, la biela se inclina respecto al eje del cilindro, modificando el ángulo de aplicación de la fuerza transmitida al pistón. Esta configuración geométrica, combinada con la presión de los gases en la cámara de combustión, da lugar al par instantáneo sobre el cigüeñal y por consecuencia, trabajo útil generado por el motor.

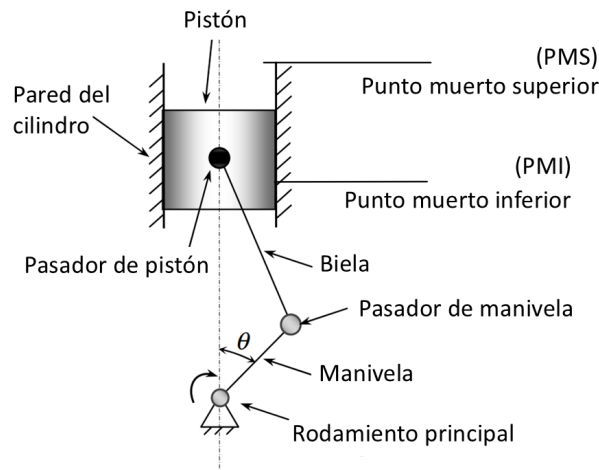


Figura 2.2: Mecanismo manivela, biela y pistón [11].

2.2 Motor reciprocante magnético.

Un motor reciprocante magnético es un dispositivo que convierte la energía de un campo magnético en un movimiento lineal alternativo (de vaivén). Funciona bajo el principio de atracción y repulsión de imanes o electroimanes que empujan o jalen un émbolo, pistón o núcleo móvil en una trayectoria recta. En lugar de girar, el movimiento resultante es oscilatorio o de desplazamiento hacia adelante y hacia atrás, parecido al funcionamiento de un pistón en un motor de combustión interna. Estos motores suelen emplearse en aplicaciones donde se requiere movimiento lineal directo. Por otro lado, un motor eléctrico rotativo (como los de corriente continua, asíncronos o síncronos) convierte la energía eléctrica en movimiento giratorio continuo de un eje. Esto se logra mediante el par motor producido por la interacción entre un campo magnético y una corriente en un conductor. Los motores eléctricos rotativos son los más comunes y se usan en ventiladores, compresores, vehículos eléctricos, robots, etc.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

Desde los motores electromagnéticos reciprocantes desarrollados hacia finales de la década de 1830 a partir de los experimentos de Charles G. Page [12], hasta la adopción generalizada de los solenoides como actuadores industriales a comienzos del siglo XX, la idea de generar movimiento lineal alternativo mediante fuerzas magnéticas ha sido una constante en la ingeniería. Posteriormente, la invención del altavoz de bobina móvil en 1925 consolidó el principio de empuje magnético alterno en aplicaciones que requerían alta respuesta dinámica. Más tarde, la introducción de los imanes de neodimio-hierro-boro en 1982 permitió incrementar de forma significativa la densidad de fuerza disponible en dispositivos compactos, ampliando el alcance de este tipo de tecnologías.

El motor electromagnético funciona gracias a que la energía eléctrica aplicada a una bobina o electroimán genera un campo magnético que, al interactuar con imanes permanentes o con otra corriente, produce una fuerza mecánica capaz de mover un eje o un pistón. En [13] y en la figura 2.3 se describe el principio de funcionamiento del motor reciprocante magnético, el cual se basa en la interacción de repulsión y atracción entre dos campos magnéticos: uno fijo y otro variable.

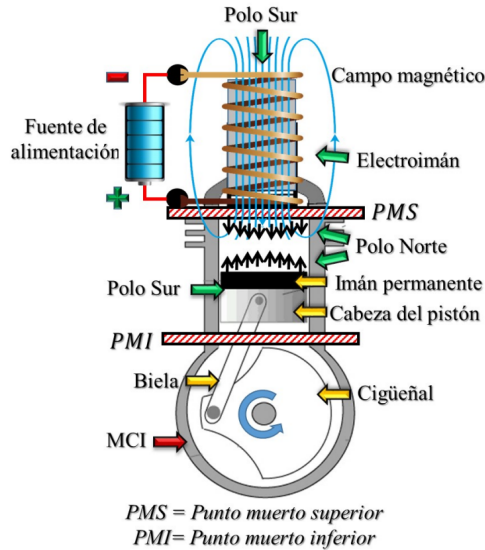


Figura 2.3: Motor reciprocante magnético de un solo pistón. (Rios, 2024).

El campo magnético fijo es generado por un imán de neodimio colocado en la cabeza del pistón del motor, mientras que el campo magnético variable se produce mediante un

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

electroimán que sustituye la cámara de combustión. Para generar dicho campo variable, el electroimán debe ser alimentado a través de un inversor de corriente CD/CA, con el propósito de alternar la polaridad del campo magnético de acuerdo con los requerimientos de operación del motor (atracción o repulsión del pistón).

Para controlar la velocidad del motor reciprocante magnético, en [14] se propone el suministro de corriente a través de un inversor de puente H, con el objetivo de generar una onda cuadrada e invertir la polaridad del electroimán en función de la posición del cigüeñal. Cuando el inversor proporciona energía, el electroimán se activa y produce la atracción o repulsión del imán permanente ubicado en la cabeza del pistón, lo que origina el movimiento del sistema. De esta manera se generan la potencia, el par y la velocidad del motor. En dicho trabajo, el autor plantea el diseño de un motor electromagnético basado en la estructura de un motor de combustión interna de cuatro cilindros.

La información técnica disponible acerca del motor reciprocante magnético es limitada; no obstante, en [15] se presenta el diseño, los componentes y el principio de funcionamiento de un motor reciprocante magnético monocilíndrico. Este diseño retoma la configuración estructural de un motor de combustión interna con mecanismo manivela-biela-pistón, en el cual la cámara de combustión, las válvulas, el inyector y la bujía son sustituidos por un electroimán ubicado en la cámara magnética.

En [16], se muestra una representación esquemática de un motor reciprocante magnético de un solo pistón y empatando por el diseño de electroimán en la parte superior e imán permanente en la cabeza del pistón, en [13], se muestra el diseño del motor reciprocante magnético de un solo pistón que parte de un motor de desbrozadora de 25 centímetros cúbicos de combustión interna.

2.3 Modelo matemático motor reciprocante magnético.

En el presente trabajo de investigación se retoman y evalúan las ecuaciones principales que gobiernan el modelo matemático del motor reciprocante magnético, propuesto en [4]. A partir de dicho modelo se realizó el seguimiento del comportamiento de las curvas de potencia y par motor, con el propósito de construir una simulación de un motor híbrido conformado por un pistón de combustión interna y un pistón de efecto reciprocante magnético. El cálculo de la

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

aceleración, la velocidad y el par motor se llevó a cabo mediante la estimación de la fuerza magnética, considerando la cinemática del mecanismo manivela–biela–pistón o corredera.

2.3.1 Fuerza de repulsión magnética.

La fuerza de repulsión magnética, que se genera entre el campo magnético del electroimán y el imán de neodimio utilizados en el MRM donde $F_p = \vec{F}_{mag}$, se representa por la ecuación 2.1 y 2.2.

$$F_p = \vec{F}_{mag} \quad (2.1)$$

$$\vec{F}_{mag} = \int_V \rho_m \vec{B}_{ext} dV + \oint_S \sigma_m \vec{B}_{ext} dS \quad (2.2)$$

donde:

F_p	fuerza magnética que impulsa al pistón.
$\vec{F}_{mag}$	fuerza magnética generada por un campo magnético externo.
$\vec{B}_{ext}$	campo magnético externo.
ρ_m	densidad volumétrica de carga magnética.
σ_m	densidad superficial de carga magnética.
V, S	volumen y superficie del imán, respectivamente.

2.3.2 Par motor.

El mecanismo simplificado de manivela–biela–corredera transforma el movimiento lineal del pistón en un movimiento rotatorio del cigüeñal. En este sistema, la fuerza impulsora se origina en la repulsión magnética generada cuando interactúan dos campos de igual polaridad. En particular, dicha repulsión es inducida por la interacción entre el actuador magnético y un imán permanente [17]. Como consecuencia, el pistón se desplaza a lo largo del eje vertical y transmite su movimiento al cigüeñal a través de la biela.

El par motor en el cigüeñal se genera a partir de la fuerza magnética que desplaza al pistón, la cual se transmite a través de la biela hacia el cigüeñal, produciendo el giro característico del mecanismo. Dicho par depende de la magnitud de la fuerza aplicada sobre el pistón y de

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

la geometría del sistema biela-manivela, lo que determina cómo se distribuyen las fuerzas a lo largo del movimiento. Como se expone en [11] y [18], la interacción de estas fuerzas puede representarse matemáticamente en la ecuación 2.2 y de manera gráfica en el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 2.4, donde se observa cómo cada elemento del mecanismo participa en la conversión de la energía de entrada en par motor útil.

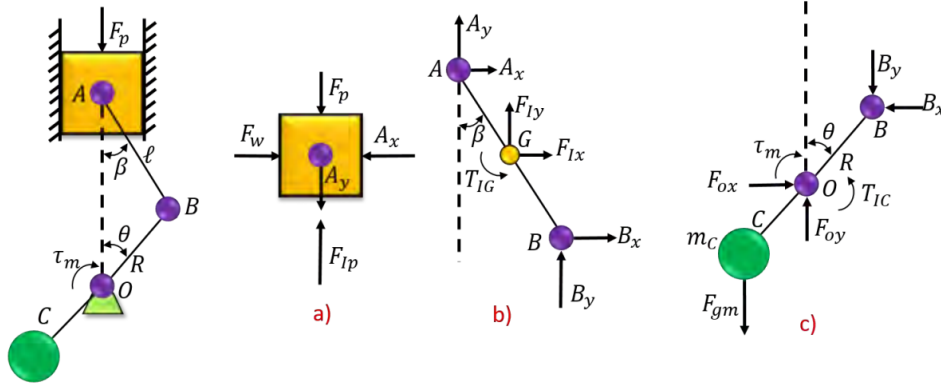


Figura 2.4: Diagramas de cuerpo libre de los componentes del motor: a) Pistón, b) Biela y c) Cigüeñal. [4]

Basándose en la leyes de Newton, el par motor viene dado por la ecuación 2.3.

$$\tau_m = Ra \left(B_y \sin(\theta) - B_x \cos(\theta) \right) - T_{IC} - hRa \left(F_{\alpha x} \cos(\theta) - F_{\alpha y} \sin(\theta) \right) \quad (2.3)$$

donde:

- Ra radio de la manivela.
- θ ángulo de la manivela.
- B_x, B_y componentes de la fuerza transmitida por la biela.
- T_{IC} par inercial del cigüeñal.
- T_{IG} par inercial del biela.
- F_{ox}, F_{oy} reacciones en el apoyo del cigüeñal.
- hRa término correctivo por la geometría del sistema.

Las fuerzas B_x y B_y que transmite la biela se expresan como:

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

$$B_x = \left(F_{IP} - (F_p + F_{gp}) + \frac{\ell_B}{\ell} F_{Iy} \right) \tan(\beta) - \frac{\ell_A}{\ell} F_{Ix} - \frac{T_{IG}}{\ell \cos(\beta)}, \quad (2.4)$$

$$B_y = F_p - F_{IP} - F_{Iy} + F_{gp} + F_{atracción}, \quad (2.5)$$

donde:

ℓ	Longitud de la biela.
ℓ_A	biela punto A.
ℓ_B	biela punto B.
β	ángulo de la biela respecto a la vertical.
F_{IP}	fuerza inercial del pistón.
F_p	fuerza magnética que impulsa al pistón.
F_{gp}	peso del pistón.
F_{Ix}, F_{Iy}	fuerzas inerciales de la biela.
T_{IG}	par inercial de la biela.
$F_{atracción}$	fuerza de atracción magnética lateral.

2.3.3 Velocidad y aceleración.

Las velocidades (derivadas de la posición respecto al tiempo) son representadas por $\dot{x}_m$, $\dot{y}_m$ en las ecuaciones 2.6, 2.7 y las aceleraciones (derivadas de la velocidad respecto al tiempo) se representan por $\ddot{x}_m$, $\ddot{y}_m$ por las ecuaciones 2.8, 2.7, basadas en su centro de gravedad.

$$\dot{x}_m = -hR \cos(\theta) \dot{\theta} \quad (2.6)$$

$$\dot{y}_m = hR \sin(\theta) \dot{\theta} \quad (2.7)$$

$$\ddot{x}_m = -hR \cos(\theta) \ddot{\theta} + hR \sin(\theta) \dot{\theta}^2 \quad (2.8)$$

$$\ddot{y}_m = hR \sin(\theta) \ddot{\theta} + hR \cos(\theta) \dot{\theta}^2 \quad (2.9)$$

2.3.4 Comportamiento de la corriente.

Para analizar el comportamiento de la corriente en el electroimán, este se modela como un circuito RL (resistencia, inductancia). La intensidad del campo magnético generado por el actuador electromagnético depende de la corriente suministrada. Las ecuaciones 2.10 y 2.11 describen la dinámica de carga y descarga de la corriente en el circuito RL.

$$Imc(t) = \frac{V_{in}}{R_{elec} + R_{inductor}} \left(1 - e^{-\frac{R_{elec} + R_{inductor}}{L_{elec}} t} \right) \quad (\text{etapa de carga}) \quad (2.10)$$

$$Imd(t) = \frac{V_{in}}{R_{elec} + R_{inductor}} e^{-\frac{R_{elec} + R_{inductor}}{L_{elec}} t} \quad (\text{etapa de descarga}) \quad (2.11)$$

donde:

I	corriente.
R_{elec}	resistencia de 300Ω (experimental).
$R_{inductor}$	resistencia interna de la bobina (experimental).
V_{in}	voltaje de entrada.

En conjunto, las ecuaciones del modelo matemático motor reciprocante magnético, describen cómo la **fuerza magnética** generada entre el electroimán y el imán permanente (F_p) se transmite al pistón, luego a la biela, manivela y finalmente al cigüeñal, donde se transforma en **par motor** τ_m .

En este capítulo se presentaron los orígenes del motor de combustión interna, junto con el mecanismo que lo compone (manivela–biela–pistón) y su principio de operación. Asimismo, se revisaron los antecedentes del motor reciprocante magnético, describiendo su mecanismo (manivela–biela–pistón), su principio de funcionamiento, el modelo matemático que lo rige y las principales variables que influyen en su desempeño.

Capítulo III. Estado del arte.

La revisión presenta una síntesis de la estructura, los materiales y el desempeño de los motores, considerando parámetros como la corriente suministrada, el voltaje, la velocidad máxima, la potencia de salida, el par motor y la eficiencia promedio. Asimismo, se abordan los problemas más comunes de montaje, entre los que destacan la alineación, el entrehierro, el sellado y la fricción. A continuación, se describen los trabajos más representativos.

3.1 Motores eléctricos magnéticos

En esta sección se revisan motores eléctricos magnéticos, que mantienen la estructura de un motor de combustión interna: pistón, biela, manivela y cigüeñal. La cámara de combustión se reemplaza por una cámara magnética (electroimán) y en la cabeza del pistón se coloca un imán permanente. El movimiento entre el punto muerto superior (PMS) y el punto muerto inferior (PMI), se consigue invirtiendo la polaridad de la bobina mediante un puente H o un inversor. Hay variantes con uno o varios pistones, diferentes configuraciones en línea o en V, distintas ubicaciones del electroimán (superior o lateral) y diferentes opciones de sensado y control.

En [14] se describe una variante de motor electromagnético de cuatro pistones basada en la estructura de un motor de combustión interna. En este diseño, la cámara de combustión es reemplazada por un electroimán, denominado cámara magnética, mientras que en la cabeza del pistón se incorpora un imán permanente. De esta manera, el movimiento del motor se obtiene mediante la interacción de campos magnéticos de atracción y repulsión. En conclusión el autor presenta una propuesta innovadora que permite transformar motores existentes en un sistema capaz de operar bajo un principio distinto, sin necesidad de una fabricación completamente nueva. Esta alternativa representa una solución práctica y de bajo costo, al aprovechar infraestructuras ya disponibles, lo que facilita su implementación. Asimismo, el enfoque descrito resalta su potencial como técnica eficiente para impulsar vehículos eléctricos, constituyéndose como una contribución relevante dentro de las tendencias actuales de investigación orientadas hacia la sostenibilidad y la mejora del desempeño energético, por otro lado, en [16] se presenta un esquema para la construcción de un motor electromagnético reciprocante de un solo pistón, en el cual el electroimán se ubica en la parte superior y el imán permanente en la cabeza del pistón y conserva la estructura de un motor de combustión interna convencional, dejando la puerta abierta para la construcción del prototipo.

En [19] se diseñó y desarrolló una variante de motor magnético basada en la estructura de un motor de combustión interna, en la cual la cámara de combustión fue reemplazada por una

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

cámara magnética que incorpora un electroimán, la cabeza del pistón fue modificada para incluir un imán permanente. De esta forma el mecanismo manivela, biela y pistón se mueve mediante la interacción de campos magnéticos. El autor llevó a cabo el diseño y la fabricación del motor electromagnético empleando imanes de tierras NdFeB, también conocidos como imanes de neodimio o imanes de tierras raras, una tarjeta Arduino, relevadores y sensores infrarrojos. El objetivo principal consistió en desarrollar un motor capaz de operar hasta 1000 rpm, manteniendo una característica de par motor constante.

En [20] se presenta el estudio de un sistema de propulsión electromagnética para aplicación automotriz, cuyo principio de funcionamiento difiere del de los motores de combustión interna, aunque conserva la estructura básica de un motor monocilíndrico en el que la cámara de combustión es sustituida por una cámara magnética. El sistema opera bajo el principio de repulsión magnética entre un electroimán y un imán permanente. El autor llevó a cabo un análisis experimental del motor, variando los valores de corriente y voltaje suministrados, a partir de lo cual se obtuvieron gráficos de potencia de entrada, velocidad, par motor, potencia de salida y eficiencia. Para condiciones de menor alimentación (10 V y 0.45 A), se reportó una potencia de entrada de 4.5 W, una velocidad de 271.6 rpm, una fuerza de 1.526 N y una eficiencia de 10 %. En contraste, para condiciones de mayor alimentación (20 V y 0.81 A), se alcanzó una potencia de entrada de 16.2 W, una velocidad de 517.7 rpm, una fuerza de 0.02533 N y una eficiencia media de 10.5 %.

En [15], se presenta un motor electromagnético como una alternativa libre de contaminación a los motores de combustión interna (CI) convencionales, con el objetivo de lograr un consumo de combustible de "punto cero". El motor se basa en la conversión de las fuerzas de atracción y repulsión magnética en trabajo mecánico, un principio similar al de un motor de dos tiempos. En lugar de un pistón y cilindro de un motor CI, el diseño propuesto utiliza un pistón con un imán permanente y un cilindro de aluminio, un material no magnético y más ligero. La sincronización del movimiento del pistón, que es un movimiento lineal recíproco, está controlada por una bobina electromagnética, un interruptor de relé y un temporizador. La principal ventaja de este motor es que es ecológico, no produce emisiones y no requiere componentes como válvulas o colectores. En cuanto a los resultados y conclusiones, el artículo presenta el diseño y los cálculos teóricos del motor, pero no incluye resultados de pruebas de rendimiento o eficiencia de una implementación física. El autor concluye, que el motor electromagnético

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

propuesto es más limpio y económico que un motor de combustión interna, y que no presenta problemas de sobrecalentamiento. El motor fue diseñado como una comparación con un motor de combustión interna convencional de 70 centímetros cúbicos, y los autores sugieren que su concepto puede ser ampliado a diseños más potentes, como un motor bóxer o con múltiples pistones, para mejorar la eficiencia y que pueda ser utilizado en vehículos comerciales.

En [21] se estudia la estructura de un sistema de funcionamiento híbrido basado en un motor de combustión interna monocilíndrico. En este diseño, la cámara de combustión es reemplazada por una cámara magnética con un electroimán, mientras que el pistón convencional es sustituido por un pistón magnético. Este trabajo ha sido considerado como referente para el desarrollo de una nueva generación de motores electromagnéticos, en el cual se emplea un circuito magnético para establecer el modelo matemático del sistema híbrido.

El motor magnético de tipo V con dos cilindros desarrollado en [22] se centra en la construcción y el diseño de un sistema que emplea fuerza electromagnética en lugar de combustibles fósiles. Este motor opera bajo el principio de repulsión magnética, mediante la incorporación de dos imanes permanentes y dos electroimanes. Los electroimanes se ubican en la cámara de combustión del motor, mientras que los imanes permanentes se localizan en la cabeza de los pistones. A diferencia de los motores convencionales, este diseño elimina la necesidad de bujías y válvulas de admisión y escape. Los resultados reportan una potencia de salida de 7.718 W y una eficiencia de 21.43 %. Los electroimanes están equipados con bobinas de cobre y son alimentados por una batería. El pistón, que contiene un imán permanente, realiza un movimiento alternativo entre el punto muerto superior (PMS) y el punto muerto inferior (PMI), convirtiendo este movimiento en un movimiento rotatorio acoplado al cigüeñal. El suministro de energía a los electroimanes es de la batería, controlado por un microcontrolador, utilizando un divisor de potencia, un temporizador y un interruptor de relevador para gestionar eficientemente la operación del sistema.

En [23] se presenta el diseño y prototipo de un motor magnético monocilíndrico. En este prototipo, la culata incorpora un electroimán y la cabeza del pistón contiene un imán permanente. Cuando el electroimán se energiza, atrae o repele al imán, provocando el desplazamiento del pistón entre el punto muerto superior (PMS) y el punto muerto inferior (PMI), lo que genera el movimiento del cigüeñal. El motor parte de la estructura de un motor de combustión interna, pero reemplaza la cámara de combustión por una cámara magnética.

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

La potencia del sistema se regula mediante la intensidad de la corriente aplicada, ya que esta determina la magnitud del campo electromagnético. El autor realizó un análisis experimental con corriente y voltaje fijos de 36 V y 1 A, obteniendo una potencia de entrada de 36 W, una velocidad de 200 rpm, un par motor de 0.3685 Nm, una potencia de salida de 7.718 W y una eficiencia de 21.44 %.

El autor [24], propone un motor cuya estructura se basa en un motor de combustión interna monocilíndrico. El diseño incorpora un electroimán que sustituye la cámara de combustión convencional por una cámara magnética, acoplando un imán en la cabeza del pistón con el fin de generar movimiento mediante campos magnéticos. Se describe un modelo desarrollado en software CAD; sin embargo, el autor no presenta pruebas experimentales de operación.

En [25] se presenta el modelado y la construcción de un prototipo de motor electromagnético recíprocante bicilíndrico de dos tiempos. Su desempeño se evaluó experimentalmente variando la tensión y la corriente de alimentación, mediante un transformador y registrando las variables características del sistema. Se reportan curvas características de potencia de entrada, velocidad, par motor, potencia de salida y eficiencia, útiles para identificar las tendencias de operación y las pérdidas dominantes. Los valores mínimos de corriente y voltaje empleados fueron de 18 V y 5.4 A, obteniéndose una potencia de entrada de 97.2 W, una velocidad de 194 rpm, un par motor de 1.244 Nm, una potencia de salida de 25.2706 W y una eficiencia de 25.999 %. Por otro lado, los valores máximos de corriente y voltaje fueron de 40 V y 10.5 A, alcanzándose una potencia de entrada de 420 W, una velocidad de 308 rpm, un par motor de 3.541 Nm, una potencia de salida de 114.2103 W y una eficiencia de 27.193 %. El estudio evidencia que la velocidad, el par motor y la potencia de salida pueden incrementarse mediante el aumento del suministro de energía en términos de voltaje y corriente.

En el trabajo de [26] se presenta el diseño y funcionamiento de un motor alternativo electromagnético, concebido como una posible sustitución del motor de combustión interna, aprovechando su infraestructura existente. El sistema está constituido por un electroimán que reemplaza la cámara de combustión e incorpora un imán de neodimio en la cabeza del pistón, generando el movimiento de este a través de campos magnéticos. El autor realizó un análisis experimental del motor, suministrando corriente y voltaje en diferentes valores, a partir de los cuales se elaboraron gráficos que muestran la potencia de entrada, la velocidad, el par, la potencia de salida y el rendimiento. En las condiciones de menor corriente y voltaje,

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

correspondientes a 25 V y 3 A, se obtuvo una potencia de entrada de 75 W, una velocidad de 560 rpm, un par motor de 0.9488 Nm, una potencia de salida de 55.64 W y una eficiencia del 74.19 %. En las condiciones de mayor corriente y voltaje, correspondientes a 35 V y 3 A, la potencia de entrada fue de 105 W, la velocidad alcanzó 610 rpm, el par motor se mantuvo en 0.9488 Nm, la potencia de salida fue de 60.61 W y la eficiencia registrada fue del 57.72 %.

En [27], presenta un análisis del diseño y funcionamiento de motores electromagnéticos como alternativa a los motores de combustión interna, destacando su potencial para reducir el uso de combustibles fósiles y la emisión de contaminantes. Entre los resultados más relevantes se señala que el empleo de imanes permanentes de neodimio y materiales adecuados para los electroimanes puede mejorar la eficiencia del sistema, aunque persisten limitaciones como pérdidas por calor, sobrecalentamiento de bobinas y baja eficiencia térmica en algunos prototipos, reportada en torno al 21.44 %. También, se resalta que el motor electromagnético posee ventajas como un ciclo de vida prolongado, bajos costos de operación y la ausencia de emisiones nocivas, lo que lo convierte en una alternativa ecológica y económica; sin embargo, requiere de una fabricación precisa y mejoras en su diseño para incrementar su rendimiento, siendo recomendable el uso de configuraciones con pistones magnéticos dobles para optimizar la potencia generada.

En [28] se presenta el diseño y la construcción de un prototipo, montado en banco de pruebas, de un motor recíprocante magnético de cuatro cilindros en V. Este incorpora un imán de neodimio en la parte superior y un imán permanente en la cabeza del pistón, operando mediante la atracción y repulsión de polos. El motor está conformado por las mismas piezas básicas de un motor de combustión interna convencional, tales como manivela, biela, pistón, cilindro y cigüeñal. El electroimán empleado en este trabajo es un solenoide de corriente alterna, mientras que el cigüeñal y la biela están fabricados en acero dulce. Los resultados obtenidos indican que el prototipo no es apto para levantar cargas de alta potencia ni para su aplicación en vehículos de gran tamaño. No obstante, se señala que este diseño puede optimizarse en todos sus aspectos mediante desarrollos sostenibles, lo que permitiría su uso como una alternativa viable al motor de combustión interna. Entre las ventajas de esta propuesta destaca que las empresas no tendrían que modificar el diseño ni los principios de funcionamiento ya establecidos.

En el estudio realizado por [29], se propone el diseño de un motor recíproco magnético

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

compuesto por un electroimán superior y un imán de neodimio ubicado en la cabeza del pistón. Este diseño, basado en la estructura de un motor de combustión interna, consta de ocho cilindros. El autor realizó un análisis experimental bajo condiciones de corriente y voltaje constantes, obteniendo resultados como la potencia de entrada, velocidad, par, potencia de salida y eficiencia. Los parámetros empleados fueron 12 V y 2 A, con una potencia de entrada de 24 W, alcanzando una velocidad de 160 rpm, un par motor de 0.378 Nm, una potencia de salida de 6.3 W y una eficiencia del 26.38 %.

En el trabajo realizado por [30], presenta el diseño y construcción de un motor solenoide en configuración V4, basado en principios electromagnéticos, como alternativa a los motores de combustión interna. El estudio describe el funcionamiento de los solenoides y pistones metálicos que transforman el movimiento lineal en rotación del cigüeñal, destacando que la velocidad del motor (RPM) puede regularse mediante un potenciómetro que controla la corriente aplicada a las bobinas. Los resultados muestran que el empleo de pistones esféricos metálicos reduce la fricción y las vibraciones, lo que permite alcanzar altos regímenes de giro con operación estable, además de un control preciso de la velocidad al variar la corriente. Sin embargo, se identifica como limitación principal la dependencia de una fuente de corriente alterna (CA), lo que restringe la portabilidad del motor. En sus conclusiones, los autores señalan que el motor opera de acuerdo con lo planeado, demostrando viabilidad técnica, pero plantean como trabajo futuro la integración de un sistema de alimentación con baterías recargables de corriente continua (CC) para superar la restricción de movilidad y potenciar el uso práctico del motor.

El estudio de [31] presenta el desarrollo de un prototipo de motor monocilíndrico de efecto recíproco magnético, adaptado a partir de un motor de combustión interna convencional. El diseño incorpora un electroimán en la culata y un imán permanente en la cabeza del pistón, aprovechando interacciones electromagnéticas para generar movimiento. Mediante un análisis experimental con parámetros controlados de 230 V y 0.7 A, se registraron valores operativos clave: potencia de entrada de 161 W, velocidad de 200 rpm, par motor 6.3 Nm, potencia de salida de 131.9 W y eficiencia energética (81.95 %).

En [32] se presenta el diseño y análisis de un prototipo de motor reciprocante magnético con configuración en V de ocho cilindros. Este prototipo parte de la estructura de un motor de combustión interna, conservando el mecanismo manivela, biela y pistón, pero reemplazando la

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

cámara de combustión por una cámara magnética. En esta última se incorpora un electroimán, mientras que en la cabeza del pistón se acopla un imán, generando así el movimiento mediante la interacción de campos magnéticos. El trabajo incluye un análisis experimental en el que se suministraron valores fijos de corriente y voltaje, obteniéndose parámetros como la potencia de entrada, la velocidad, la potencia de salida y la eficiencia. Los resultados experimentales reportan un suministro de 36 V y 1.2 A, correspondientes a una potencia de entrada de 43.2 W, una velocidad de 750 rpm, una potencia de salida de 11.8 W y una eficiencia de 27.1 %.

El trabajo presentado por [33], propone la creación de un motor electromagnético como alternativa a los motores de combustión interna, eliminando componentes tradicionales como combustible, válvulas y sistemas de refrigeración. El diseño experimental se basa en la interacción entre un electroimán en la culata y un imán permanente en el pistón, generando un movimiento alternativo que se transforma en rotación mediante el cigüeñal. Los resultados de las pruebas realizadas demostraron que el prototipo es más ligero, consume menos energía y produce mayor par motor en comparación con motores eléctricos convencionales, además de operar sin combustión, por tanto, sin emisiones contaminantes ni necesidad de sistemas auxiliares complejos. Finalmente, se concluye que este tipo de motor representa una opción viable y sustentable frente a los motores comerciales de combustión interna, al ser más simple, silencioso, libre de combustibles fósiles y con potencial para aplicaciones futuras en transporte y generación de energía.

En [13] se describe la estructura, el prototipo y los resultados experimentales de un motor reciprocante magnético. Este diseño parte de la configuración de un motor de combustión interna, sustituyendo la cámara de combustión por una cámara magnética e incorporando un imán permanente de neodimio en la cabeza del pistón, con el objetivo de generar movimiento mediante la atracción y repulsión de los campos magnéticos. El autor realizó un análisis experimental del sistema, aplicando diferentes valores de corriente y voltaje, a partir de los cuales se obtuvieron gráficas correspondientes a la potencia de entrada, la velocidad, el par motor, la potencia de salida y el rendimiento. Para los valores más bajos de operación, correspondientes a 30 V y 0.34 A, se obtuvo una potencia de entrada de 10.2 W, una velocidad de 150 rpm, un par motor de 0.02998 Nm, una potencia de salida de 0.55 W y una eficiencia de 3.58 %. En condiciones de mayor exigencia, con 30 V y 3.48 A, se registró una potencia de entrada de 104.4 W, una velocidad de 400 rpm, un par motor de 0.02533 Nm, una potencia

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

de salida de 1.273 W y una eficiencia promedio de 3.58 %.

La tabla 3.1, sintetiza trabajos sobre motores reciprocantes magnéticos con arquitectura semejante a la de un motor de combustión interna (pistón, biela, manivela y cigüeñal). Para cada referencia se indica la estructura (número y disposición de cilindros), las condiciones eléctricas (corriente y voltaje), el régimen de giro (rpm), el par motor y la potencia. La última columna recoge la eficiencia reportada por los autores. Cuando una fuente no proporciona un dato, se marca con “-”. En conjunto, los trabajos se agrupan en dos perfiles: (i) estudios de diseño/modelado sin validación experimental y (ii) prototipos evaluados en banco de pruebas. De esta manera, la tabla permite identificar tanto las tendencias de investigación más comunes como las limitaciones recurrentes en torno al suministro de energía y la eficiencia.

Tabla 3.1: Parámetros de motores reciprocantes magnéticos con estructura de motor de combustión interna.

Autor	Año	Estructura	Corriente	Voltaje	rpm	Par motor	Potencia	η
[13]	2024	1 cilindro	3.48A	30V	400	0.029Nm	1.273W	3.58 %
[33]	2023	1 cilindro	-	-	-	-	-	-
[30]	2022	V-4-cilindros	-	-	-	-	-	-
[31]	2022	1 cilindro	0.7A	230V	200	6.3Nm	131.9W	81.95 %
[32]	2022	V-8-cilindros	1.2A	36V	750	-	11.8W	27.1 %
[29]	2021	V-8-cilindros	2A	12V	160	0.378Nm	6.3W	26.38 %
[26]	2020	4-cilindros	3A	35V	610	0.9488Nm	60.61W	57.72 %
[27]	2020	1 cilindro	-	-	-	-	-	21.44 %
[28]	2020	V-4-cilindros	-	-	-	-	-	-
[21]	2018	1 cilindro	-	-	-	-	-	-
[22]	2018	V-2-cilindros	-	-	-	-	7.718W	21.43 %
[23]	2018	1 cilindro	1A	36V	200	0.368Nm	7.718W	21.44 %
[24]	2018	1 cilindro	-	-	-	-	-	-
[25]	2018	2 cilindros	10.5A	40V	308	3.541Nm	114.210W	27.193 %
[19]	2017	1-cilindro	-	-	1000	-	-	-
[20]	2017	1 cilindro	0.81A	20V	517.7	-	-	10.5 %
[14]	2013	4 cilindros	-	-	-	-	-	-
[16]	2013	1 cilindro	-	-	-	-	-	-
[34]	2010	V-2-cilindros	-	-	10500	5.091Nm	11.190W	-

Como se puede observar en la tabla 3.1, predominan configuraciones monocilíndricas, aunque también se reportan arreglos en V (2, 4 y 8 cilindros) para elevar potencia. Los

valores presentados por los autores muestran una amplia dispersión: corrientes aproximadas de 0.7–10.5 A, tensiones de 12–230 V, velocidades desde 160 hasta 10 500 rpm, pares que van de centésimas a varios Nm y potencias de 1–130 W. La eficiencia registrada oscila entre $\approx 3\%$ y $\approx 82\%$. Estas variaciones reflejan tanto la diversidad de enfoques constructivos como la falta de estandarización en los métodos de ensayo, lo que dificulta establecer comparaciones directas. En consecuencia, se evidencia la necesidad de estudios que analicen de manera sistemática el suministro de energía en motores magnéticos de baja potencia, con el fin de comprender mejor los factores que condicionan su desempeño y proponer lineamientos de diseño que permitan incrementar la eficiencia y la viabilidad práctica de estas tecnologías.

3.1.1 Vehículos híbridos.

En la actualidad el desarrollo de motores híbridos ha transformado el sector automotriz al combinar motores de combustión interna con eléctricos, logrando mejoras en eficiencia y reducción de emisiones, como demostró Toyota con el Prius [35]. Chan [36] profundizó en el estado del arte de los vehículos híbridos eléctricos, identificando configuraciones, ventajas y limitaciones técnicas. En paralelo, diversas investigaciones han explorado combustibles alternativos: Yilmaz y Krein [37] analizaron el potencial del hidrógeno en vehículos de celda de combustible, resaltando los retos de su almacenamiento; Demirbas [38] destacó los avances en la producción y uso de biocombustibles como sustitutos parciales del diésel; Shafiee y Topal [39] revisaron la viabilidad de la economía del hidrógeno, subrayando la importancia de una infraestructura sólida; y Li et al. [40] evaluaron los beneficios y limitaciones de combustibles alternativos en aplicaciones automotrices. En conjunto, estos estudios muestran que los motores híbridos y los combustibles alternativos constituyen una vía prometedora para una movilidad más sostenible, aunque todavía enfrentan desafíos tecnológicos, económicos e infraestructurales.

El trabajo elaborado en [41], presenta el modelado de un motor híbrido compuesto por un sistema de combustión interna y un motor eléctrico, orientado a la gestión de la energía mediante un esquema de potencia dividida. Los resultados de las simulaciones, basados en la programación dinámica discreta, demuestran que dichos modelos pueden emplearse como herramienta de entrenamiento para algoritmos de gestión de energía fundamentados en redes neuronales artificiales, aplicados a vehículos eléctricos híbridos. En cuanto a las especificaciones técnicas, el motor eléctrico alcanza una potencia máxima de 87 kW, un par motor de máximo

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

de 280 Nm y una velocidad de 11000 rpm, mientras que el motor de combustión interna reporta una potencia máxima de 75 kW a 5600 rpm y un torque máximo de 140 Nm a 4300 rpm.

En [42] se estudia la aplicación de combustibles alternativos, específicamente mezclas de hidrógeno, metanol y etanol, en un motor de gasolina multicilíndrico mediante simulación unidimensional. El análisis contempla dos mezclas distintas: una compuesta por 10 % de hidrógeno y 90 % de metanol, y otra integrada por 10 % de hidrógeno y 90 % de etanol. Los resultados obtenidos se comparan con una mezcla base de gasolina al 100 %, con el objetivo de evaluar el potencial de los combustibles alternativos en términos de desempeño y eficiencia. El análisis de las características de la combustión incluye el control de la presión en diferentes ángulos del cigüeñal para todos los combustibles. Los parámetros de rendimiento previstos incluyen la potencia, el par, el consumo específico de combustible en el freno, la mezcla de hidrógeno y etanol mostró una eficiencia superior, con un aumento del 20 % de la potencia en comparación con la mezcla de hidrógeno y metanol. La mezcla de 90 % de etanol con 10 % de hidrógeno y la de 90 % de metanol con 10 % de hidrógeno mejoraron el rendimiento y la potencia del motor, el 10 % de hidrógeno mejoraron su rendimiento y contribuyeron a reducir las emisiones en comparación con el combustible 100 % gasolina.

El estudio elaborado en [34], presenta el diseño y desarrollo de un prototipo de motor bicilíndrico híbrido con estructura en V. Este motor combina un pistón de combustión interna, que conserva la cámara de combustión, con un segundo pistón cuyo sistema reemplaza dicha cámara por una cámara magnética equipada con un electroimán superior y un imán de neodimio permanente incorporado en la cabeza del pistón. De esta manera, el prototipo aprovecha dos fuentes de energía para generar par motor. Los resultados experimentales reportados muestran una potencia de salida de 11.190 W, un par motor de 5.091 Nm y una velocidad aproximada de 10500 rpm.

En la revisión realizada se identificaron diversas propuestas de diseño del motor recíprocante magnético, algunas desarrolladas mediante simulación y otras implementadas de manera experimental. La mayoría de ellas coinciden en la reutilización de la estructura de un motor de combustión interna, sustituyendo la cámara de combustión por una cámara magnética equipada con un electroimán en la parte superior, además de incorporar un imán permanente en la cabeza del pistón. Los trabajos experimentales analizados aportan información valiosa

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE.

sobre parámetros como potencia de entrada, corriente y voltaje suministrados, velocidad máxima, par motor, potencia de salida y eficiencia, lo que permite obtener un panorama general del desempeño y las posibilidades de esta innovación tecnológica.

En cuanto a los vehículos híbridos, la literatura revisada muestra dos tendencias principales: por un lado, la integración de motores de combustión interna como generadores eléctricos destinados a la recarga de baterías que alimentan a los motores eléctricos encargados de transmitir el movimiento a las ruedas. Por otro, la exploración del uso de combustibles alternativos, como metanol, etanol e hidrógeno, en la búsqueda de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mejorar la sostenibilidad energética.

Capítulo IV. Modelado del motor de combustión interna.

El modelado matemático de motores de combustión interna (MCI) es una herramienta en el diseño, análisis y optimización de estos sistemas. Un motor de combustión interna de un solo pistón, aunque conceptualmente sencillo, involucra una serie de procesos físicos y químicos complejos que deben ser comprendidos y representados matemáticamente para predecir su comportamiento de manera precisa.

4.1 Modelo combustible.

4.1.1 Inyección.

Durante la fase de inyección, la computadora envía una señal al inyector para controlar el tiempo de inyección (t_i), liberando una cantidad precisa de combustible. Este proceso se repite una vez por ciclo en cada cilindro del motor. El inyector, siendo un sistema mecánico, requiere un tiempo mínimo para superar sus inercias internas. La cantidad de gasolina inyectada en cada ciclo es directamente proporcional al tiempo de inyección establecido. Durante el tiempo muerto del ciclo, no se realiza la inyección de combustible. Se utilizaron diversos modelos desarrollados por los siguientes autores: [43], [44], [45], [46] y [47]. El estudio se divide en dos etapas principales: la inyección y la dinámica en el colector de admisión.

La cantidad de combustible que puede suministrar el inyector se determina mediante la ecuación 4.1.

$$m_{fi} \text{ (mg/ciclo)} = C_{iny}(t_i - t_0) \quad (4.1)$$

Donde:

t_0	Tiempo muerto del inyector.
C_{iny}	Caudal de combustible inyectado (mg/ms).
t_i	Tiempo de inyección.
m_{fi}	Masa de combustible inyectada.

Para calcular el flujo de combustible suministrado al motor, se utiliza la ecuación 4.2, en un motor de cuatro tiempos, se producen dos vueltas por inyección, por lo tanto, es necesario multiplicar por 2 para considerar un ciclo completo.

CAPÍTULO IV. MODELADO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

$$\dot{m}_{fi} \text{ (kg/h)} = m_{fi} \text{ (mg/ciclo)} \cdot n \text{ (rpm)} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 10^{-6} = 1.2 \cdot 10^{-4} m_{fi} \text{ (mg/ciclo)} \cdot n \text{ (rpm)} \quad (4.2)$$

donde:

m_{fi} masa combustible inyectada.
 rpm revoluciones por minuto.

La figura 4.1 muestra el diagrama a bloques del flujo de masa de combustible suministrada por el inyector.

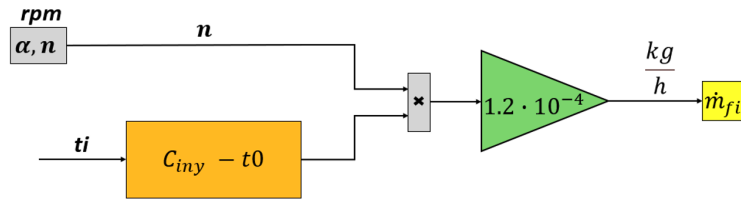


Figura 4.1: Diagrama a bloques del flujo de masa de combustible inyectada.

En la Figura 4.2, se muestra la dinámica del combustible en el colector de admisión, destacando cómo una parte del combustible permanece en el colector de admisión cuando se activa el inyector, mientras que otra parte se acumula en la parte superior de la válvula de admisión.

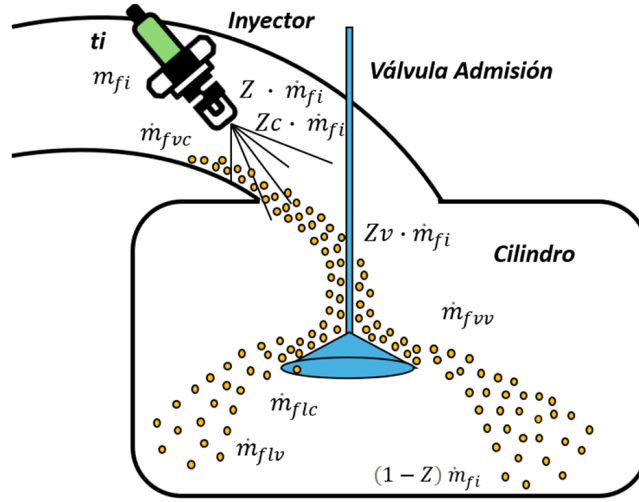


Figura 4.2: Dinámica del combustible que ingresa al cilindro.

De acuerdo con [45], la masa de gasolina proporcionada por el inyector, m_{fi} , se determina mediante la ecuación 4.3. En esta ecuación, (Z) representa la fracción de combustible líquido que se distribuye en las superficies, mientras que $(1 - Z)$ representa la fracción que se convierte en vapor y entra al cilindro. Cuando el combustible inyectado impacta el conducto de admisión, se denota como (Z_c) , y si impacta la válvula de admisión, se denota como (Z_v) .

$$\dot{m}_{fi} = (1 - Z)\dot{m}_{fi} + Z\dot{m}_{fi} = (1 - Z)\dot{m}_{fi} + Z_c\dot{m}_{fi} + Z_v\dot{m}_{fi} \quad (4.3)$$

La ecuación 4.4, se usa para determinar la cantidad de combustible líquido.

$$Z = Z_c + Z_v \quad (4.4)$$

Las ecuaciones 4.5 y 4.6, se emplean para describir el comportamiento del combustible en el conducto y la válvula de admisión, considerando dos formas de ingreso al cilindro: líquida y vapor. Estas ecuaciones expresan la diferencia entre la cantidad depositada y la que finalmente entra al cilindro, como se ilustra en la figura 4.2.

$$\text{Conducto} : \frac{dm_{lc}}{dt} = Z_c\dot{m}_{fi} - (\dot{m}_{fvc} + \dot{m}_{flc}) \quad (4.5)$$

$$\text{Válvula} : \frac{dm_{lv}}{dt} = Z_v\dot{m}_{fi} - (\dot{m}_{fvv} + \dot{m}_{flv}) \quad (4.6)$$

CAPÍTULO IV. MODELADO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

donde:

m_{lc}	masa líquida conducto.
m_{lv}	masa líquida válvula.
$\dot{m}_{fvc}$	masa combustible vapor colector.
$\dot{m}_{flc}$	masa combustible líquido colector.
$\dot{m}_{fvv}$	masa combustible vapor válvula.
$\dot{m}_{flv}$	masa combustible líquida válvula.

La ecuación 4.7, es la suma de la ecuación 4.5 y 4.6, donde se usan para determinar el caudal neto del combustible.

$$\dot{m}_{fl} = \frac{dm_{lc} + dm_{lv}}{dt} = Z_c \dot{m}_{fi} + Z_v \dot{m}_{fi} - (\dot{m}_{fvc} + \dot{m}_{flc} + \dot{m}_{fvv} + \dot{m}_{flv}) = Z \dot{m}_{fi} - (\dot{m}_{fvc} + \dot{m}_{flc} + \dot{m}_{fvv} + \dot{m}_{flv}) \quad (4.7)$$

Para determinar la cantidad de combustible que abandona la película de combustible [48], demuestra que se aproxima a una fracción $(\frac{1}{\tau_{fl}})$ de la masa existente en la película expresado en la ecuación 4.8.

$$(\dot{m}_{fvc} + \dot{m}_{flc} + \dot{m}_{fvv} + \dot{m}_{flv}) = \frac{1}{\tau_{fl}} m_{fl} \quad (4.8)$$

En la ecuación 4.9, se simplifica la ecuación 4.8 y queda expresada de la siguiente forma.

$$\dot{m}_{fl} = Z \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fl}} m_{fl} \quad (4.9)$$

La ecuación 4.10, determina la masa total de combustible ($\dot{m}_f$) que ingresa al cilindro es igual a la cantidad que ingresa en forma de vapor, más la proporcionada por la película líquida.

$$\dot{m}_f = (1 - Z) \dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_{fl}} m_{fl} \quad (4.10)$$

Para determinar el modelo global del combustible se retoman los valores característicos del combustible (Z) y τ_{fl} de [45], los cuales fueron desarrollados para diversos puntos de funcionamiento. Finalmente, la ecuación 4.11, determina el modelo global del combustible que ingresa al cilindro.

$$\dot{m}_f = (1 - Z)\dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_{fl}}m_{fl} \quad (4.11)$$

4.2 Modelo del aire.

Para determinar el modelo del aire, se utiliza la ecuación 4.12, que define la derivada temporal de la masa de aire en el múltiple de admisión. Esta masa de aire es igual a la que atraviesa la válvula de mariposa menos la masa de aire que ingresa al cilindro, como expresan diversos autores: [49], [50], [48], [51], [52].

$$\frac{d(m_{aadm})}{dt} = \dot{m}_{aval} - \sum_1^{ncil} \dot{m}_{acil} \quad (4.12)$$

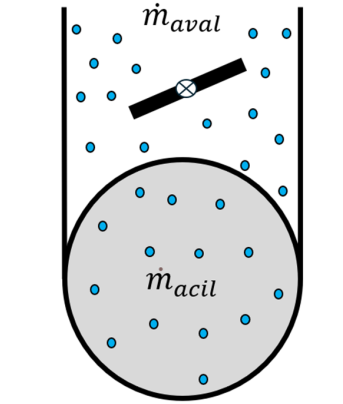


Figura 4.3: Masa de aire en el múltiple de admisión.

La figura 4.3, representa la masa de aire que pasa a través de la válvula de mariposa, la masa de aire que está en el múltiple de admisión y la masa de aire que ingresa al cilindro.

4.2.1 Válvula mariposa.

Para determinar la masa de aire que atraviesa la válvula de mariposa, se utiliza la ecuación 4.13, esta ecuación describe el flujo de un fluido compresible a través de un conducto, impulsado por una diferencia de presiones y afectado por una reducción de sección provocada por la válvula de mariposa, según lo expuesto por [9].

CAPÍTULO IV. MODELADO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

$$\dot{m}_{aval} = \frac{C_d \cdot A_{th} \cdot P_{atm}}{\sqrt{R \cdot T_{adm}}} \cdot n_{vol} \quad (4.13)$$

donde:

$\dot{m}_{aval}$	Masa aire que atraviesa la válvula de mariposa.
C_d	Coefficiente de descarga, proporcionado por el fabricante.
A_{th}	Área del conducto donde está acoplada la válvula de mariposa en m^2 .
P_{atm}	Presión atmosférica en Pa .
R	Constante R de los gases ideales en $\frac{J}{kg \cdot K}$.
T_{adm}	Temperatura del múltiple de admisión en $^{\circ}K$
n_{vol}	Eficiencia volumétrica.
$\sum_1^{ncil} \dot{m}_{acil}$	Número de cilindros.

Para determinar el área de apertura del plato de la válvula de mariposa en función del ángulo (α), se utiliza la ecuación 4.14, este concepto describe que el colector actúa, como un tubo cilíndrico con una válvula de mariposa circular articulada a través de su diámetro, según lo descrito por [9]

$$A_{th} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \right) + \frac{2}{\pi} \left[\frac{a}{\cos \alpha} (\alpha - a^2 \alpha_0)^{1/2} - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \sin^{-1} \left(\frac{a \cos \alpha_0}{\cos \alpha} \right) - a(1 - a^2)^{1/2} + \sin^{-1} a \right] \quad (4.14)$$

donde:

α_0	es el ángulo cuando la mariposa se encuentra en posición de ralentí.
d	diámetro del eje de la válvula de mariposa.
D	diámetro del conducto del acelerador.
$a = \frac{d}{D}$	es la relación entre el diámetro del eje y el diámetro del conducto del acelerador.

Para prevenir obstrucciones en el orificio del acelerador, la placa del acelerador generalmente se encuentra posicionada en un ángulo diferente de cero grados (5° , 10° o 15°).

Para construir un coeficiente de descarga para la ecuación de la masa aire válvula de mariposa, se necesita construir un polinomio que se determinó a partir de [53], donde

CAPÍTULO IV. MODELADO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

se obtuvieron los datos del coeficiente de descarga de un motor de combustión interna monocilíndrico.

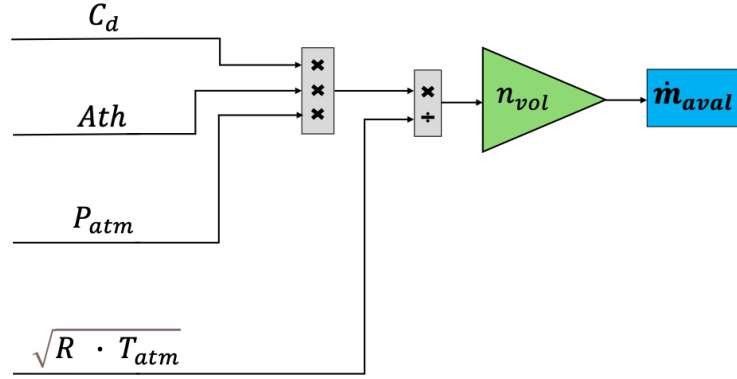


Figura 4.4: Diagrama a bloques utilizado en matlab simulink, para determinar la masa aire válvula de mariposa.

La figura 4.4, es un esquema representativo utilizado en matlab simulink el cual representa, el modelo de masa de aire que atraviesa la válvula de mariposa, donde están involucradas las entradas del coeficiente de descarga, la apertura del plato de la válvula de mariposa, la presión atmosférica, la constante de los gases ideales y la temperatura de admisión.

4.2.2 Rendimiento volumétrico.

Para determinar la eficiencia de llenado de un motor, se utiliza la ecuación 4.15, conforme a lo explicado por [9], la eficiencia depende de la densidad del aire (ρ_a), del volumen desplazado V_d y de la masa de aire que ingresa al cilindro m_{acil} .

$$\eta_{vol} = \frac{m_{acil}}{\rho_a V_d} \quad (4.15)$$

4.2.3 Válvula de admisión.

El flujo de masa de aire que ingresa al cilindro se determina a partir de la ecuación 4.17, contemplando la densidad del aire en el múltiple de admisión ρ_{adm} , que depende de la presión y temperatura del múltiple de admisión (P_{adm}, T_{adm}), que se calcula por ecuación 4.16 usando la ecuación de gas ideal. El flujo de masa de aire que ingresa al cilindro para un motor de

CAPÍTULO IV. MODELADO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

4 tiempos, debe tomar en cuenta que cada 2 vueltas se completa un ciclo y una carga del cilindro y se expresa de la siguiente manera en [45].

$$\rho_{adm} = \frac{p_{adm}}{R T_{adm}} \quad (4.16)$$

$$\dot{m}_{acil} = \frac{1}{2} n V_d \rho_{adm} \eta_{vol} = \frac{1}{2} n V_d \frac{P_{adm}}{R \cdot T_{adm}} \eta_{vol} \quad (4.17)$$

donde:

ρ_{adm}	densidad del aire múltiple de admisión.
V_d	volumen desplazado (m^3).
n	revoluciones por minuto (rpm).
P_{adm}	presión múltiple de admisión (Pa).
η_{vol}	eficiencia volumétrica.
R	constante R de los gases ideales en ($\frac{J}{Kg \cdot K}$).
T_{adm}	temperatura del múltiple de admisión en K .

El factor $\frac{1}{2}$ procede del hecho que, en un motor de cuatro tiempos, se produce una renovación de la carga cada dos vueltas y se completa un ciclo.

Para obtener el flujo másico del aire que ingresa al cilindro en kg/h , se utiliza la ecuación 4.18.

$$\dot{m}_{acil} (kg/h) = \left[\frac{1}{2} \frac{n \left(\frac{rpm}{60} \right) V_d (l \cdot 10^{-3})}{R T_{adm}} P_{adm} (kPa \cdot 10^3) \eta_{vol} \right] 3600 \quad (4.18)$$

Por lo tanto, la ecuación de masa de aire que ingresa al cilindro se expresa de la siguiente manera en la ecuación 4.19.

$$\dot{m}_{acil} (kg/h) = \frac{30 V_d}{R T_{adm}} n P_{adm} \eta_{vol} \quad (4.19)$$

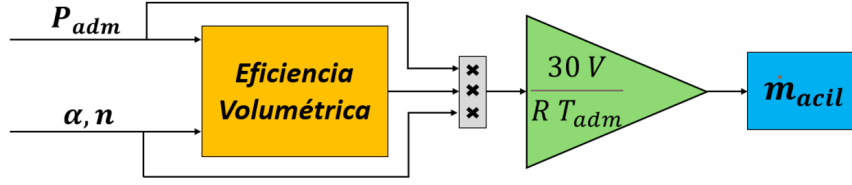


Figura 4.5: Diagrama a bloques utilizado en matlab simulink, para determinar la masa de aire que ingresa al cilindro.

La figura 4.5, representada la masa de aire que ingresa al cilindro, donde está involucrada la eficiencia volumétrica que es la eficiencia con la que se llena el cilindro de aire, la presión del múltiple de admisión, la apertura de la válvula de mariposa que controla la masa de aire que ingresa al cilindro, multiplicado por el volumen total, la constante de los gases ideales y la temperatura de admisión.

4.3 Modelo del colector de admisión.

La ecuación 4.20, representa la presión del múltiple de admisión, la cual parte de la ley de los gases ideales, se retoma la ecuación determinada por [54], donde se considera que la temperatura de admisión T_{adm} es igual a la temperatura atmosférica, ya que no varía o lo hace muy lentamente y se considera que el volumen V_{adm} y el volumen en el colector es constante.

$$\dot{P}_{adm} = \frac{R \cdot T_{adm}}{V_{adm}} (\dot{m}_{aval} - \dot{m}_{acil}) \quad (4.20)$$

Para determinar la ecuación de la presión del múltiple de admisión, se sustituye la ecuación 4.19, que es la ecuación de masa de aire que ingresa al cilindro en la ecuación de la presión del múltiple de admisión anterior y se obtiene la ecuación del colector de admisión en la ecuación 4.21.

$$\dot{P}_{adm} = \frac{R \cdot T_{adm}}{V_{adm}} \left(\dot{m}_{aval} - \frac{30V}{RT_{adm}} n P_{adm} \eta_{vol} \right) \quad (4.21)$$

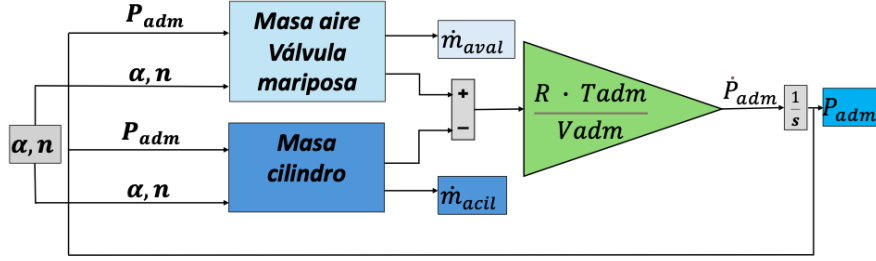


Figura 4.6: Diagrama a bloques construido en matlab simulink, para determinar la presión del colector de admisión.

La figura 4.6, representa el modelo del colector de admisión, donde están acoplados el modelo de la masa aire que atraviesa la válvula de mariposa, la masa aire que ingresa al cilindro, que se multiplica por la constante universal de los gases ideales, la temperatura de admisión y el volumen desplazado, para obtener la presión del múltiple de admisión.

4.4 Combustión y par motor.

4.4.1 Trabajo neto.

El trabajo neto w_{net} , es necesario para evaluar la eficiencia y la efectividad de un sistema termodinámico. En motores y otros dispositivos, maximizar el trabajo neto es fundamental para mejorar el rendimiento y la eficiencia energética. En resumen, el trabajo neto es un concepto en la termodinámica y en la ingeniería, representando la cantidad de energía útil que un sistema puede proporcionar después de compensar cualquier trabajo necesario para su operación. El trabajo neto del ciclo de trabajo del motor, se calcula de la siguiente manera determinado por [9], [11] en la ecuación 4.22.

$$w_{\text{net}} = \frac{m_m \eta_T \eta_c Q_{\text{HV}}}{\text{AFR} + 1} \left(1 - \frac{m_r}{m_m} \right) \quad (4.22)$$

donde:

m_m	masa mezcla.
η_T	es la eficiencia térmica.
η_c	es la eficiencia de combustión.
Q_{HV}	es el poder calorífico del combustible.

CAPÍTULO IV. MODELADO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

AFR es la relación aire-combustible.

m_r es la masa residual.

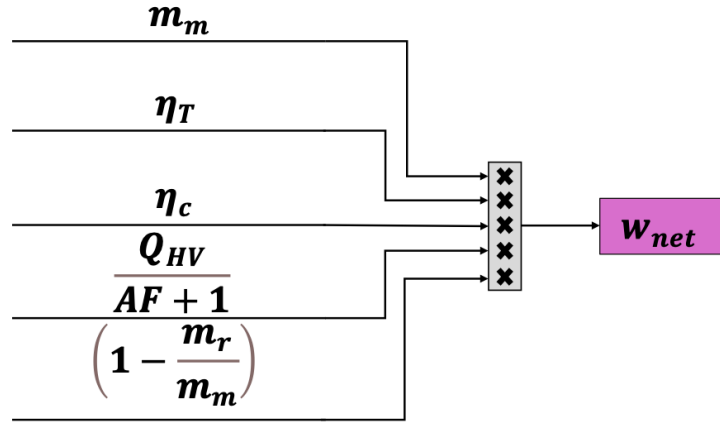


Figura 4.7: Diagrama esquemático utilizado en matlab simulink del modelo del trabajo neto.

La figura 4.7, representa el modelo del trabajo neto donde se conecta la masa mezcla, eficiencia térmica, eficiencia de combustible, el poder calorífico del combustible, la relación aire combustible y la relación de masas.

La masa mezcla se determina de la siguiente manera expresada por [11] en la ecuación 4.23.

$$m_m = m_a + m_f + m_r \quad (4.23)$$

m_a Masa aire de una sola carga al cilindro.

m_f Masa combustible una sola carga a la cámara de combustión.

m_r Masa residual equivale al 5 % de la masa mezcla m_m .

La eficiencia térmica es una medida de la efectividad con la que un sistema termodinámico convierte la energía térmica en trabajo útil y se determina de la siguiente manera por ecuación 4.24, retomada de [11].

$$\eta_T = 1 - \left(\frac{1}{r_C} \right)^{k-1} \quad (4.24)$$

CAPÍTULO IV. MODELADO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

$k = \frac{c_p}{c_v}$ es la relación de calores específicos a presión constante y constante volumen.

La manera en la cual se determina la relación de compresión es mediante la ecuación 4.25, donde el volumen comprimido V_c es igual a V_2 y dado que V_1 es el volumen total (incluido V_2).

$$r_c = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (4.25)$$

La relación de compresión se define como el número de veces se comprime el V_d volumen desplazado, la relación de compresión para este motor de 25 centímetros cúbicos es de 8. V_c se determina de la siguiente manera por la ecuación 4.26.

$$V_c = \frac{V_d}{r_c - 1} \quad (4.26)$$

4.4.2 Potencia indicada.

La potencia indicada (P_i), de un motor de combustión interna se refiere a la potencia desarrollada dentro de los cilindros del motor, sin considerar las pérdidas mecánicas por fricción, aire acondicionado, bombas, etc. Para calcular la potencia indicada, es necesario conocer el trabajo indicado por ciclo y la frecuencia a la que ocurren estos ciclos. La potencia indicada se calcula por la ecuación 4.27, retomada de [11].

$$P_i = \frac{n \cdot w_{net}}{120} \quad (4.27)$$

n	Revoluciones por minuto (<i>rpm</i>).
w_{net}	Trabajo neto (J).
120	Contempla un ciclo de 2 vueltas del cigüeñal .

4.4.3 Potencia al freno.

La potencia al freno (P_b), también conocida como potencia efectiva o potencia de salida) de un motor de combustión interna es la potencia que se puede medir directamente en el eje de salida del motor. Esta medida toma en cuenta todas las pérdidas mecánicas internas, por lo tanto, menor que la potencia indicada. La potencia al freno se determina por la ecuación 4.28, expresado por [11].

CAPÍTULO IV. MODELADO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

$$P_b = n_m \cdot P_i \quad (4.28)$$

n_m	Eficiencia mecánica.
P_i	Potencia indicada (W).

4.4.4 Par motor.

El par motor (Par) en un motor de combustión interna se define como la fuerza resultante que actúa a una cierta distancia para producir rotación alrededor del eje del cigüeñal. De acuerdo con la ecuación 4.29, este parámetro puede calcularse a partir de la potencia de freno P_b , descrita en la ecuación 4.28, lo que permite relacionar directamente la capacidad de generación de trabajo del motor con su régimen de giro [11].

$$Par = \frac{30 \cdot P_b}{\pi \cdot n} \quad (4.29)$$

P_b	Potencia al freno (W).
n	Revoluciones por minuto (rpm).

La figura 4.8 muestra el modelo global de un motor de combustión interna de un solo pistón, en el cual se integran distintos submodelos interconectados. Dicho esquema contempla el modelo del combustible, el modelo del aire, el colector de admisión y el modelo de combustión, representando de manera conjunta las principales variables y procesos que intervienen en el funcionamiento del motor.

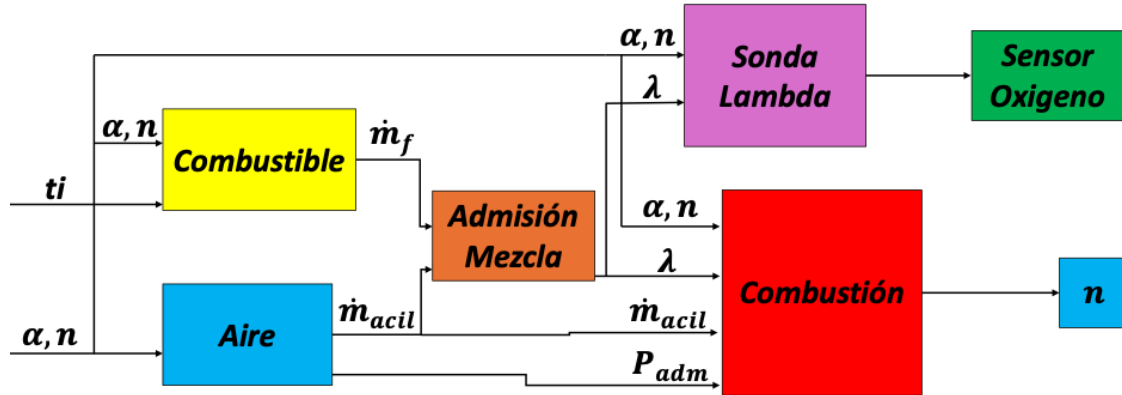


Figura 4.8: Submodelos interconectados del motor de combustión interna.

El modelo de combustible considera tanto las características del inyector como la dinámica del flujo de combustible en el colector de admisión, permitiendo estimar la cantidad y el tiempo de inyección que determinan la mezcla aire-combustible. Por su parte, el modelo del aire incluye las dimensiones del colector de admisión, el coeficiente de descarga de la válvula de mariposa, la presión en el múltiple de admisión, así como la masa de aire que atraviesa la válvula y la que finalmente ingresa al cilindro. Finalmente, el modelo de combustión integra las variables fundamentales que condicionan el desempeño de un motor de combustión interna, tales como el trabajo generado en el ciclo, la potencia efectiva entregada y el par motor disponible en el cigüeñal.

Capítulo V. Resultados en simulación.

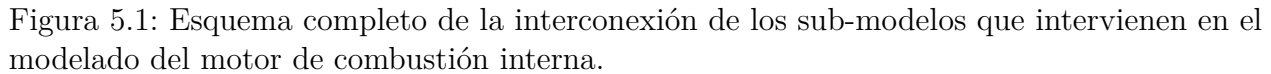
5.1 Simulación motor combustión interna 25 centímetros cúbicos.

La siguiente simulación, se construyó bajo las siguientes dimensiones y criterios de un motor de combustión interna de 25cc, mostrados por la tabla 5.1. para más información de la ficha técnica del motor Honda GX25, consultar la tabla 0.1 en la sección de Anexo A. Para la siguiente simulación se caracterizó un inyector de motocicleta a un flujo de $C_{iny} = 1.3$ mg/ms.

Tabla 5.1: Parámetros del mecanismo del motor de 25cc.

Parámetro	Descripción	Valor
d	Diámetro del eje de la válvula de mariposa	0.03 <i>cm</i>
D	Diámetro del conducto del acelerador	1 <i>cm</i>
$a = d/D$	Es la relación diámetro del eje y diámetro conducto acelerador	0.03 <i>cm</i>
Lm	Longitud de la manivela	1.2 <i>cm</i>
ℓ	Longitud de la biela	6.27 <i>cm</i>
Vd	Volumen desplazado	0.000025 <i>m</i> ³
Dp	Diámetro del pistón	3.7 <i>cm</i>
r_c	Relación de compresión	8

El esquema completo utilizado para la simulación en el entorno de matlab simulink se muestra en la figura 5.1. Como se puede observar en el diagrama, al sistema se le incorpora un control tipo PID para manipular el caudal de combustible inyectado al cilindro y de esa forma se pueda controlar la relación aire combustible a 14.6. Otra de las variables que se pueden observar en el diagrama, es el ángulo alfa (α), dicho ángulo lo manipula el usuario (pedal del acelerador), con ese ángulo se determina el caudal de aire que ingresa por la válvula de mariposa y a través del modelo de la dinámica del aire se puede calcular la presión en el múltiple de admisión y determinar el caudal de aire que ingresa al cilindro. Con el cálculo del aire y combustible que ingresa al cilindro es posible determinar el trabajo neto, potencia al freno y par motor de salida en el eje del motor y manteniendo una relación aire combustible adecuada es posible mantener en operación al motor de combustión interna. A continuación se muestran los comportamientos de las diferentes variables que intervienen en el comportamiento del motor de combustión interna.



The figure consists of two side-by-side plots. The left plot shows the valve position in degrees (Válvula Mariposa (°)) on the y-axis (ranging from 9 to 13) against time in seconds (Tiempo (s)) on the x-axis (ranging from 0 to 10). The position is a step function: 9° from 0 to 2s, 10° from 2 to 4s, 11° from 4 to 6s, 12° from 6 to 8s, and 13° from 8 to 10s. The right plot shows the motor speed in RPM on the y-axis (ranging from 1000 to 3000) against time in seconds (Tiempo (s)) on the x-axis (ranging from 0 to 10). The speed is a step function that follows the position changes, with transient spikes during the transitions. The speed steps are approximately: 1000 RPM for 9°, 1800 RPM for 10°, 2000 RPM for 11°, 2400 RPM for 12°, and 3000 RPM for 13°.

(b) Revoluciones por minuto.

41

CAPÍTULO V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN.

El coeficiente de descarga de la válvula de mariposa fue construido a partir de los datos presentados en [53], de un motor monocilíndrico, dicho polinomio se presenta en la figura 5.3, se puede notar que a menor apertura de la válvula de mariposa el coeficiente de descarga es mayor y a mayor apertura de la válvula de mariposa el coeficiente de descarga es menor.

$$C_d = \left(-0.000000878070468 \cdot \alpha^3\right) + \left(0.000158720549653 \cdot \alpha^2\right) + \left(-0.009889529418858 \cdot \alpha\right) + 0.802491126690253 \quad (5.1)$$

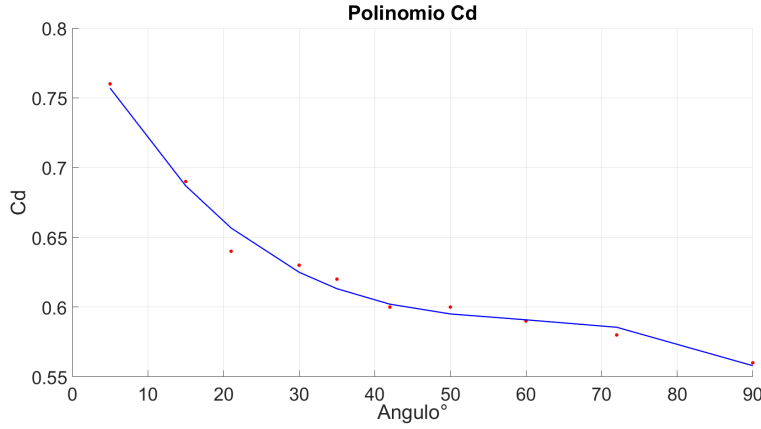


Figura 5.3: Coeficiente de descarga de la válvula de mariposa de un motor monocilíndrico.

La figura 5.4, muestra el consumo de combustible de un motor de combustión interna de un solo pistón en función de diferentes velocidades de operación medidas en revoluciones por minuto (RPM). Este tipo de análisis es fundamental para entender como varía el consumo de combustible con la velocidad del motor. Dicho caudal de combustible varía de $2.5 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ a $11 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$.

CAPÍTULO V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN.

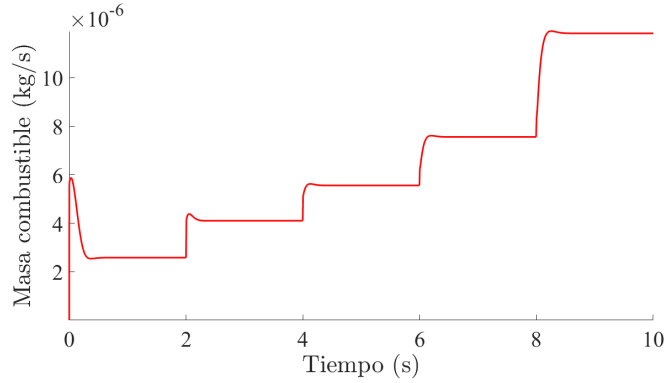
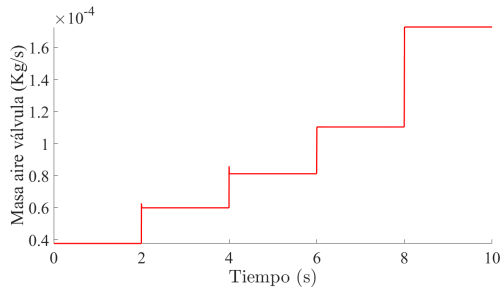
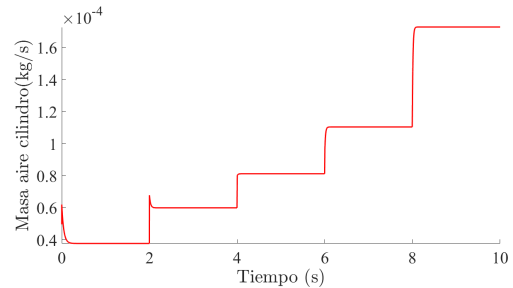


Figura 5.4: Masa de combustible.

En la figura 5.5 (a), se muestra la dinámica de la masa de aire que pasa a través de la válvula de mariposa. El aire que pasa a través de la válvula de mariposa va de $0.39 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ a $1.8 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$. La figura 5.5 (b), que se muestra a continuación ilustra cómo varía la masa de aire que ingresa al cilindro de un motor de combustión interna de un solo pistón a diferentes velocidades de operación. Este tipo de análisis es necesario para comprender la capacidad de aspiración de aire del motor. El aire que ingresa al cilindro va de $0.38 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ a $1.75 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$. Como se puede observar la masa de aire que atraviesa la válvula de mariposa es similar al flujo de aire que ingresa al cilindro.



(a) Masa aire que atraviesa la válvula de mariposa.



(b) Masa aire cilindro.

Figura 5.5: Masa aire que atraviesa la válvula e ingresa al cilindro.

La figura 5.6 ilustra la dinámica de la presión en el múltiple de admisión. Se observa que, con ángulos de apertura de la válvula de mariposa de 10° y 11° , el motor experimenta un cambio rápido de velocidad, generando un vacío máximo entre los 2 y 6 segundos de operación.

CAPÍTULO V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN.

A medida que la apertura de la válvula de mariposa aumenta, la presión en el múltiple de admisión tiende a disminuir en términos de vacío, lo cual se debe a que el área de paso es mayor y permite la entrada de un mayor caudal de aire. En consecuencia, conforme la válvula continúa su apertura, el ingreso de aire al múltiple reduce el vacío y provoca un incremento en la presión. Finalmente, cuando la válvula de mariposa se encuentra completamente abierta, el flujo de aire hacia el motor alcanza su valor máximo.

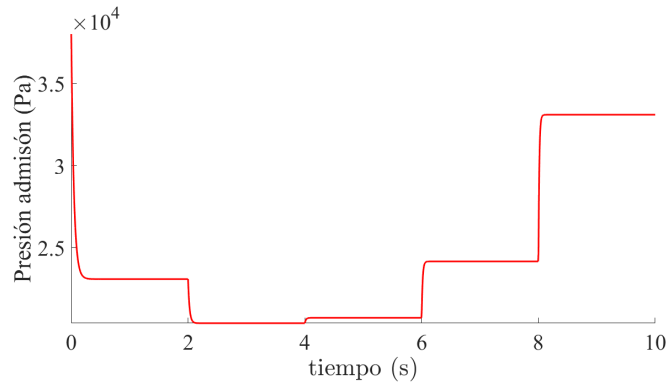


Figura 5.6: Presión múltiple de admisión.

La figura 5.7, muestra el trabajo neto producido por el motor de un pistón a diferentes velocidades de operación. De acuerdo con la gráfica, el trabajo desarrollado por el motor tiene un rango de operación de 5 J a 1800 rpm , llegando hasta 11.2 J a 3200 rpm .

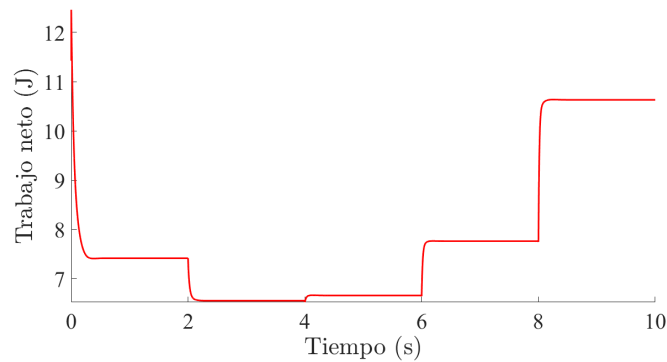


Figura 5.7: Trabajo neto.

CAPÍTULO V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN.

La figura 5.8, muestra la potencia indicada la cual varía de 61.76 W a 1000 rpm y 283.46 W a 3000 rpm . Como se puede observar a mayor velocidad mayor potencia, el cual está correlacionado directamente con la cantidad de aire aspirado y combustible.

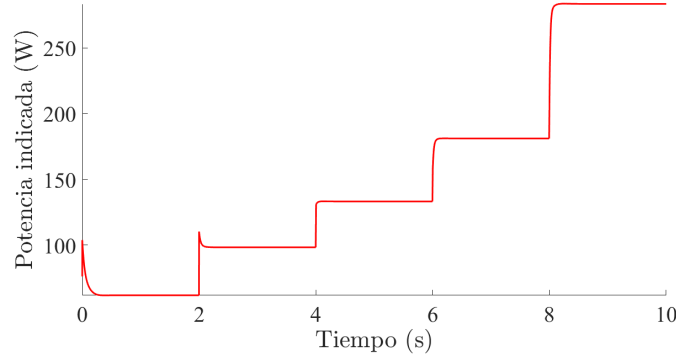
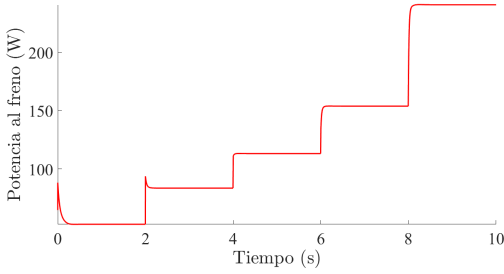


Figura 5.8: Potencia indicada.

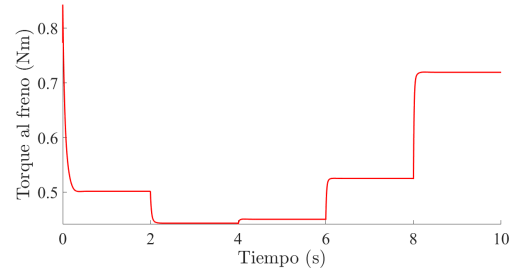
Como se puede observar en la figura 5.9 (a), se muestra una potencia de 52.48 W a 1000 rpm y 240.94 W a 3200 rpm , dicho valor está acorde a la potencia que puede desarrollar un motor de combustión interna de 25cm^3 , de acuerdo a la figura 5.10, que muestra la curva de potencia de un motor de desbrozadora de 25cm^3 a 4000 rpm que desarrolla una potencia de 390 W , la ficha técnica fue proporcionada por el proveedor [55], los resultados de la potencia obtenida en simulación muestran un tendencia de incremento de potencia a mayores velocidades y están cerca de los valores obtenidos por el modelo del motor combustión interna de 25cm^3 propuesto.

La figura 5.9 (b), se muestra el par motor al freno obtenido durante la simulación a la velocidad de 3000 rpm se obtiene un torque de 0.7 Nm , analizando la figura 5.10, el torque desarrollado de un motor de desbrozadora de 25 cm^3 a 4000 rpm reporta un torque de 0.8 Nm , por lo que los resultados obtenidos están cerca de los valores que reporta el fabricante Honda GX25 para motores de esas cilindradas.

CAPÍTULO V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN.



(a) Potencia al freno.



(b) Par motor al freno.

Figura 5.9: Curva de potencia y par motor en modelo del MCI.

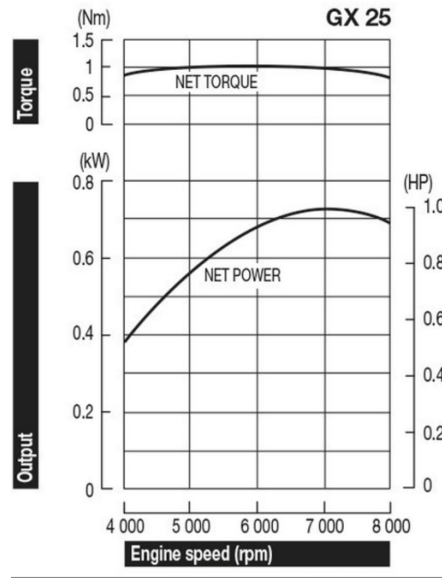


Figura 5.10: Potencia y par motor de un motor monocilíndrico de combustión interna de 25cc reportado en ficha del fabricante [55].

La figura 5.11, muestra la dinámica de la relación aire-combustible (AFR) en un rango de velocidades de 1000 a 3200 rpm. El valor de referencia de AFR es de 14.6, correspondiente a la mezcla estequiométrica. El controlador recibe la señal del sensor de los gases de escape para determinar la proporción de oxígeno residual en caso de detectar un excedente o deficiencia, ajusta el tiempo de inyección de combustible para mantener la AFR medida en concordancia con el valor de referencia y así lograr una combustión eficiente.

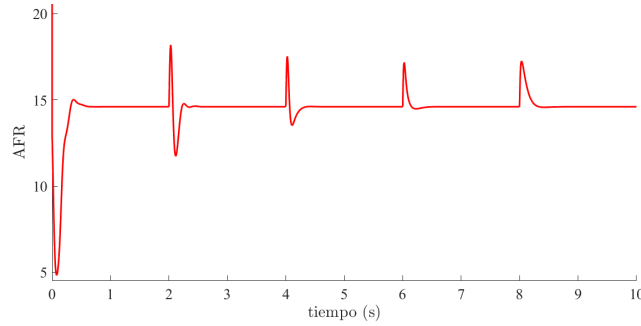


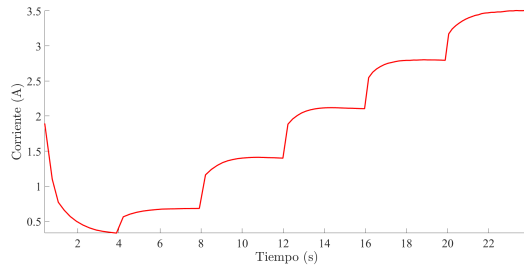
Figura 5.11: Relación aire combustible medido.

5.2 Simulación motor reciprocante magnético.

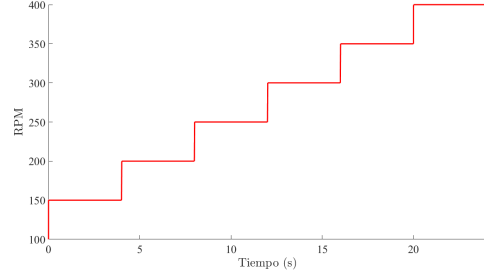
Para la realización de la simulación del motor reciprocante magnético se retomaron los trabajos previos desarrollados por el Dr. Christian Ríos Enríquez, egresado del programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica. En este sentido, las simulaciones presentadas en este apartado se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones y parámetros establecidos en sus investigaciones, lo que permite dar continuidad y validar los resultados obtenidos.

La figura 5.12 (a), muestra la corriente suministrada al motor reciprocante magnético, con valores que van desde 0.5 A hasta 3.5 A, utilizada para controlar la velocidad del motor en un rango de 150 a 400 rpm. Por otra parte, la figura 5.12 (b), ilustra la dinámica de las velocidades alcanzadas en respuesta a los ajustes en el suministro de corriente. Durante las pruebas, el voltaje se mantuvo constante en 30 V, y la variación en la velocidad del motor se logró mediante el control de la corriente suministrada. Además, la Figura 5.12, resume las velocidades a las que se sometió el modelo del motor, siendo estas utilizadas para el análisis del comportamiento del sistema.

CAPÍTULO V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN.



(a) Corriente suministrada al MRM.



(b) Revoluciones por minuto.

Figura 5.12: Relación corriente de entrada y rpm de salida.

5.3 Simulación motor combustion interna ajustado.

Para elaborar el seguimiento de la curva de potencia y torque del motor recíprocante magnético, que se presentó en la sección anterior fue necesario modificar el mecanismo, disminuyendo la masa de aire que ingresa al cilindro. Estas modificaciones incluyeron la reducción del diámetro del conducto del acelerador de 1 cm a 0.25 cm, diámetro del eje del plato de la válvula de mariposa de 0.03 cm a 0.0075 cm, así como un ajuste en la relación entre ejes. Se ajustó el caudal del inyector C_{iny} , se modificó de 1.3 mg/ms a 0.35 mg/ms. La siguiente simulación se llevó a cabo con los nuevos parámetros implementados. La Figura 5.13, ilustra la apertura de la válvula de mariposa en grados ($^{\circ}$), que varía entre 7.65° y 8° , mostrando su relación directa con la velocidad del motor, la cual oscila en un rango de 150 a 400 rpm.

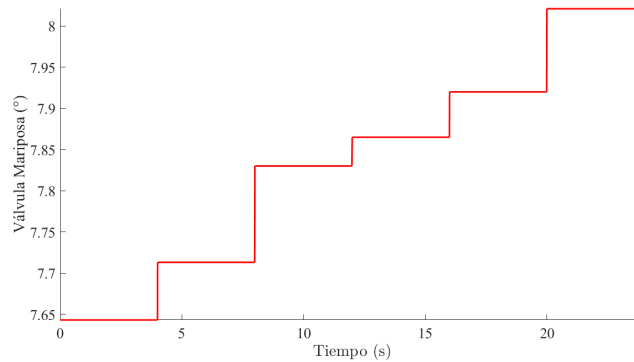


Figura 5.13: Apertura válvula de mariposa.

CAPÍTULO V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN.

En un motor de combustión interna monocilíndrico, la válvula de mariposa regula la cantidad de aire que ingresa al colector de admisión, lo que influye directamente en el volumen de aire aspirado por el cilindro del motor y por lo tanto, en el rendimiento del motor. La Figura 5.14, muestra la dinámica del flujo de aire a través de la válvula de mariposa, con valores que oscilan entre $4 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$ hasta $9.2 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$. Esta representación considera la dinámica de la masa de aire que atraviesa la válvula de mariposa, evaluada en un rango de velocidades del motor de 150 a 400 rpm.

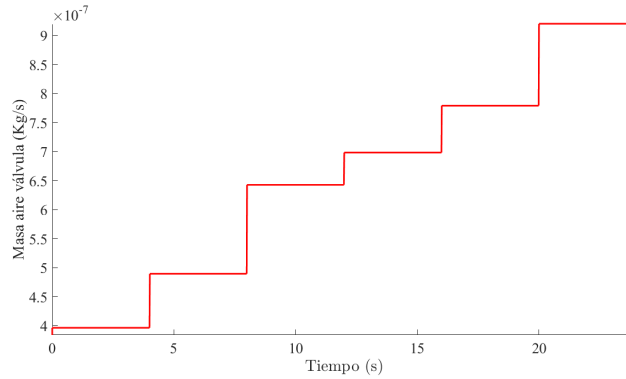


Figura 5.14: Masa aire que atraviesa la válvula de mariposa.

La figura 5.15, muestra la masa de aire que ingresa al cilindro del motor. En el lado izquierdo, se presenta la dinámica completa del aire, mientras que en el lado derecho se incluye un acercamiento, que permite observar con mayor precisión los cambios en el comportamiento de la masa de aire que ingresa al motor, en un rango que va desde $3.9 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$ hasta $9.1 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$. Este modelo considera la eficiencia de llenado, que está determinada por el flujo másico a través de la válvula.

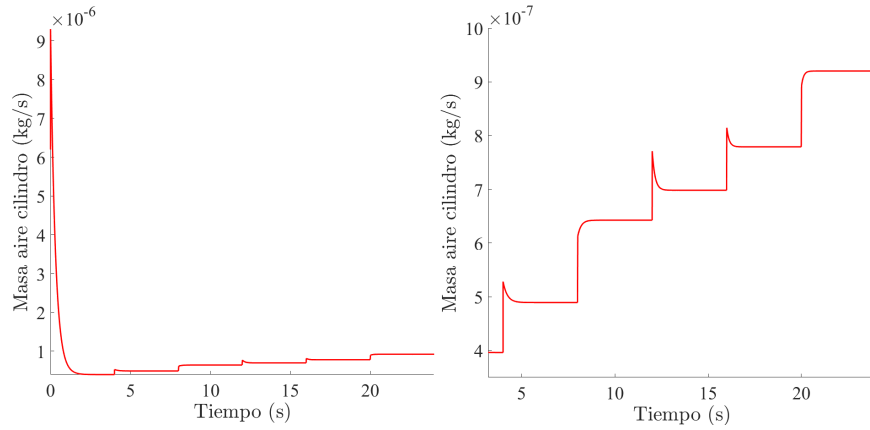


Figura 5.15: Masa aire cilindro.

El modelo del motor de combustión interna monocilíndrico considera el flujo de masa de combustible suministrado por un inyector, En la Figura 5.16, se observa que el flujo de combustible inyectado varía entre $2.7 \times 10^{-8} \text{ kg/s}$ y $6.3 \times 10^{-8} \text{ kg/s}$, operando en un rango de velocidades de 150 a 400 rpm.

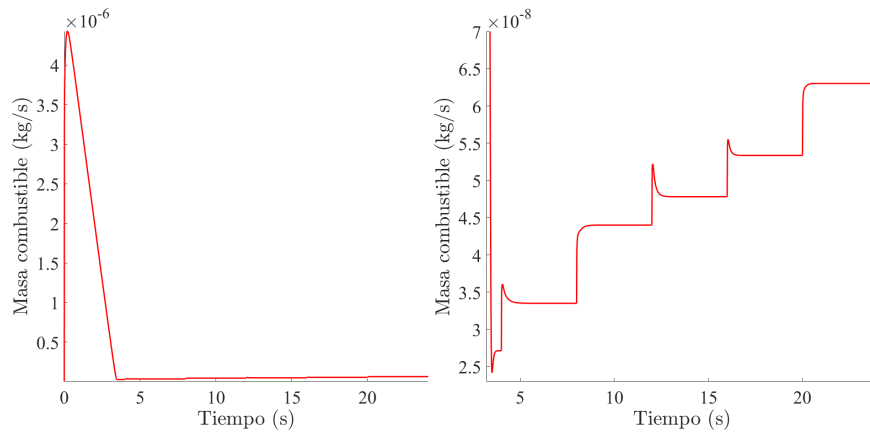


Figura 5.16: Masa de combustible.

La figura 5.17, muestra la dinámica de la relación aire-combustible (AFR) en un rango de velocidades de 150 a 400 rpm. El valor de referencia de AFR es de 14.6, correspondiente a la mezcla estequiométrica. El controlador recibe la señal del sensor de los gases de escape para determinar la proporción de oxígeno residual en caso de detectar un excedente o deficiencia, ajusta el tiempo de inyección de combustible para mantener la AFR medida en concordancia con el valor de referencia y así lograr una combustión eficiente.

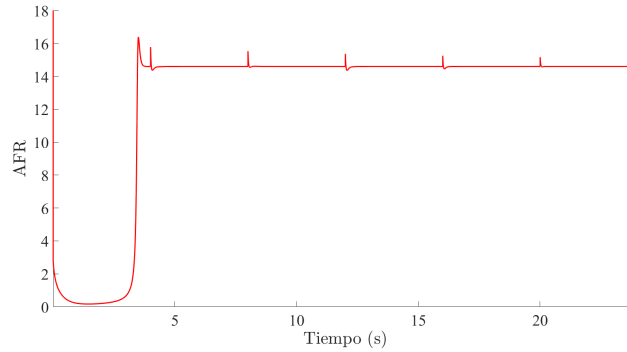


Figura 5.17: AFR medido.

La figura 5.18 (a), muestra la dinámica de la potencia al freno en un rango de velocidades de 150 a 400 rpm, la potencia al freno varía entre 0.55 W y 1.28 W, demostrando la energía útil disponible después de considerar las pérdidas mecánicas ocasionadas por la fricción en el motor. La figura 5.19, muestra el comportamiento de curva de la potencia y el torque generados por el motor reciprocante magnético (MRM). En un rango de operación de 150 a 400 rpm, la potencia varía de 0.55 W a 1.28 W. Demostrando que el motor de combustión interna que fue recaracterizado replica el comportamiento del motor reciprocante magnético.

La figura 5.18 (b), muestra el comportamiento del par motor al freno generado por el motor en función de la velocidad, en un rango de 150 a 400 rpm. El par motor varía de 0.035 Nm a 0.031 Nm, demostrando la capacidad del motor para generar fuerza rotacional bajo diferentes condiciones de operación. Los datos permiten analizar cómo el par motor disminuye a medida que aumenta la velocidad, destacando los puntos de máximo y mínimo del par. La figura 5.19, demuestra el comportamiento del par motor del motor reciprocante magnético en rango de operación de velocidad de 150 a 400 rpm, mostrando un comportamiento que varía de 0.025 Nm a 0.029 Nm. Demostrando que los valores de operación de torque están muy cerca del motor de combustión interna recaracterizado.

CAPÍTULO V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN.

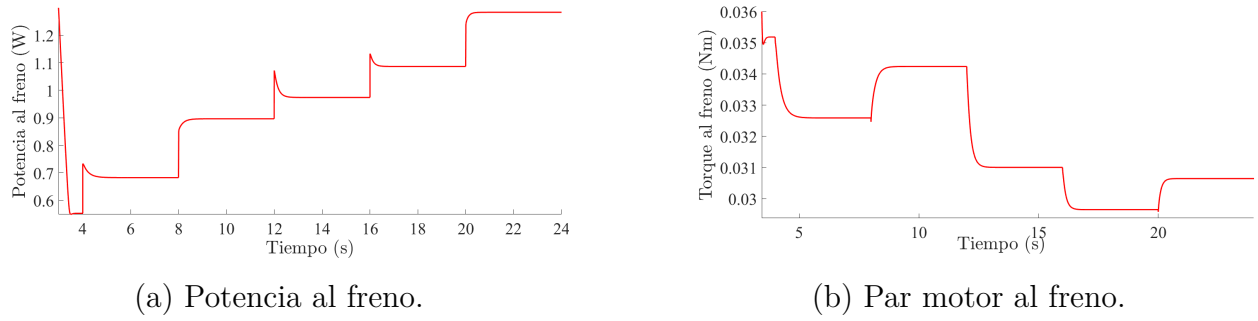


Figura 5.18: Potencia y par motor MCI.

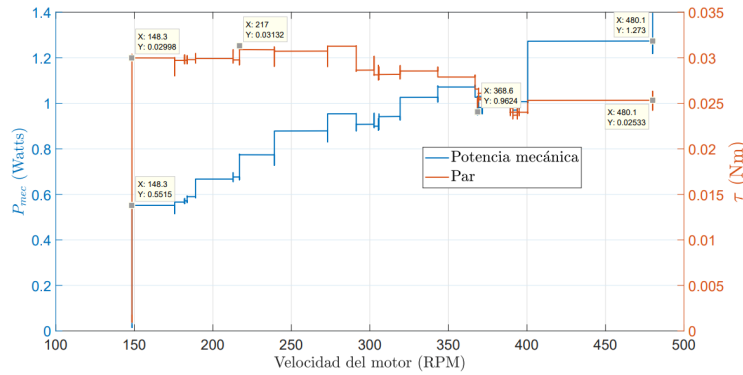


Figura 5.19: Potencia y par motor MRM [4].

5.4 Análisis y suministro de energía para el motor híbrido con 2 fuentes de alimentación.

La tabla 5.2, muestra la corriente que se suministra (I_{mc}) al motor reciprocante magnético, también muestra la potencia de entrada (X) del motor magnético, que es producto de la corriente (I_{mc}) por el (Voltaje), que es un valor constante promedio de 30V, para obtener las velocidades de 150 a 450 rpm y su potencia de salida (P_{om}). Por otra parte muestra el combustible que se suministra al motor de combustión interna (MFI), también se muestra la potencia de entrada del motor de combustión (Y), que resulta de la multiplicación del (MFI) por (QHV) que es poder calorífico del combustible, para obtener velocidades de 150 a 450 rpm y su potencia de salida (P_{oci}) y se puede apreciar la diferencia casi imperceptible que existe entre las 2 potencias de salida (P_{om}) y (P_{oci}).

CAPÍTULO V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN.

La tabla 5.2, cumple con el objetivo general de la investigación que es analizar y evaluar la cantidad de energía suministrada a un motor de combustión interna monocilíndrico con la finalidad de poder evaluar la viabilidad de acoplarlo a un motor reciprocante magnético monocilíndrico, porque el promedio de los porcentajes de diferencia es aproximadamente 0.22 %, lo cual nos permitirá poder acoplar los 2 sistemas con bajas vibraciones.

Tabla 5.2: Parámetros de velocidad y energía suministrada al motor.

RPM	Imc (A) [MRM]	X (W)	MFI (kg/s) [MCI]	Y (W)	Pom (W)	Poci (W)	Dif (W / %)
150	0.34	10.2	2.7×10^{-8}	1.134	0.5578	0.5527	0.0051 / 0.92 %
200	0.68	20.4	3.35×10^{-8}	1.407	0.6874	0.6825	0.0049 / 0.72 %
250	1.42	42.6	4.4×10^{-8}	1.848	0.8985	0.8964	0.0021 / 0.23 %
300	2.10	63.0	4.78×10^{-8}	2.007	0.9751	0.9740	0.0011 / 0.11 %
350	2.80	84.0	5.33×10^{-8}	2.238	1.0850	1.0870	-0.0020 / - 0.18 %
400	3.48	104.4	6.30×10^{-8}	2.646	1.2840	1.2840	0.0000 / 0.00 %
450	4.20	126.0	6.52×10^{-8}	2.738	1.3250	1.3280	-0.0030 / - 0.23 %

Como se puede observar en la tabla 5.2, la diferencia de potencia que aporta cada pistón por separado no es significativa, por lo tanto, al momento de unirlos a un cigüeñal no se generarían vibraciones de gran magnitud, lo cual es conveniente para este tipo de motores, sin embargo, aún las potencias generadas por el motor reciprocante magnético son muy bajas y sus aplicaciones serían muy limitadas, por lo que este trabajo es punto de partida para futuros análisis para acoplar motores reciprocantes magnéticos de mayor potencia con motores de combustión interna.

Capítulo VI. Conclusiones.

6.1 Alcance.

En este trabajo de tesis se desarrolló un análisis del suministro de energía para un motor de baja potencia, considerando dos enfoques: un pistón de combustión interna y un pistón magnético. Para el caso del motor de combustión interna, se estudió el modelo matemático de un motor monocilíndrico, identificando las principales variables que influyen en su desempeño. Posteriormente, se construyó un modelo mediante simulación que permitió validar las curvas de operación de potencia y par de un motor monocilíndrico comercial de 25 centímetros cúbicos.

Por otra parte, se retomaron los resultados del trabajo doctoral del Dr. Christian Ríos Enríquez, egresado del programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica del CENIDET, quien trabajó con un motor recíprocante magnético y reportó curvas de potencia, par motor y suministro de corriente eléctrica. En este trabajo se utilizaron dichas curvas de referencia para analizar y comparar el comportamiento del motor de combustión interna de baja potencia. Para ello, se ajustaron las velocidades de operación del motor de combustión interna con el fin de obtener potencias y pares equivalentes a los reportados por el Dr. Ríos, contrastando además el suministro eléctrico requerido por el motor magnético frente al consumo energético del motor de combustión interna.

6.2 Conclusiones.

Este trabajo se concluye con el análisis y suministro de energía para implementar en un motor híbrido, mostrando el suministro de corriente para el pistón recíprocante magnético de [4] y el suministro de combustible para el pistón de combustión interna para sincronizarlos a la misma velocidad y realizando un seguimiento de la curva de potencia y de torque del motor recíprocante magnético, dejando una puerta abierta al trabajo, un área de oportunidad para implementar la estrategia de control del suministro de corriente y combustible de cada pistón.

Como se puede observar los torques y potencias estudiados, aun no se visualizan aplicaciones de uso comercial, por lo que se encuentra en una etapa a nivel laboratorio para su estudio y mejora.

6.3 Originalidad.

El análisis y suministro de energía para un motor de dos pistones de baja potencia con dos fuentes de alimentación independientes combustión interna y magnetismo, no se había

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.

presentado en trabajos de investigación anteriores a este trabajo de tesis. Por lo que resulta original y novedoso el análisis presentado dejando la puerta abierta para trabajos futuros y posteriormente culminar con la implementación del sistema.

6.4 Aportaciones.

En el área de ingeniería de energías renovables y eficiencia energética se ha desarrollado un análisis y suministro de energía para un motor de dos pistones de baja potencia con dos fuentes de alimentación independientes combustión interna y magnetismo con la finalidad de poder reducir la huella de carbono al medio ambiente, generada por el sector industrial automovilístico la cual genera un porcentaje considerable de la economía a nivel mundial.

6.5 Trabajos futuros.

Las actividades futuras propuestas son:

1. Implementar un sistema de control para un motor híbrido con el fin de mejorar su eficiencia energética, para aprovechar mejor la energía disponible.
2. Diseñar un motor híbrido que pueda ser compatible con una gama amplia de combustibles, incluyendo combustibles alternativos o de baja emisión, aumentando su versatilidad y adaptabilidad a diferentes mercados y normativas.
3. Continuar con el estudio del MRM, para incrementar su par motor, potencia y eficiencia.

Referencias

- [1] J. H. Arellano Perez, «Análisis de Ruido Electroquímico en una Aleación de Aluminio Expuesta a la Mezcla Gasolina-Etanol,» Tesis doct., Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México, 2020.
- [2] D. A. Carbot Rojas, «Desarrollo e Implementación de Una Estrategia de Control para el Ángulo de Encendido de un Motor de Combustión Interna,» Tesis doct., Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México, 2020.
- [3] J. García Morales, «Implementación de un Sistema de Control para un Proceso de Combustión Interna Empleando Múltiples Combustibles,» Tesis doct., Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2017.
- [4] C. Rios Enriquez, «Modelado y Control de un Motor Reciprocante Magnético,» Tesis doct., Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2024.
- [5] E. Britannica, *Étienne Lenoir*, <https://www.britannica.com/biography/Etienne-Lenoir>, Accessed: 20-08-2025, 2024.
- [6] E. Britannica, *Nikolaus August Otto*, <https://www.britannica.com/biography/Nikolaus-Otto>, Accessed: 20-08-2025, 2024.
- [7] E. Britannica, *Rudolf Diesel*, <https://www.britannica.com/biography/Rudolf-Diesel>, Accessed: 20-08-2025, 2024.
- [8] E. Britannica, *Felix Wankel*, <https://www.britannica.com/biography/Felix-Wankel>, Accessed: 20-08-2025, 2025.
- [9] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. New York*. McGraw-Hill Education., 2018.
- [10] M. A. Masson Ricaurte, «Determinación de la eficiencia de mezcla de gasolina de ochenta octanos con etanol anhidro para su utilización en motores de combustión interna de cuatro tiempos encendido por chispa.,» B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2012.
- [11] B. Mashadi y D. A. Crolla, *Vehicle Propulsion Systems*. London: Wiley, 2012, pág. 129.
- [12] E. Britannica, *Charles Grafton Page*, <https://www.britannica.com/biography/Charles-Grafton-Page>, Accessed: 20-08-2025, 2025.

REFERENCIAS

- [13] C. Rios-Enriquez, M. Adam-Medina, J. García-Morales, G. V. Guerrero-Ramírez y M. Cervantes-Bobadilla, «Modeling and Simulation of a Magnetic Reciprocating Engine,» *IEEE Access*, 2024.
- [14] J. Rithula, J. Jeyashruthi e Y. Anandhi, «Electric Vehicle with Zero-fuel Electromagnetic Automobile Engine,» *Int. J. Eng. Res. Technol*, vol. 6, n.º 4, págs. 483-486, 2013.
- [15] M. Anto, Murugesh, I. J. Basha, D. Kumar y Thangarasu, «Design and Fabrication of Electromagnetic Engine,» *Sri Ramakrishna Institute of Technology, Coimbatore*, 2018.
- [16] S. Das, «An electromagnetic mechanism which works like an engine,» *International Journal of Engineering trends & Technology*, vol. 4, n.º 6, págs. 2376-2379, 2013.
- [17] P. Balko y D. Rosinová, «Modeling of Magnetic Levitation System,» págs. 252-257, 2017.
- [18] A. Guzzomi, D. Hesterman y B. Stone, «Variable inertia effects of an engine including piston friction and a crank or gudgeon pin offset,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 222, n.º 3, págs. 397-414, 2008. DOI: [10.1243/09544070JAUTO630](https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO630).
- [19] S. Suhel, C. Baseganni y N. Dinakar, «Design and Fabrication of Electromagnetic Engine,» *International Journal of Current Engineering and Scientific Research (IJCESR)*, vol. 4, n.º 9, págs. 56-61, 2017.
- [20] A. Rahman, M. Rahman y H. Karim, «The theory of the development of an electromagnetic engine for automotive use,» *Int J Adv Robot Automn*, vol. 2, n.º 1, págs. 1-8, 2017.
- [21] J. Zhao, B. Han y S. Bei, «Electromagnetic Properties Analysis on Hybrid-driven System of Electromagnetic Motor,» en *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, vol. 108, 2018, pág. 052046.
- [22] S. Dhangar, A. Korane y D. Barve, «Magnetic piston operated engine,» *International Journal of Advanced Research in Science and Engineering*, vol. 4, n.º 6, págs. 219-225, 2018.
- [23] B. Vigneshwaran, «MAGNETIC REPULSION ENGINE,» *vigneshwaranmagnetic*, 2018.

REFERENCIAS

- [24] R. Zhang, H. Zhao y J. Li, «Electromagnetic mechanism design and analysis of electromagnetic engine,» en *2018 International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering (MECAE 2018)*, Atlantis Press, 2018, págs. 83-86.
- [25] R. Solanki, S. Thakkar, K. Sheth y H. Sheth, «Fabrication of Electromagnetic Engine Using Pull Force,» *International Journal of Advanced Research*, vol. 6, n.º April, págs. 152-159, 2018, ISSN: 2320-5407. dirección: <http://www.journalijar.com>.
- [26] P. Patil, M. Pandya, A. Anilkumar, R. Roy, A. Singh y A. Patil, «Design and modelling of electromagnetic engine,» *Mukt Shabd J*, vol. 9, n.º 5, págs. 1974-1989, 2020.
- [27] P. S. Hada, A. Rawal, D. S. Parmar y M. Pawar, «A Review on: Working & Fabrication of Electromagnetic Reciprocating Engine,» 2020.
- [28] S. Vaddepalli, N. Preetham y A. B. Karanth, «Design and fabrication of an electromagnetic piston engine,» *Int. Res. J. Modernization Eng. Technol. Sci*, vol. 2, n.º 9, págs. 1672-1679, 2020.
- [29] V. Kumar, A. Singh y K. K. Jha, «8-stroke solenoid engine and its efficiency,» *Int. Res. J. Eng. Technol*, vol. 8, n.º 06, págs. 2171-2174, 2021.
- [30] N. Singh, A. S. S. Abdul Khadeer y M. Sameer Baig, «RPM Variable Solenoid Engine,» *Mohammed, RPM Variable Solenoid Engine (January 3, 2022)*, 2022.
- [31] E. Ansari, S. A. Haider, A. A. Shaikh y M. F. Ibrahim, «Design and fabrication of single cylinder solenoid engine,» *Anveshana's Int. J. Res. Eng. Appl. Sci*, vol. 7, n.º 2, págs. 1-11, 2022.
- [32] J. E. Morgado, M. J. B. Enojas, H. C. Bongao et al., «Design and Fabrication of Improved V-8 Solenoid Engine with Splash Lubrication System,» en *2022 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications (ISIEA)*, IEEE, 2022, págs. 1-4.
- [33] G. J. Pol, A. R. Jadhav, J. G. Shinde, Y. Patil y R. Lokapure, «Design, development and analysis of the electromagnetic engine,» en *Proc. Nat. Conf. Emerg. Trends Eng. Technol.(NCETET)*, 2023, págs. 1-5.
- [34] H. Purohit, A. Shah, N. Parekh y A. Pandey, «Development Concept for Non Conventional Hybrid Engine,» en *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 44489, 2010, págs. 817-828.

REFERENCIAS

- [35] T. M. Corporation, «The Toyota Prius hybrid system,» *Toyota Technical Review*, vol. 56, n.º 1, págs. 1-8, 2007.
- [36] C.-Y. Chan, «Hybrid electric vehicles: Overview and state of the art,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, n.º 4, págs. 704-718, 2007.
- [37] M. Yilmaz y P. T. Krein, «Review of the hydrogen storage systems for fuel cell vehicles,» *Journal of Power Sources*, vol. 194, n.º 2, págs. 793-800, 2012.
- [38] A. Demirbas, «Progress and recent trends in biofuels,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 33, n.º 1, págs. 1-18, 2009.
- [39] S. Shafiee y E. Topal, «The future of hydrogen economy: A review of the hydrogen supply chain,» *Energy Policy*, vol. 38, n.º 11, págs. 7850-7858, 2009.
- [40] J. Li, Y. Wang y L. Zhang, «Progress and perspectives on alternative fuels for automotive applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, págs. 297-316, 2019.
- [41] Y. E. Altun y O. A. Kutlar, «Energy Management Systems' Modeling and Optimization in Hybrid Electric Vehicles,» *Energies*, vol. 17, n.º 7, pág. 1696, 2024.
- [42] U. Qadiri, «Numerical one-dimensional investigations on a multi-cylinder spark ignition engine using hydrogen/ethanol, hydrogen/methanol and gasoline in dual fuel mode,» *Environmental Science: Atmospheres*, vol. 4, n.º 2, págs. 233-242, 2024.
- [43] W. Zhihu y P. Run, «Torque based spark ignition engine and powertrain modeling,» en *2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, IEEE, 2008, págs. 4767-4772.
- [44] T. Shen y J. Zhang, «Model and control issues of gasoline engines,» en *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, IEEE, 2011, págs. 6133-6138.
- [45] J. Nevot Cercos, «Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales para la gestión de la mezcla aire-gasolina en un motor alternativo,» Tesis doct., Universitat Politecnica de Catalunya, 2000.
- [46] E. Hendricks y S. C. Sorenson, «Mean value modelling of spark ignition engines,» *SAE transactions*, págs. 1359-1373, 1990.

REFERENCIAS

- [47] R. Yan, H. Li, Z. Y. Dong y H. Tang, «Nonlinear control approaches for SI engine model with uncertainties,» en *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*, IEEE, 2009, págs. 5440-5445.
- [48] C. F. Aquino, «Transient A/F control characteristics of the 5 liter central fuel injection engine,» *SAE Transactions*, págs. 1819-1833, 1981.
- [49] A. Ohata e Y. Ishida, «Dynamic inlet pressure and volumetric efficiency of four cycle four cylinder engine,» *SAE transactions*, págs. 1637-1647, 1982.
- [50] S. Hires y M. Overington, «Transient mixture strength excursions—An investigation of their causes and the development of a constant mixture strength fueling strategy,» *SAE Transactions*, págs. 1834-1850, 1981.
- [51] D. Boam, I. Finlay y J. Martins, «A model for predicting engine torque response during rapid throttle transients in port-injected spark-ignition engines,» *SAE Transactions*, págs. 999-1010, 1989.
- [52] M. Fujieda e Y. Oyama, «ANALYSIS OF TRANSIENT MIXTURE TRANSPORT IN INTAKE MANIFOLD FOR CARBURETED ENGINE,» inf. téc., 1984.
- [53] N. H. Garrett, M. Uddin, M. Bergman, G. Purvis, D. Vaseleniuck y D. Cordier, «Development of a Rotary Valve Engine for Handheld Equipment,» SAE Technical Paper, inf. téc., 2022.
- [54] L. Guzzella y C. Onder, *Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [55] Honda Engines, *Honda engines - GX25*, <https://www.honda-engines-eu.com/es/productos/motores/gx25>, s. f., Fecha de acceso: 2 septiembre 2024.

Anexo

Ficha técnica motor Honda GX25.

- El motor de 4 tiempos es el primero que puede inclinarse 360° para trabajar en cualquier posición
- El diseño OHC con correa de distribución silenciosa, hacen este motor ligero y compacto con muy poco mantenimiento
- Arranque fácil, bajo ruido y excelente aceleración
- Materiales y componentes de alta calidad que aseguran un mayor rendimiento a largo plazo
- Los motores cumplen con la legislación medioambiental más exigente del mundo
- Bajo consumo de combustible y aceite.

Tabla 0.1: Especificaciones técnicas del motor

Tipo de motor	Cilindro individual – 4 tiempos Motor gasolina OHC
Calibre x carrera	35 x 26 mm
Cilindrada	25.0 cm ³
Relación de compresión	8.0 : 1
Potencia neta	0.7 kW (1.0 HP) / 7000 rpm
Par máximo neto	1.0 Nm (0.10 kgfm) / 5000 rpm
Sistema de encendido	Transistorizado
Motor de arranque	Tirador de arranque
Capacidad del depósito de combustible	0.58 Litro
Consumo combustible potencia neta	0.54 L/H 7000 rpm
Lubricación	Neblina de aceite
Capacidad de aceite	0.08 Litro
Dimensiones (L x A x A)	192 x 221 x 230 mm
Peso en seco	2.78 kg