

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE MICROGENERACIÓN  
BASADO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

**ISABEL CRISTINA CASTILLA BALAGUERA  
DARWIN JOSÉ GONZÁLEZ AGUAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2014**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE MICROGENERACIÓN  
BASADO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

**ISABEL CRISTINA CASTILLA BALAGUERA  
DARWIN JOSÉ GONZÁLEZ AGUAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero  
electricista**

**Director  
RICARDO ALZATE CASTAÑO  
Ingeniero Electrónico, PhD**

**Codirector  
GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA  
Ingeniero Electricista, PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2014**

## TABLA DE CONTENIDO

Pág.

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>1. PRELIMINARES.....</b>	<b>13</b>
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN .....	13
1.2 PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	15
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 <i>Objetivo general</i> .....	16
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	16
<b>2. MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA .....</b>	<b>17</b>
2.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA: ICE .....	17
2.1.1 <i>Regulador de velocidad</i> .....	18
2.1.2 <i>Actuador</i> .....	19
2.1.3 <i>Motor</i> .....	20
2.2 PARAMETRIZACIÓN DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA .....	24
<b>3. VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SISTEMA .....</b>	<b>28</b>
3.1 VALIDACIÓN DEL MODELO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA .....	28
3.2 VERIFICACIÓN NÚMERICA DEL MODELO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	29
<b>4. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SISTEMA FRENTE A DIFERENTES CARGAS .....</b>	<b>36</b>

4.1 AJUSTE DE LA INDUCTANCIA PROPIA DEL MODELO .....	36
4.2 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SISTEMA.....	37
4.2.1 <i>Comportamiento de la potencia eléctrica para una carga resistiva.....</i>	<i>39</i>
4.2.2 <i>Comportamiento de la potencia eléctrica para una impedancia .....</i>	<i>41</i>
4.2.3 <i>Comportamiento de la potencia eléctrica para una carga motor bifásico.....</i>	<i>43</i>
4.2.4 <i>Comportamiento de la potencia eléctrica para los tres tipos de carga conectadas en paralelo.....</i>	<i>45</i>
4.3 APLICACIONES PRÁCTICAS DE UN GRUPO ELECTRÓGENO .....	47
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>6. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>51</b>
<b>CITAS.....</b>	<b>52</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>55</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de bloques conjunto motor/generador .....	18
Figura 2. Diagrama de bloques del motor .....	20
Figura 3. Prototipo grupo electrógeno laboratorio de máquinas térmicas alternativas (LMTA) .....	24
Figura 4. Implementación diagrama de bloques modelo del motor de combustión interna .....	29
Figura 5. Par mecánico en función del consumo de combustible.....	35
Figura 6. Circuito equivalente monofásico para modelar diferentes cargas .....	36
Figura 7. Implementación del modelo para ajustar el comportamiento del sistema ante diferentes cargas .....	38
Figura 8. Comportamiento de la potencia eléctrica para la carga resistiva.....	40
Figura 9. Corriente eléctrica para la carga tipo resistiva .....	40
Figura 10. Tensión para la carga tipo resistiva.....	41
Figura 11. Comportamiento de la potencia eléctrica activa para la impedancia ....	42
Figura 12. Corriente eléctrica para la carga tipo impedancia .....	42
Figura 13. Tensión para la carga tipo impedancia .....	43
Figura 14. Comportamiento de la potencia eléctrica activa para la carga motor bifásico .....	44
Figura 15. Corriente eléctrica para la carga tipo motor bifásico .....	44
Figura 16. Tensión para la carga tipo motor bifásico.....	45
Figura 17. Comportamiento de la potencia eléctrica para tres cargas en paralelo	46
Figura 18. Corriente eléctrica total para las tres cargas conectadas en paralelo...	46
Figura 19. Tensión para las tres cargas conectadas en paralelo .....	47

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones generales del motor de combustión interna .....	25
Tabla 2. Propiedades generales de la gasolina .....	25
Tabla 3. Valores para los factores de conversión .....	27
Tabla 4. Valores simulados del consumo de combustible y par mecánico .....	29
Tabla 5. Especificación del rango y precisión de los equipos de medida .....	30
Tabla 6. Tensiones y corrientes experimentales en función de la carga .....	30
Tabla 7. Potencias calculadas en función de la carga impuesta .....	32
Tabla 8. Parámetros calculados a partir de la operación del grupo electrógeno ...	33
Tabla 9. Comparación resultados teóricos vs. Simulación .....	34
Tabla 10. kW para los diferentes tipos de cargas seleccionados .....	39
Tabla 11. Valores asignados para las diferentes cargas .....	39
Tabla 12. Consumo promedio en kWh de una vivienda .....	48
Tabla 13. Plantas eléctricas comerciales generadoras a gasolina .....	49

## RESUMEN

Título: MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE MICROGENERACIÓN BASADO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA<sup>1</sup>

Autores: Isabel Cristina Castilla Balaguera, Darwin José González Aguas<sup>2</sup>

Palabras Clave: Grupo electrógeno, Motor de combustión interna, Simulación de modelos.

### Descripción:

El presente proyecto de grado aborda el estudio de los motores de combustión interna como fuentes alternativas de energía en sistemas de microgeneración eléctrica. Para el desarrollo del proyecto se utilizaron metodologías teóricas de investigación, así como procedimientos de análisis numérico. Realizando el modelado matemático, la asignación de parámetros y la correspondiente simulación para un grupo electrógeno (motor de combustión interna + generador eléctrico) como alternativa potencial de un sistema de microgeneración eléctrica de baja potencia. Partiendo de un modelo general sugerido en la literatura y de las ecuaciones representativas de los fenómenos que describen los subsistemas, se realiza la conversión de variables y asignación de parámetros correspondientes, buscando ajustar resultados de simulación del modelo del sistema en MATLAB con datos experimentales generados en Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas para un sistema de características similares, con el fin de analizar el comportamiento dinámico del sistema total. De los resultados conseguidos se obtuvo una tendencia cualitativa aceptable del sistema, validada a partir de consideraciones prácticas con base en los fenómenos físicos modelados. Sin embargo como trabajo complementario, es necesario realizar ajustes de parámetros adicionales en el modelo y estudios que permitan mejorar la consistencia cuantitativa de los datos respecto a las mediciones proporcionadas por el laboratorio.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, PhD. Codirector: Gabriel Ordóñez Plata, PhD.

## SUMMARY

Title: MODELING AND SIMULATION OF A MICROGENERATION SYSTEM BASED ON AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE<sup>3</sup>.

Authors: Isabel Cristina Castilla Balaguera, Darwin José González Aguas<sup>4</sup>

Keywords: Alternative electrical generation, Internal combustion engine, Numerical analysis.

### Description:

This project aims for modelling, parameterization and simulation of an internal combustion engine coupled into an electrical generator, as potential alternative for electrical energy providing. In doing so, a general model of the system is taken as a base, being further complemented by some conversion equations helping to assign appropriately the system parameters. The models and the parameter values assigned were verified by comparison with experimental data generated in the alternative heat engines laboratory. The qualitative trend of data provided by simulations performed in MATLAB matched the expected behaviour. Also acceptable results were obtained after coupling the both. However, further additional analysis should be performed in order to have quantitative agreement between experimental and numerical data, constituting the main current ongoing tasks.

---

<sup>3</sup> Degree work.

<sup>4</sup> Physico-mechanical Engineering Faculty. School of Electrical Engineering. Supervisor: Ricardo Alzate Castaño, PhD. Co-supervisor: Gabriel Ordóñez Plata, PhD.

## INTRODUCCIÓN

Debido al aumento excesivo energético mundial, los motores de combustión interna (ICE a partir de su sigla en inglés) constituyen una alternativa importante en los sistemas de microgeneración eléctrica para aplicaciones de energía de respaldo, de emergencia o para calor combinado de hogares y oficinas.

Pese a ello, no existe una exaltación masiva para estudiar y explorar las posibilidades que ofrece un ICE, debido principalmente a las emisiones contaminantes presentes en las aplicaciones actuales, sin embargo se han venido desarrollado alternativas de configuración del ICE que con el uso de nuevos combustibles hacen que estos motores sean más eficientes y produzcan las menores emisiones contaminantes posibles, llegando a ser más competitivos en el contexto de fuentes alternativas de energía.

Con el desarrollo del presente trabajo de grado, se busca modelar y analizar al ICE como parte de un sistema de microgeneración eléctrica. Para esto, se realiza una exploración de la literatura técnica de los motores de combustión interna (ICE) para tener indicios de cuales modelos dinámicos son más apropiados y favorables para la aplicación propuesta.

Subsiguientemente se dimensiona y se configura el sistema de microgeneración eléctrica de baja potencia, así como las variables de entrada y salida que lo caracterizan, también los valores de parámetro más importantes para asemejar una implementación real.

Finalmente, las rutinas de cálculo numérico se realizan con el fin de determinar las características dinámicas principales que definen el comportamiento del sistema.

# 1. PRELIMINARES

## 1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Un motor de combustión interna (ICE a partir de su sigla en inglés) es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por una reacción, que arde dentro de una cámara de combustible [1]. La operación de un ICE se define a partir del denominado ciclo de trabajo, que indica la base del proceso repetitivo de captura, compresión y combustión de aire. Según la forma en que realizan el ciclo de trabajo los ICE se clasifican en: motores de cuatro tiempos (4T), por ejemplo, embarcaciones de recreo, pequeñas avionetas, vehículos industriales, maquinaria agrícola, motores estacionarios industriales, entre otros; y motores de dos tiempos (2T), por ejemplo, ciclomotores, maquinaria de obras públicas, grandes motores estacionarios, entre otros [2]. A su vez, según el tipo de encendido se pueden clasificar en motores a gasolina y diesel [3].

El objetivo de un ICE visto como máquina, consiste en convertir energía química en movimiento con la mayor eficiencia posible [4]. Muchas alternativas de configuración y diseño se han estudiado y aplicado durante décadas para producir el motor con las mejores prestaciones de potencia y menores emisiones contaminantes al ambiente. Una muestra de ello son los motores de combustión interna de hidrógeno [5], los cuales son en la actualidad materia de investigación, constituyendo una solución promisoriosa ante todos los problemas asociados al calentamiento global y al efecto invernadero.

Dado el gran auge mundial que actualmente se experimenta en torno a temas como la generación distribuida de electricidad y las redes de suministro inteligente (Smart-Grids) debido en parte al desproporcionado aumento en el consumo energético mundial, los ICE se consideran una alternativa importante en sistemas

microgeneradores para ciertas aplicaciones, por ejemplo, las unidades pequeñas se pueden usar para energía de respaldo, de emergencia, o para calor combinado en oficinas y hogares. Las plantas de emergencia se usan en situaciones en donde es crítico el suministro continuo de energía, como pueden ser los hospitales. Asimismo, en zonas no interconectadas, el servicio de energía eléctrica se origina principalmente por generadores basados en motores diesel, produciendo un consumo energético de gran magnitud<sup>5</sup>.

Para hacer más viable en términos ambientales la utilización de sistemas generadores basados en ICE, se desarrollan alternativas a partir de nuevas configuraciones del motor o de uso de nuevos combustibles que permitan mayor portabilidad, eficiencia y competitividad para estas tecnologías en el contexto de las fuentes alternativas de energía. Como consecuencia de esto, los ICE han venido ganando reciente popularidad como opción para generación de potencia eléctrica, al menos dentro de las llamadas naciones industrializadas [6].

En Colombia, las investigaciones que se realizan en el campo de la microgeneración han sido enfocadas principalmente a energías alternativas de tipo eólico o fotovoltaico. Los ICE por su parte han estado relegados a aplicaciones de tipo automotriz. No obstante, se destacan trabajos de los grupos de investigación de la Universidad Nacional de Colombia (biocombustibles, energía y protección del medio ambiente), Universidad de Antioquia (ciencia y tecnología del gas y uso eficiente y racional de la energía), Universidad del Norte (uso racional de la energía y preservación del medioambiente) y de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín (energía y termodinámica) que desarrollan actividades comunes alrededor del concepto de “ICE alternativo” [2]. De otro lado, por ejemplo el RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas en Colombia) reconoce

---

<sup>5</sup>Tomado de: Proyección de Demanda de Energía en Colombia, Revisión de Octubre de 2010. Disponible desde internet en:  
<[http://www.upme.gov.co/Docs/Energia/PROYECC\\_DEMANDA\\_ENERGIA\\_OCTUBRE\\_2010.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Energia/PROYECC_DEMANDA_ENERGIA_OCTUBRE_2010.pdf)>

y regula los grupos electrógenos es decir, “las máquinas que mueven un generador eléctrico a través de motores de combustión interna”.

En la Universidad Industrial de Santander, se han realizado trabajos de grado e investigaciones relacionadas con el impacto ambiental de fuentes de energía renovables. Asimismo se han realizado optimizaciones y sistemas de control de velocidad en sistemas que involucran ICE.

## **1.2 PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

De los antecedentes presentados, es claro que los ICE representan una alternativa importante en el contexto de los sistemas de microgeneración eléctrica. Pese a ello, no existe una motivación masiva para estudiar y explorar las posibilidades que ofrece un ICE como generador eléctrico debido principalmente a las emisiones contaminantes presentes en las aplicaciones actuales y al alto costo derivado de versiones limpias como aquella a base de hidrógeno.

El presente proyecto busca analizar al ICE como generador eléctrico desde un punto de vista matemático, en el camino hacia su incorporación como fuente alternativa bajo un esquema de control, no sólo de desempeño sino también de los factores ambientales que hacen crítico su uso.

Con base en lo anterior, se plantean los siguientes interrogantes: ¿Qué aspectos deben considerarse para obtener el modelo matemático de un ICE como parte de un sistema de generación eléctrica? ¿Cuáles son las características dinámicas importantes del ICE que deben observarse mediante simulación numérica de su modelo asociado? ¿Cómo dimensionar apropiadamente un ICE para aplicación en el contexto de un sistema de microgeneración eléctrica? ¿Cómo medir el desempeño del ICE en el sistema de generación propuesto?

Con el desarrollo de este trabajo de grado, se buscará dar respuestas a estos interrogantes a partir de la definición de los siguientes objetivos.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo general**

- Modelar y simular un sistema de microgeneración eléctrica basado en un motor de combustión interna como fuente alternativa de energía.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar un modelo dinámico del motor de combustión interna, apropiado para la alternativa de microgeneración propuesta.
- Dimensionar con base en el modelo anterior un sistema de microgeneración eléctrica para aplicaciones de baja potencia.
- Realizar un procedimiento de análisis numérico que permita determinar las características operativas y de desempeño para el sistema de microgeneración eléctrica propuesto.

## 2. MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Este capítulo ilustra los fundamentos estructurales de un motor de combustión interna (ICE de su sigla en inglés: Internal Combustion Engine), como base para derivar las ecuaciones que describen su modelo matemático. Se realizará la descripción de las ecuaciones más representativas de su dinámica, y se asignarán valores a sus parámetros de manera tal que sea viable un análisis de comportamiento a partir de simulación.

### 2.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA: ICE

Un motor de combustión interna (ICE) es un tipo de motor térmico el cual obtiene energía mecánica a partir de la energía térmica que se produce en el proceso de combustión del fluido de combustible, para convertirla en trabajo [2]. Estos motores se pueden clasificar según su proceso de combustión en motor de encendido provocado por chispa o de ciclo Otto y el motor de encendido por compresión o motor diesel. Asimismo según su ciclo de operación los motores de combustión interna se clasifican en: motores de dos tiempos (2T), los cuales efectúan una carrera útil de trabajo en cada giro; y motores de cuatro tiempos (4T) los cuales efectúan una carrera útil de trabajo cada dos giros. Existen motores diesel y a gasolina, tanto de dos tiempos como de cuatro tiempos. El objetivo primordial de un motor de combustión interna es convertir la mayor cantidad de fluido de combustible en potencia efectiva a la salida del motor.

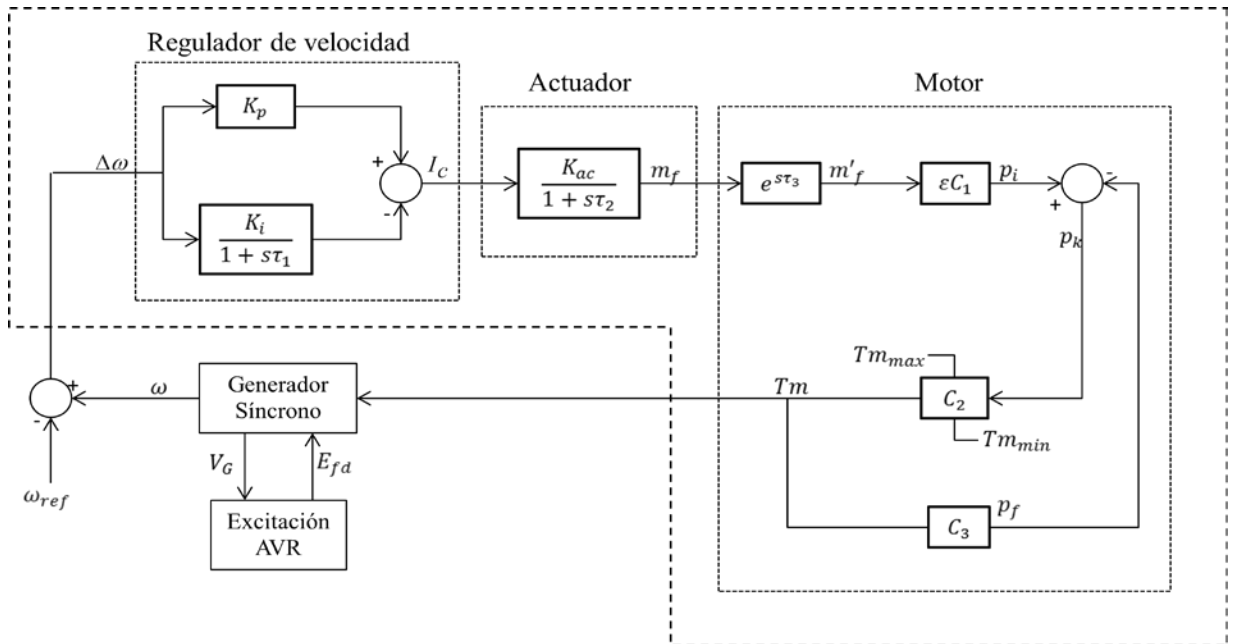
Para realizar el modelo de un sistema de generación basado en motores de combustión interna o grupo electrógeno<sup>6</sup>, se tomó como base el diagrama de

---

<sup>6</sup> Máquina que mueve un generador eléctrico a través de un motor de combustión interna para ser fuente de respaldo, según el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas en Colombia RETIE.

bloques de la Figura 1, el cual consta de un regulador de velocidad, un actuador de combustible y un conjunto motor/generador [7].

Figura 1. Diagrama de bloques conjunto motor/generador



Fuente: [7]

### 2.1.1 Regulador de velocidad

El regulador de velocidad se basa en un controlador PI (proporcional-integral), cuya entrada viene dada por un error de velocidad angular expresado de la forma  $\Delta\omega = \omega - \omega_{ref}$ , donde  $\omega_{ref}$  es la frecuencia angular de la red y  $\omega$  es la frecuencia angular obtenida en el generador. Este controlador tiene como parámetros a  $K_p$  como constante de regulación de velocidad [8],  $K_i$  como ganancia del bloque integral y a  $\tau_1$  como una constante de tiempo.

El regulador de velocidad controla la velocidad del motor a partir de la manipulación del combustible [8], así la salida es un cambio incremental  $I_c$  que adecua la entrada al actuador (válvula de inyección de combustible). Lo anterior se

resume en la siguiente ecuación diferencial de primer orden, la cual describe o caracteriza el regulador de velocidad [7]:

$$\frac{dI_c}{dt} = -I_c - K_i \cdot \Delta\omega \quad (2.1)$$

Siendo una ecuación diferencial lineal y forzada donde  $K_i$  es la ganancia del bloque integral,  $I_c$  es el cambio incremental de combustible y  $\Delta\omega$  es el error de velocidad angular. Asimismo, tomando como base el diagrama de bloques de la Figura 1, se tomaron  $K_p$  igual a cero y  $\tau_1$  igual a uno, para la obtener la ecuación diferencial (2.1) que describe el bloque del regulador de velocidad, siendo este planteamiento el más adecuado para caracterizar la relación salida/entrada del regulador.

### 2.1.2 Actuador

Los valores de entrada al actuador cambian de acuerdo al nivel de carga y de la temperatura, sin embargo se pueden considerar como términos constantes debido a la lenta variación en condiciones dinámicas [7]. La ecuación diferencial de primer orden que describe el actuador de combustible es:

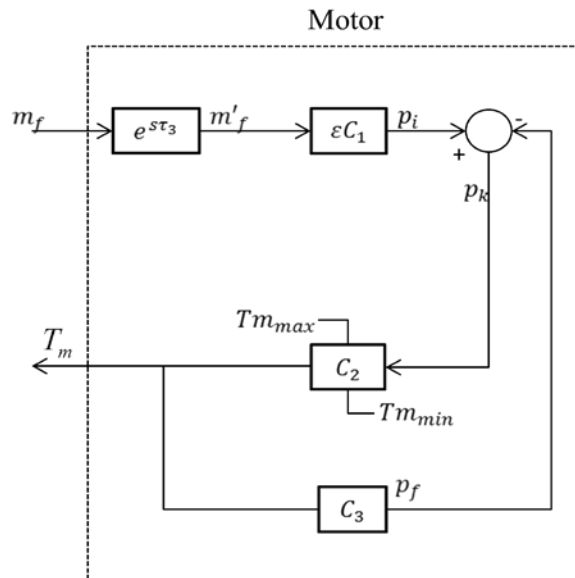
$$\frac{dm_f}{dt} = \frac{I}{\tau_2} \left( K_{ac} \frac{I_c}{\tau_1} - K_{ac} \frac{K_p}{\omega} \Delta\omega - m_f \right) \quad (2.2)$$

Donde  $K_{ac}$  es la ganancia del actuador,  $\tau_1$  y  $\tau_2$  [s] son constantes de tiempo,  $I_c$  [%] es el cambio incremental de combustible definido en (2.1),  $K_p$  es una constante del regulador de velocidad y  $m_f$  [kg/s] es la tasa de combustible consumido. Respecto al diagrama de bloques de la Figura 1, es posible replicar la función de transferencia para el subsistema de actuación tomando en (2.2) a  $K_p$  igual a cero y a  $\tau_1$  como uno.

### 2.1.3 Motor

El diagrama de bloques del motor en forma general viene dado por una relación aire/combustible (A/F). No obstante se estudiará solo la dependencia del par mecánico  $T_m$  a la salida del motor, respecto a la tasa de combustible consumido  $m_f$  [kg/s], como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de bloques del motor



Fuente: [7]

#### 2.1.3.1 Subproceso de combustión

Inicialmente, se considera el proceso de combustión del motor el cual viene representado por  $m'_f$  [kg/s] que es la tasa de flujo de combustible quemado. Se tiene en cuenta que  $m'_f$  no es la derivada que se muestra en la ecuación (2.2), sin embargo, se relacionan en el proceso de combustión como se ilustra en la ecuación (2.3).

El subproceso de combustión se representa por un retardo  $\tau_3 = \tau_1$ , el cual es un tiempo muerto y se asocia al proceso de ignición y carrera de potencia del motor. La carrera de potencia del motor empieza cuando éste toma movimiento, mientras

va generando fuerza y potencia; así la carrera de potencia se liga al proceso de combustión, ya que ayuda al encendido en la mezcla de combustible y aire comprimido.

La ecuación matemática correspondiente que describe el subproceso de combustión es [7]:

$$m'_f(t) = m_f(t - \tau_3) \quad (2.3)$$

A partir de esta ecuación se obtiene la expresión del bloque respectivo (subproceso de combustión) de la Figura 2, realizando la Transformada de Laplace.

### 2.1.3.2 Subproceso de conversión a presión

Posteriormente este flujo de combustible se convierte en presión media efectiva  $p_i$  [bar] utilizando el factor de conversión  $C_1$  y la eficiencia de la combustión  $\varepsilon$ . Este proceso se puede describir a partir de:

- La eficiencia, que es la relación de la potencia efectiva desarrollada por el motor y disponible en el cigüeñal con respecto al calor consumido durante el mismo tiempo [9], que viene dada por:

$$\varepsilon = \frac{zW_i v}{m'_f Q_{HV}} \quad (2.4)$$

En esta ecuación  $W_i$  [kWh] es el trabajo efectivo desarrollado por un pistón durante un ciclo de combustión,  $v$  es el ciclo de carrera por segundo,  $z$  es el número de cilindros operando durante un ciclo de combustión y  $Q_{HV}$  [kJ/kg] es valor de calor de combustible [7,9].

- La presión media efectiva  $p_i$ , que se define como [9]:

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} \quad (2.5)$$

Siendo  $V_h$  [m<sup>3</sup>] el volumen de carrera [7].

- El volumen de carrera, se puede conseguir en los datos específicos del motor. Sin embargo también se puede hallar con la siguiente relación:

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} \cdot L \quad (2.6)$$

En la cual: D es diámetro del pistón y L es la carrera del pistón.

Entonces, resolviendo (2.4) con respecto a  $W_i$  y sustituyendo en (2.5), resulta:

$$p_i = \frac{Q_{HV}}{zV_h v} m'_f \varepsilon = C_1 m'_f \varepsilon \quad (2.7)$$

Se observa que el flujo de combustible queda convertido en presión media efectiva. Asimismo, el factor de conversión  $C_1$  se presenta de la siguiente forma [7]:

$$C_1 = \frac{H_u}{zV_h v} \quad (2.8)$$

Se debe tener en cuenta que para el funcionamiento normal o estable del sistema, el ciclo de carrera por segundo es casi constante y su valor se impone a fin de mantener constante la frecuencia del sistema [9].

### 2.1.3.3 Subproceso de pérdidas mecánicas

El factor  $C_3$  caracteriza las pérdidas mecánicas en forma de una caída de presión  $p_f$  [bar], la cual se toma en una primera aproximación proporcional a la velocidad media del pistón  $U_d$ , es decir,  $P_f \sim U_d$  [9], así la caída de presión y el factor  $C_3$  vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$p_f = C_3 \omega_d \quad (2.9)$$

$$C_3 = \frac{2P_s}{P\pi} \quad (2.10)$$

Donde  $\omega_d = \pi P f_m$  y  $P_s$  [mm] es la carrera del pistón equivalente a  $L$  y  $P$  es el número de polos en el generador [7,9].

### 2.1.3.4 Subproceso de presión efectiva

De la diferencia entre la presión media efectiva y las pérdidas mecánicas resulta la presión efectiva  $p_k$ , la cual se convierte en un par mecánico a través del factor de conversión  $C_2$ , restringido al límite de par máximo del motor y que viene dado de la forma [7]:

$$C_2 = \frac{zV_h}{kT_b\pi} \quad (2.11)$$

Donde:  $z$  es el número de cilindros operando durante un ciclo de combustión,  $V_h$  [ $m^3$ ] es el volumen de carrera,  $k$  es el número de carrera (e.g.  $k = 4$  en un ciclo de cuatro tiempos) y  $T_b$  [ $N \cdot m$ ] es el par mecánico de base.

A partir de lo anterior, el par mecánico se obtiene mediante la siguiente relación [9]:

$$T_m = C_2 (C_1 m_f' \varepsilon - C_3 \omega_d) \quad (2.12)$$

Que a su vez puede escribirse como:

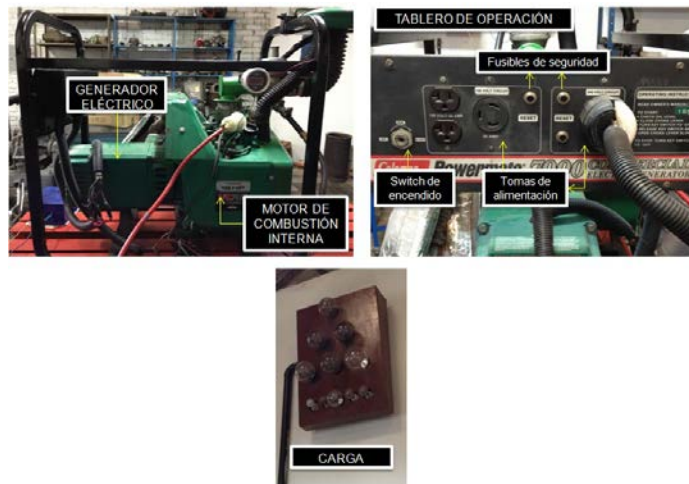
$$T_m = C_2 (p_i - p_f) = C_2 p_k = \frac{z V_h}{k T_b \pi} p_k \quad (2.13)$$

En este punto es importante resaltar que la eficiencia de un motor de combustión interna se distribuye equitativamente entre potencia efectiva, pérdidas mecánicas y escapes de gas (es decir un 33,3% cada una). Por tal razón sólo un tercio (en el caso ideal) de la potencia total se transfiere a la salida del motor.

## 2.2 PARAMETRIZACIÓN DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Para la asignación de los parámetros del motor, se tomó como referencia el grupo electrógeno disponible en el Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA) de la Escuela de Ingeniería Mecánica – UIS (ver Figura 3).

Figura 3. Prototipo grupo electrógeno laboratorio de máquinas térmicas alternativas (LMTA)



De este modo se enfocará el análisis en la parte que relaciona el motor de combustión interna como parte del grupo electrógeno. El motor de combustión interna disponible es un motor de encendido provocado por chispa, de cuatro tiempos. Las especificaciones generales del motor se muestran en la Tabla 1. Adicionalmente, en la cuantificación de los valores se tendrán en cuenta las propiedades generales de la gasolina incluidas en la Tabla 2.

Tabla 1. Especificaciones generales del motor de combustión interna

<b>Marca</b>	Briggs & Stratton
<b>Cilindros</b>	2; con cabeza en L; refrigerado por aire
<b>Serie modelo</b>	422400 de 18 HP
<b>Desplazamiento</b>	42,33 in <sup>3</sup> (694cm <sup>3</sup> )
<b>Par máximo</b>	28,6 lbxft a 2600 rpm
<b>Diámetro interno</b>	3 7/16 in (87,31mm)
<b>Número de tiempos</b>	4
<b>Encendido</b>	Magneto de volante
<b>Carburador</b>	Flujo jet de doble cuerpo
<i>NOTA: la potencia de la máquina disminuirá 3 ½% por cada 1000 pies (305m) por encima del nivel del mar y 1% por cada 10°F (5,6°C) por encima de 60°F (16°C)</i>	

Fuente: Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas - UIS (LMTA)

Tabla 2. Propiedades generales de la gasolina

<b>Cantidad</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Unidades</b>
44702,6	Poder calorífico	kJ/kg
0,7322	Densidad	g/cm <sup>3</sup>
80 92	Número de octano	octanos (corriente) octanos (extra)
280	Temperatura mínima de ignición	°C
56,5	Gravedad API 60/60	-
6,26	Peso	lb/gal
9,1	Presión de Vapor Reid (RVP)	Psi
85,6	Octanaje	-
120	Estabilidad (min)	-

Fuente: Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas – UIS (LMTA)

Para el valor del poder calorífico o calor de combustible, se eligió  $Q_{HV} = 44000 \text{ kJ/kg}$ , ya que es un valor estándar.

De las especificaciones generales del motor se tomaron valores como el número de cilindros, el volumen de carrera y el par mecánico de base.

El ciclo de carrera por segundo se encontró con la siguiente relación:

$$v = \frac{2600 \text{ rpm}}{1 \text{ rpm}} \times \frac{1/60 \text{ Hz}}{1 \text{ rpm}} = 43,33 \text{ Hz} \quad (2.14)$$

El valor del ciclo de carrera obtenido es dividido entre dos debido a que el motor es de 4 tiempos, lo que indica que ejecuta las 4 etapas en dos vueltas del cigüeñal o dos vueltas por ciclo, así:

$$v = \frac{43,33}{2} = 21,66 \text{ Hz}$$

La carrera del pistón es determinada por la siguiente ecuación:

$$V_t = z \cdot V_d \quad (2.15)$$

Donde  $V_t$  es la cilindrada total del pistón,  $z$  es el número de cilindros,  $V_d$  es la cilindrada unitaria igual a  $694.000 \text{ mm}^3$ ,  $D$  es el diámetro interno y  $P_s$  es la carrera del pistón. Esta última, puede hallarse a partir de la siguiente expresión para la cilindrada unitaria:

$$V_d = z \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot P_s \quad (2.16)$$

$$P_s = \frac{4V_d}{2\pi D^2} = \frac{4(694000)}{2\pi(87.31)^2} = 57,95 \text{ mm} \quad (2.17)$$

En resumen, realizando las asignaciones anteriormente descritas se obtienen los valores listados en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores para los factores de conversión

<b>Valor calor del combustible (<math>Q_{HV}</math>)</b>	44000 kJ/kg
<b>Número de cilindros (<math>z</math>)</b>	2
<b>Volumen de carrera (<math>V_h</math>)</b>	694 cm <sup>3</sup>
<b>Ciclo de carrera por segundo (<math>v</math>)</b>	21,66
<b>Número de tiempos (<math>k</math>)</b>	2
<b>Par mecánico base (<math>T_b</math>)</b>	38,61 N·m
<b>Carrera del pistón (<math>P_s</math>)</b>	57,95 mm
<b>Número de polos en el generador (<math>p</math>)</b>	2

Utilizando estos valores, es posible calcular los diferentes factores de conversión requeridos, a partir de:

$$C_1 = \frac{Q_{HV}}{zV_h v} = \frac{44000}{(2)(694)(21,66)} = 1,5$$

$$C_2 = \frac{zV_h}{kT_b \pi} = \frac{(2)(694)}{(2)(38,61)\pi} = 5,7$$

$$C_3 = \frac{2P_s}{p\pi} = \frac{2(57,95)}{2 * \pi} = 18,4$$

Una vez determinado el modelo matemático y los valores de parámetros asociados, se procederá a efectuar la validación de los resultados propuestos mediante simulaciones en MATLAB® contrastadas con mediciones experimentales realizadas en laboratorio.

### **3. VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SISTEMA**

Teniendo definido el modelo del motor de combustión interna en este capítulo se aborda la verificación mediante experimentación numérica del comportamiento dinámico del sistema. Se verificará la dinámica de las variables del motor para contrastar los resultados obtenidos con las mediciones experimentales realizadas en el Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA) de la Escuela de Ingeniería Mecánica – UIS.

#### **3.1 VALIDACIÓN DEL MODELO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

Tomando como base los desarrollos del capítulo anterior se realiza la verificación numérica para el modelo matemático del motor, contrastando los resultados numéricos con datos obtenidos en el LMTA.

Inicialmente, se procedió a implementar en el entorno simulink de MATLAB® el modelo del diagrama de bloques de la Figura 4, que ilustra el subsistema de motor presentado previamente en la Figura 2. El estímulo de entrada de tasa de combustible consumido ( $m_{fp1}$  [kg/s]) se seleccionó como una señal escalonada, que viene a través de un mecanismo de válvula que regula la entrada de combustible al motor para obtener a la salida el par mecánico  $T_m$ . Los factores de conversión empleados corresponden con los presentados en la Sección 2.2. La Tabla 4 muestra los resultados de simulación obtenidos en estado estacionario para un conjunto de valores de entrada en el sistema ilustrado en la Figura 4. Desde el punto de vista físico este comportamiento de la variable de salida (par mecánico) es consistente, debido a que en la medida que se incrementa el consumo de combustible la máquina realizará mayor trabajo y por tanto se obtendrá una mayor generación de torque.

Figura 4. Implementación diagrama de bloques modelo del motor de combustión interna

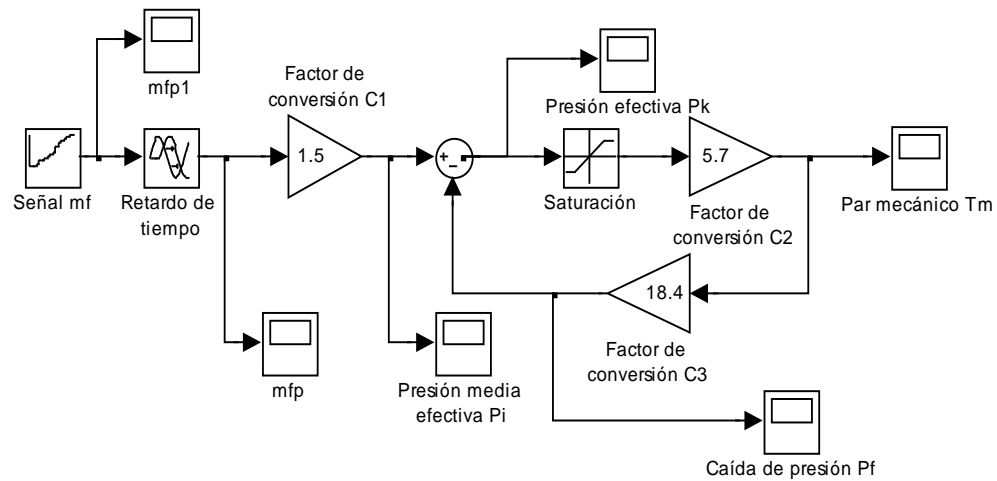


Tabla 4. Valores simulados del consumo de combustible y par mecánico

Consumo de combustible mfp [kg/s]	Par mecánico Tm [N·m]
2,69	0,2173
2,69	0,2173
2,73	0,2173
2,78	0,2205
2,81	0,2245
2,84	0,2269
2,87	0,2294
2,90	0,2318
2,94	0,2342
3,07	0,2374
3,14	0,2479
3,18	0,2479
3,25	0,2479
3,29	0,2479
3,33	0,2479

### 3.2 VERIFICACIÓN NÚMÉRICA DEL MODELO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Para verificar la pertinencia del modelo, se tomaron en cuenta datos experimentales obtenidos en prácticas del Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas UIS (LMTA) para un grupo electrógeno (ver Figura 3), a partir de

generación eléctrica utilizando gasolina como combustible [16,12]. El grupo electrógeno consta de un generador bifásico trifilar y tiene como cargas bombillas incandescentes con diferentes valores nominales de potencia seleccionables, para este caso con pasos de 500 W aproximadamente hasta una capacidad máxima de 7000 W. Para la toma de los datos experimentales se tuvo en cuenta la precisión de los instrumentos de medida, lo que se asocia a la incertidumbre en las mediciones realizadas, ya sean directas o indirectas respectivamente. La Tabla 5 muestra la especificación del rango y precisión de los equipos de medida empleados.

Tabla 5. Especificación del rango y precisión de los equipos de medida

Equipo de medida	Rango	Precisión
Pinza amperimétrica [A]	0 – 400	± 0,02
Multímetro [V]	0 – 600	± 0,015
Flujo másico de combustible [kg/h]	0 – 2,1	± 0,02
Flujo volumétrico de combustible [m <sup>3</sup> /h]	0 – 2,93	± 0,03

Fuente: [LMTA]

En la Tabla 6 (donde L1 representa la primera fase, L2 representa la segunda fase y N el neutro) se muestran los datos de corrientes y tensiones más relevantes de esta práctica de laboratorio. A partir de estos datos es necesario determinar los siguientes parámetros que son propios del grupo electrógeno. Medida

Tabla 6. Tensiones y corrientes experimentales en función de la carga

Carga nominal [W]	Corriente en L1 [A]	Corriente en L2 [A]	Tensión en L1-N [V]	Tensión en L2-N [V]	Tensión en L1-L2 [V]
0	0	0	114	114	225
510	0*	4	110	109	217
1010	3,5	3,9	104,2	104,2	209
1500	3,5	8,7	101,5	99,4	200,5
2000	7,2	8,7	99,2	98	197,7
2500	10,6	8,6	97,5	98,6	196,3
3010	10,6	12,3	97,1	96,7	194,3

\* La cifra en este dato se debe a factores de impresión en la toma de la medida.

Tabla 6. (Continuación) Tensiones y corrientes experimentales en función de la carga

Carga nominal [W]	Corriente en L1 [A]	Corriente en L2 [A]	Tensión en L1-N [V]	Tensión en L2-N [V]	Tensión en L1-L2 [V]
3500	15,55	12,4	95	96,6	191
4000	15,5	14,95	94,7	95	190
4500	18,6	14,9	92,5	94,5	186,9
5000	18,6	18,4	92	92,5	184,7
5500	23,1	18,2	88,8	91,2	180
6000	22,85	22,5	87,4	88,1	175,6
6500	25,7	22,7	86,4	88,1	173
7000	25,6	25,5	85	88,4	170

Fuente: [LMTA]

- Potencia eléctrica generada. Se define como la cantidad de energía eléctrica entregada por el grupo electrógeno a las bombillas en un instante determinado y dado que la carga es netamente resistiva se deduce a partir de:

$$P_s = V_{L1-N} \cdot I_{L1} + V_{L2-N} \cdot I_{L2} \quad (3.1)$$

- Potencia efectiva del motor. Es la potencia real que se proporciona en el eje del motor definida como:

$$P_{em} = \frac{P_s}{\eta_g} \quad (3.2)$$

Siendo  $\eta_g$  es la eficiencia del generador. En este caso por especificaciones propias del grupo electrógeno (Powermatte 7000W) se considera del 95% [12].

De esta manera se determinan las potencias consignadas en la Tabla 7, para diferentes valores de carga.

Tabla 7. Potencias calculadas en función de la carga impuesta

Carga nominal [W]	Potencia efectiva del motor $P_{em}$ [W]	Potencia eléctrica generada $P_s$ [W]
0	0	0
510	459	436
1010	812 ± 5,92	771 ± 5,92
1500	1284 ± 7,52	1220 ± 7,52
2000	1649 ± 5,7	1567 ± 5,7
2500	1980 ± 5,6	1881 ± 5,6
3010	2335 ± 5,55	2219 ± 5,55
3500	2816 ± 5,55	2675 ± 5,55
4000	3040 ± 5,41	2888 ± 5,41
4500	3293 ± 5,43	3129 ± 5,43
5000	3593 ± 5,28	3413 ± 5,28
5500	3906 ± 5,27	3711 ± 5,27
6000	4189 ± 5,06	3979 ± 5,06
6500	4442 ± 5,07	4220 ± 5,07
7000	4663 ± 5,02	4430 ± 5,02

Fuente: [LMTA, Autores]

Empleando estos valores de potencias efectivas del motor, es posible realizar el cálculo presentado en la Tabla 8 para los siguientes parámetros:

- Consumo específico de combustible. Es la cantidad de combustible que requiere el motor para entregar una potencia determinada y se define como:

$$sfc = \frac{m_{fp}}{P_{em}} \text{ [kg/kWh]} \quad (3.3)$$

Siendo  $m_{fp}$  [kg/h] la cantidad de combustible utilizado, dada por:

$$m_{fp} = \frac{\rho \cdot V}{t} \quad (3.4)$$

Donde:  $\rho$  es la densidad de combustible correspondiente con 750 kg/m<sup>3</sup>; V es el volumen consumido y t es el tiempo de consumo en horas.

- Eficiencia total del grupo electrógeno. Es definida como:

$$\eta_T = \frac{P_{em}}{m_{fp} \cdot Q_{HV}} \quad (3.5)$$

Donde  $Q_{HV}$  [kJ/kg] es el valor del poder calorífico o calor de combustible definido en el Capítulo 2.

- Par mecánico o torque. Se obtiene mediante la expresión:

$$P = T \cdot n \Rightarrow P_{em} = T_m \cdot n$$

En esta ecuación al sustituir  $P_{em}$  de la ecuación (3.5):

$$\eta_T (m_{fp} \cdot Q_{HV}) = T_m \cdot n$$

y despejar para  $T_m$ , se obtiene que:

$$T_m = \frac{\eta_T (m_{fp} \cdot Q_{HV})}{n} \quad (3.6)$$

Donde:  $\eta_T$  es la eficiencia total del grupo electrógeno,  $m_{fp}$  [kg/h] es la cantidad de combustible utilizado y  $n$  [rev/min] es la velocidad del motor.

En síntesis, las señales de entrada (combustible consumido) y salida (par mecánico) experimentales, fueron calculadas empleando relaciones matemáticas teóricas a partir de valores prácticos según se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros calculados a partir de la operación del grupo electrógeno

Carga nominal [W]	Consumo $m_{fp}$ [kg/h]	Consumo específico $sfc$ [kg/kW*h]	Eficiencia total $\eta_T$	Par mecánico $T_m$ [N·m]
0	2,69	-----	-----	0
510	2,69	$5,87 \pm 0,044$	$1,32 \pm 0,01\%$	$0,0571 \pm 0,0006$
1010	2,73	$3,36 \pm 0,035$	$2,31 \pm 0,02\%$	$0,0866 \pm 0,0011$
1500	2,78	$2,17 \pm 0,020$	$3,59 \pm 0,03\%$	$0,1199 \pm 0,0014$
2000	2,81	$1,71 \pm 0,014$	$4,56 \pm 0,04\%$	$0,1369 \pm 0,0015$

Tabla 8. (Continuación) Parámetros calculados a partir de la operación del grupo electrógeno

Carga nominal [W]	Consumo $m_{fp}$ [kg/h]	Consumo específico $sfc$ [kg/kW*h]	Eficiencia total $\eta_T$	Par mecánico $T_m$ [N·m]
2500	2,84	1,44 ± 0,011	5,42 ± 0,04%	0,1479 ± 0,0015
3010	2,87	1,23 ± 0,009	6,32 ± 0,05%	0,1585 ± 0,0016
3500	2,90	1,03 ± 0,007	7,54 ± 0,05%	0,1753 ± 0,0017
4000	2,94	0,97 ± 0,007	8,03 ± 0,06%	0,1747 ± 0,0017
4500	3,07	0,93 ± 0,006	8,34 ± 0,06%	0,1757 ± 0,0016
5000	3,14	0,87 ± 0,006	8,89 ± 0,06%	0,1789 ± 0,0016
5500	3,18	0,81 ± 0,005	9,56 ± 0,06%	0,1716 ± 0,0015
6000	3,25	0,78 ± 0,005	10,01 ± 0,06%	0,1738 ± 0,0015
6500	3,29	0,74 ± 0,005	10,49 ± 0,06%	0,1746 ± 0,0015
7000	3,33	0,71 ± 0,005	10,87 ± 0,07%	0,1741 ± 0,0015

Fue necesario desarrollar estos cálculos debido a que el grupo electrógeno disponible se encuentra acoplado y no existe acceso físico para medida de las variables en mención, sin embargo, los resultados se asocian con la cuantificación de la incertidumbre, caracterizando la dispersión de los valores calculados.

Posteriormente, con estos valores calculados, se procedió a realizar una comparación de los mismos con los resultados de simulación presentados en la Tabla 4. En la Tabla 9 se consignan los errores porcentuales y los márgenes de incertidumbres para cada medida, a partir de lo cual se verifican inconsistencias cuantitativas debidas a aproximaciones consideradas en el modelo que se derivan en correspondientes factores de imprecisión.

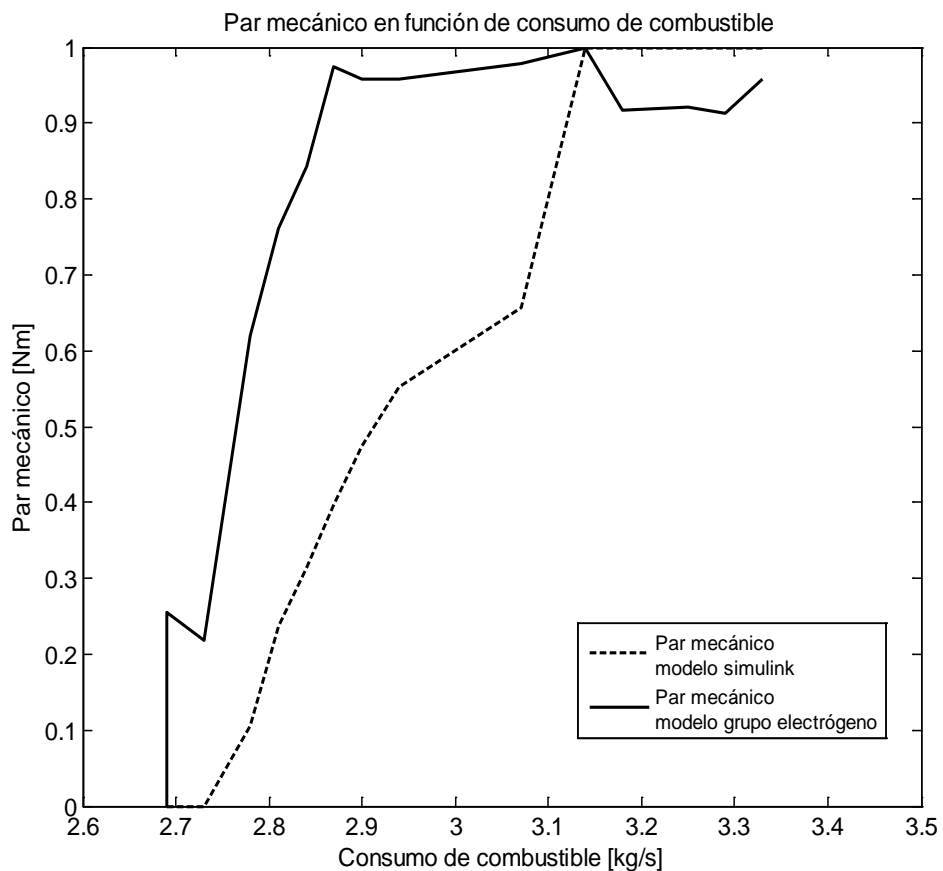
Tabla 9. Comparación resultados teóricos vs. Simulación

Par mecánico $T_m$ [N·m] modelo simulink	Par mecánico $T_m$ [N·m] modelo grupo electrógeno	Porcentaje de error
0,2173	0	100%
0,2173 ± 0,003	0,0571 ± 0,0006	73,722%
0,2173 ± 0,005	0,0866 ± 0,0011	60,147%
0,2205 ± 0,006	0,1199 ± 0,0014	45,623%
0,2245 ± 0,006	0,1369 ± 0,0015	39,020%
0,2269 ± 0,007	0,1479 ± 0,0015	34,817%
0,2294 ± 0,007	0,1585 ± 0,0016	30,906%
0,2318 ± 0,008	0,1753 ± 0,0017	24,374%

Tabla 9. (Continuación) Comparación resultados teóricos vs. Simulación

Par mecánico Tm [N·m] modelo simulink	Par mecánico Tm [N·m] modelo grupo electrógeno	Porcentaje de error
0,2342 ± 0,007	0,1747 ± 0,0017	25,405%
0,2374 ± 0,007	0,1757 ± 0,0016	25,989%
0,2479 ± 0,007	0,1789 ± 0,0016	27,833%
0,2479 ± 0,006	0,1716 ± 0,0015	30,778%
0,2479 ± 0,006	0,1738 ± 0,0015	29,891%
0,2479 ± 0,006	0,1746 ± 0,0015	29,568%
0,2479 ± 0,006	0,1741 ± 0,0015	29,770%

Figura 5. Par mecánico en función del consumo de combustible



En contraste, la Figura 5 presenta una comparación cualitativa de los datos tras normalizar las escalas. Con base en ello se resalta la coherente tendencia entre ambas respuestas, en cuanto a que un incremento de consumo de combustible corresponde con un mayor valor en torque a la salida del motor.

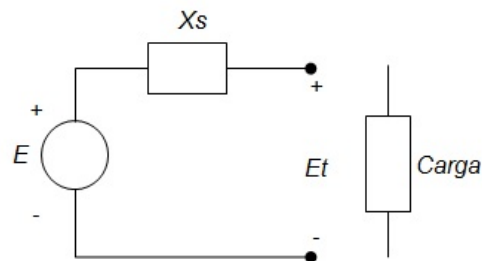
## 4. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SISTEMA FRENTE A DIFERENTES CARGAS

Los capítulos anteriores permitieron modelar y validar la conversión entre flujo de combustible y torque, realizada por un motor de combustión interna. Como complemento en este capítulo se presentará una implementación de un modelo equivalente de generador en simulink de Matlab®, la cual expondrá el comportamiento dinámico del sistema frente a tres tipos de cargas impuestas, resistiva, impedancia y motor bifásico. Como primera instancia se describirá la inductancia propia del modelo para luego realizar la simulación del comportamiento de la potencia eléctrica ante las cargas descritas anteriormente.

### 4.1 AJUSTE DE LA INDUCTANCIA PROPIA DEL MODELO

Para realizar este ajuste se toma como referencia el circuito equivalente de la Figura 6, a partir de la cual se definen las siguientes variables: La tensión inducida  $E$ , la reactancia síncrona  $X_s$ , la tensión en los terminales  $E_t$  y la carga.

Figura 6. Circuito equivalente monofásico para modelar diferentes cargas



Fuente: [14]

Para llegar a un valor de inductancia, se debe establecer la reactancia síncrona, la cual se determina ignorando la resistencia del inducido y de la ecuación (4.1), asimismo de esta expresión se aproxima la potencia de salida del generador por medio de las características del grupo electrógeno del Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA) de la Escuela de Ingeniería Mecánica – UIS, donde la máxima potencia que se puede suministrar es de 7000 W y ocurrirá cuando  $\text{sen}(\delta)=1$  y  $E_t=E=110\text{V}$ , obteniéndose así el valor de la reactancia síncrona  $X_s$ .

$$P = \frac{3E_t * E}{X_s} \text{sen}(\delta) \quad (4.1)$$

$$X_s = \frac{3E_t * E}{P_{\text{máx}}} = \frac{3(110)(110)}{7000}$$

$$X_s = 5,18 \Omega$$

Teniendo el valor de la reactancia síncrona se halla la inductancia por medio de la siguiente expresión:

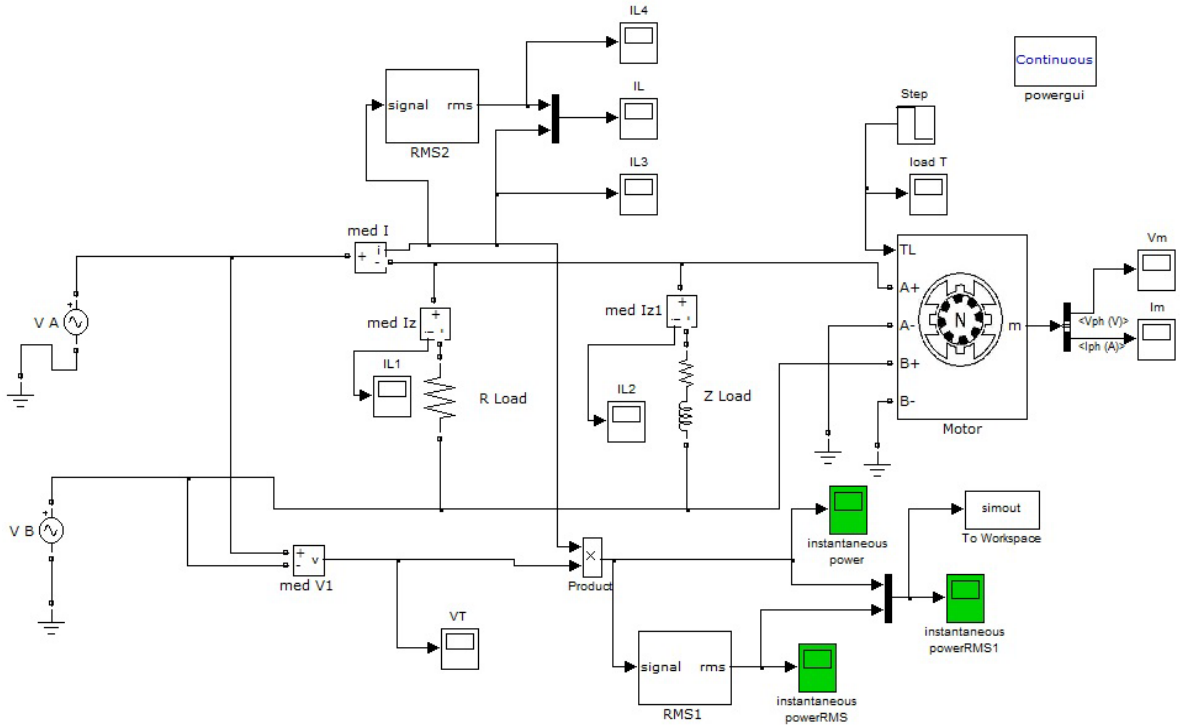
$$Zl = L = \frac{X_s}{2\pi f} = \frac{5,18}{2\pi(60)}$$

$$L = 0.01 H$$

## 4.2 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SISTEMA

La simulación del comportamiento dinámico del sistema se realiza implementando un modelo de circuito equivalente que se adapte a las condiciones requeridas, observando el efecto de las diferentes cargas impuestas hacia la potencia, tensión y corriente como se ilustra en la Figura 7. Se tomaron en cuenta tres tipos de cargas, una resistiva, una impedancia y un motor bifásico, cuyos valores se determinaron por medio del dimensionamiento de un sistema de microgeneración.

Figura 7. Implementación del modelo para ajustar el comportamiento del sistema ante diferentes cargas



Un sistema de microgeneración eléctrica se determina basándose en los kW de operación o los kW de rotor bloqueado.

Los kW de operación muestra la cantidad de potencia que el sistema puede suministrar a la carga, los kW de rotor bloqueado presenta la cantidad de potencia que el generador puede suministrar a las cargas que presenten una alta corriente de inclusión cuando inician su funcionamiento [19].

Por lo tanto el sistema de microgeneración se dimensiona aumentando las cargas en un porcentaje. Para cargas de tipo resistivo se calcula al 100% del valor en kW de cada carga, representando cargas estáticas [19]. Para cargas dinámicas como lo es un motor, se aumenta al 200% de su capacidad en kW.

En base a los datos de la Tabla 10 se puede dimensionar el sistema teniendo en cuenta los kW totales a rotor bloqueado, por lo tanto la planta generadora debe estar alrededor de 10kW.

Tabla 10. kW para los diferentes tipos de cargas seleccionados

<b>Tipo de carga</b>	<b>kW de operación [kW]</b>	<b>kW a rotor bloqueado [kW]</b>
Resistiva	2	2
Impedancia	1,2	1,2
Motor bifásico	2,24	4,48
<i>Total kW</i>	<i>5,44</i>	<i>7,68</i>

La Tabla 11 muestra los valores asignados a las diferentes cargas basándose en cuantificaciones de potencia sin llegar a sobrepasar su máximo valor establecido.

Tabla 11. Valores asignados para las diferentes cargas

<b>Tipo de carga</b>	<b>Carga</b>
Resistiva	2 kW
Impedancia	1,2+0,2j kVA
Motor bifásico	3 [Hp] = 2,24 kW

#### **4.2.1 Comportamiento de la potencia eléctrica para una carga resistiva**

La Figura 8 muestra el comportamiento de la potencia al momento de aplicar una carga resistiva, se observa que parte de la potencia se convierte en energía útil o trabajo. Asimismo la Figura 9 y Figura 10 muestran el comportamiento de la corriente y tensión eléctrica para este tipo de carga impuesta.

Figura 8. Comportamiento de la potencia eléctrica para la carga resistiva

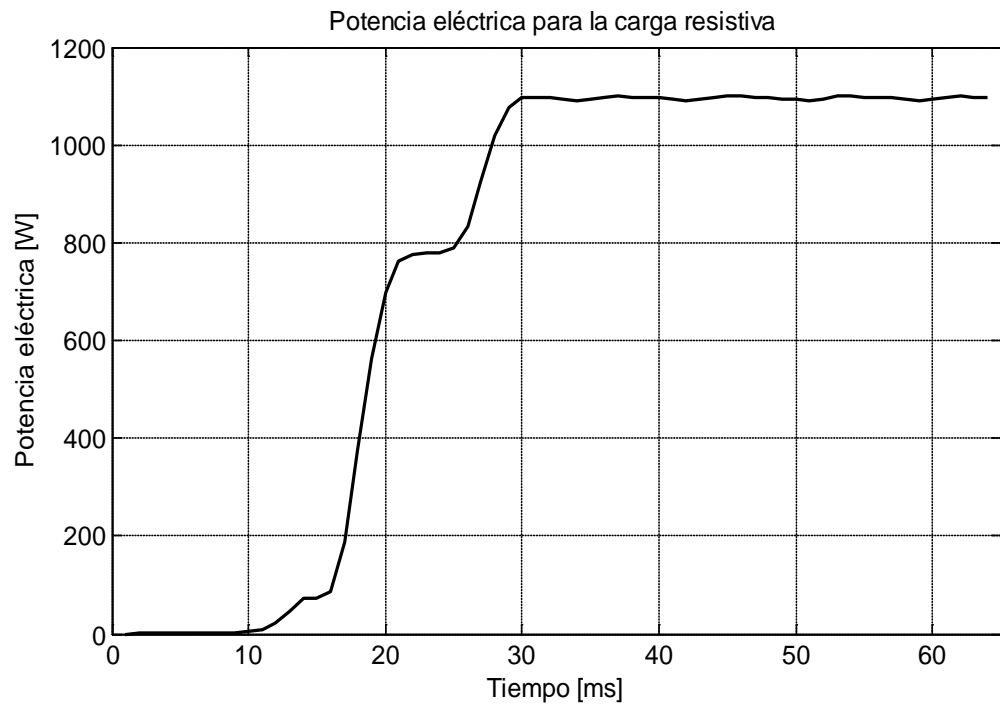


Figura 9. Corriente eléctrica para la carga tipo resistiva

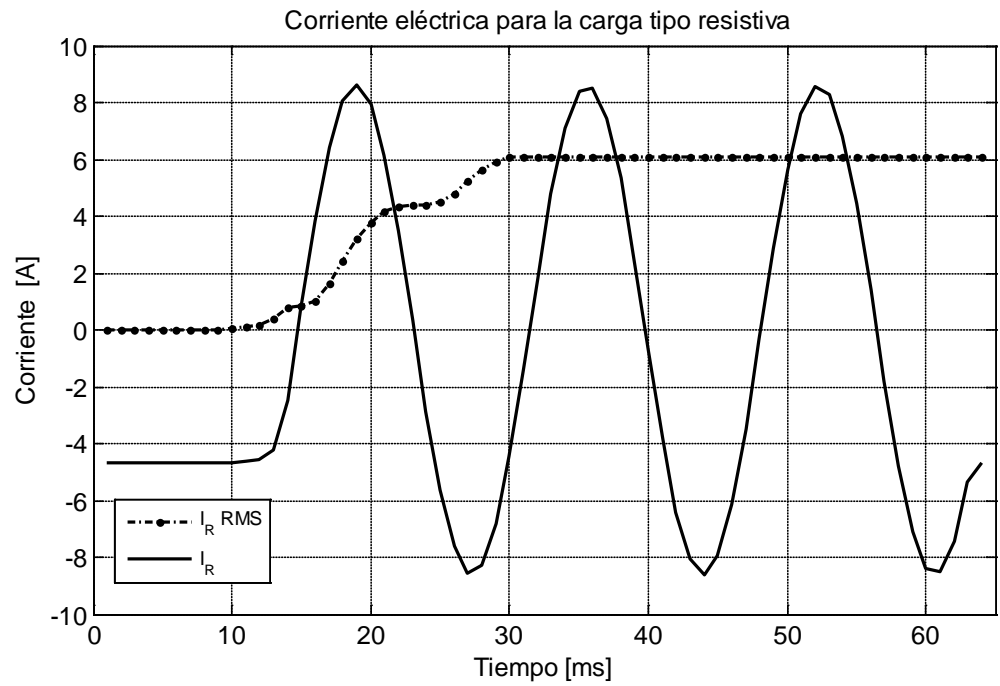
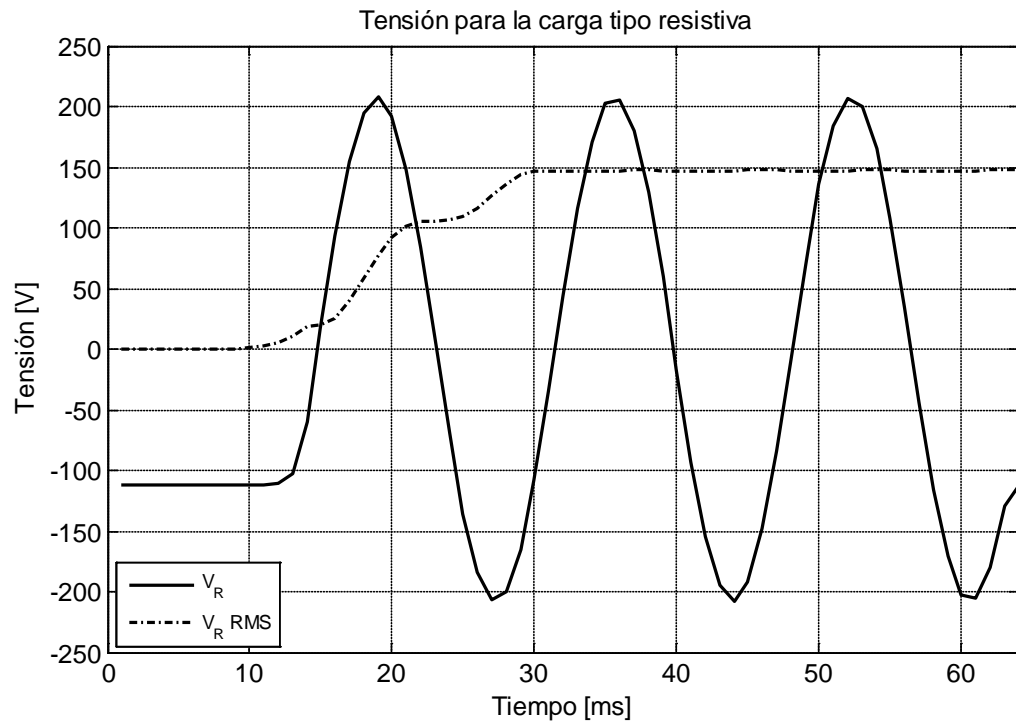


Figura 10. Tensión para la carga tipo resistiva



#### 4.2.2 Comportamiento de la potencia eléctrica para una impedancia

La Figura 11 presenta el comportamiento de la potencia al momento de agregarle a la carga resistiva una reactancia en serie, lo que ocasiona que la potencia activa disminuya, debido a que la tensión en los terminales tiende a disminuir por lo que se está adicionando carga con factor de potencia en atraso o adelanto.

Asimismo la Figura 12 y Figura 13 muestran el comportamiento de la corriente y tensión eléctrica respectivamente, para este tipo de carga impuesta.

Figura 11. Comportamiento de la potencia eléctrica activa para la impedancia

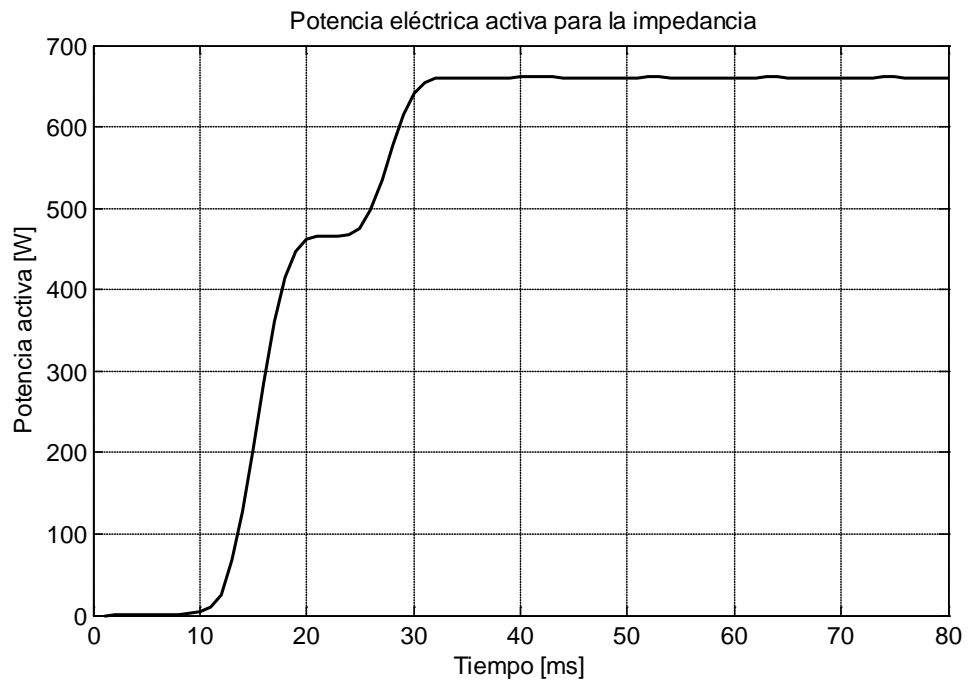


Figura 12. Corriente eléctrica para la carga tipo impedancia

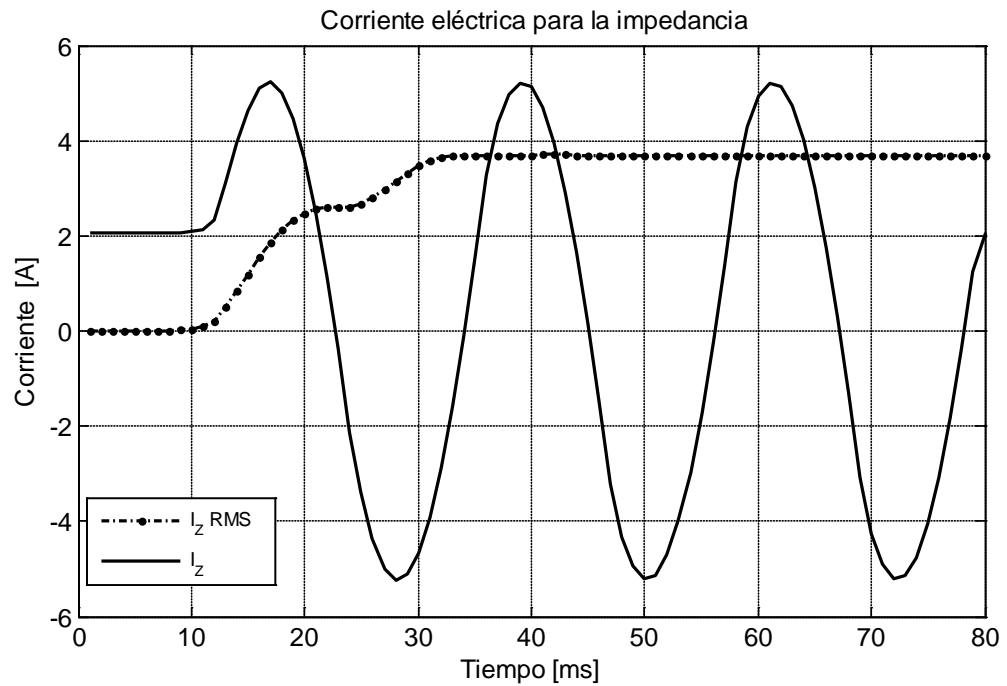
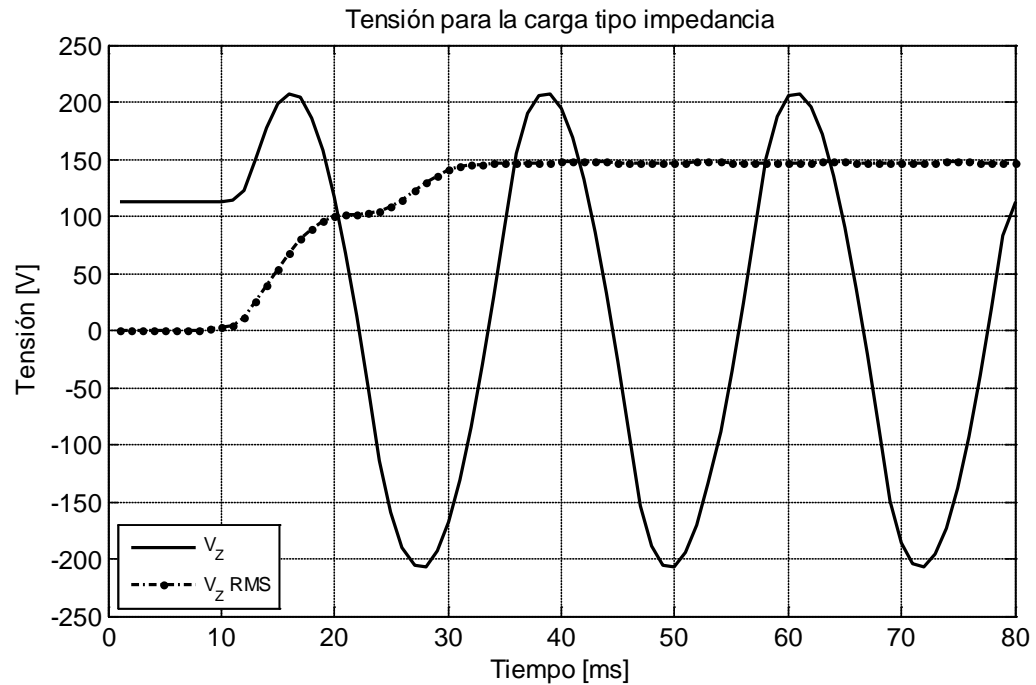


Figura 13. Tensión para la carga tipo impedancia



#### 4.2.3 Comportamiento de la potencia eléctrica para una carga motor bifásico

En la Figura 14 se observa el comportamiento de la potencia para un tipo de carga motor bifásico cuyo par mecánico generado por la carga en el motor es representado por medio de una señal escalón.

Se tiene en cuenta la presencia de la potencia reactiva ya que el motor se comporta como una carga inductiva, a medida que esta potencia sea mayor que la potencia activa indicará que el factor de potencia se encuentra por debajo de la unidad.

A pesar de que la potencia reactiva no produce ningún trabajo útil puede perjudicar la transmisión de la energía en las líneas de distribución eléctrica.

Figura 14. Comportamiento de la potencia eléctrica activa para la carga motor bifásico

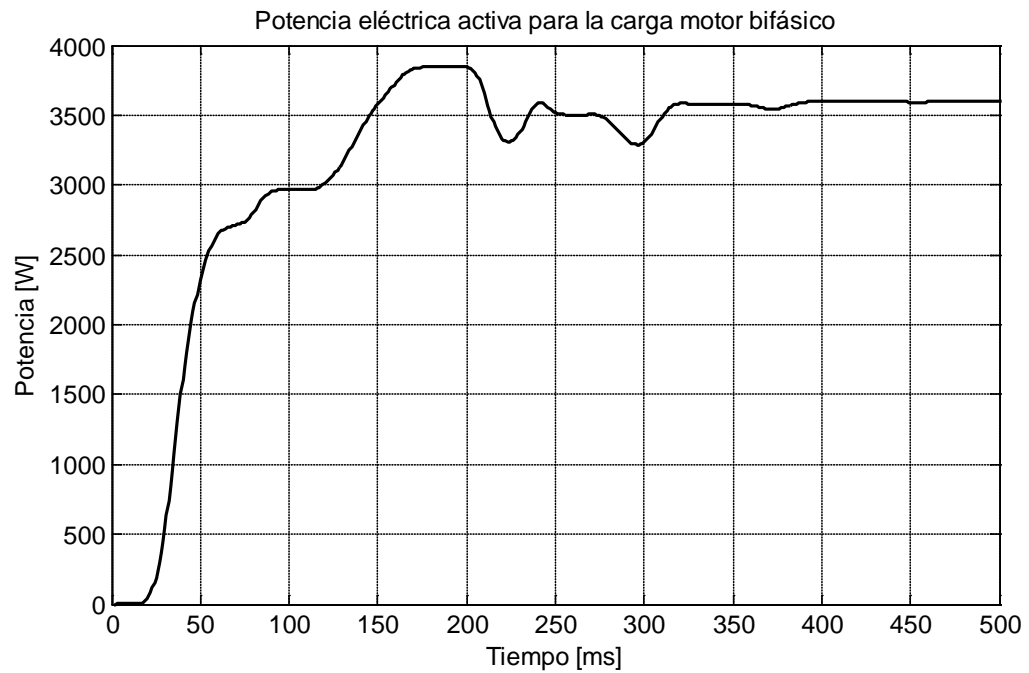
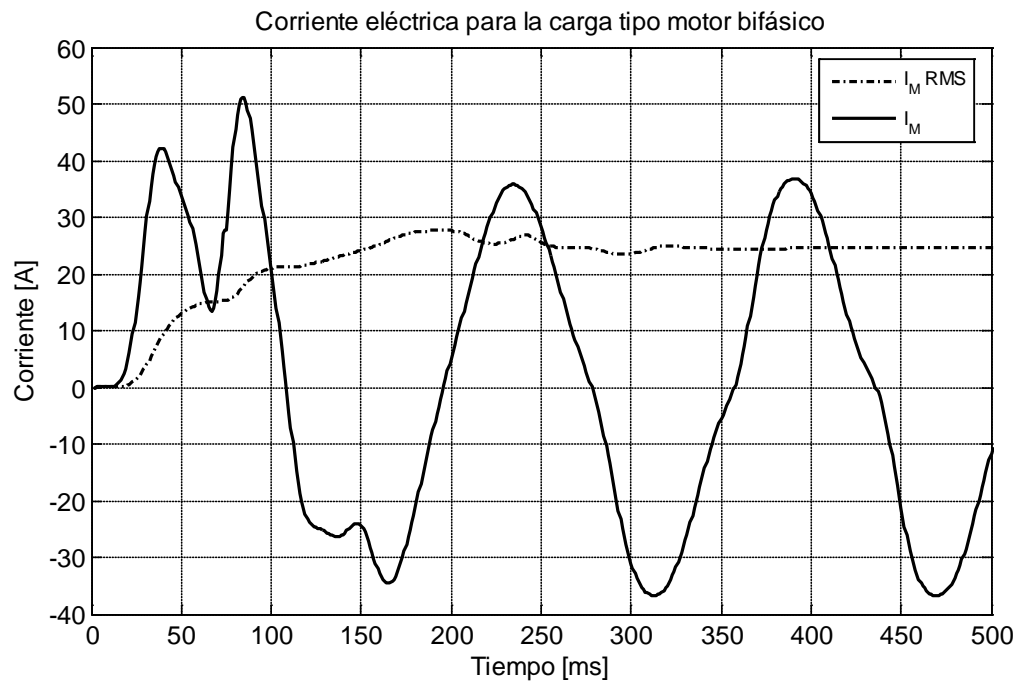
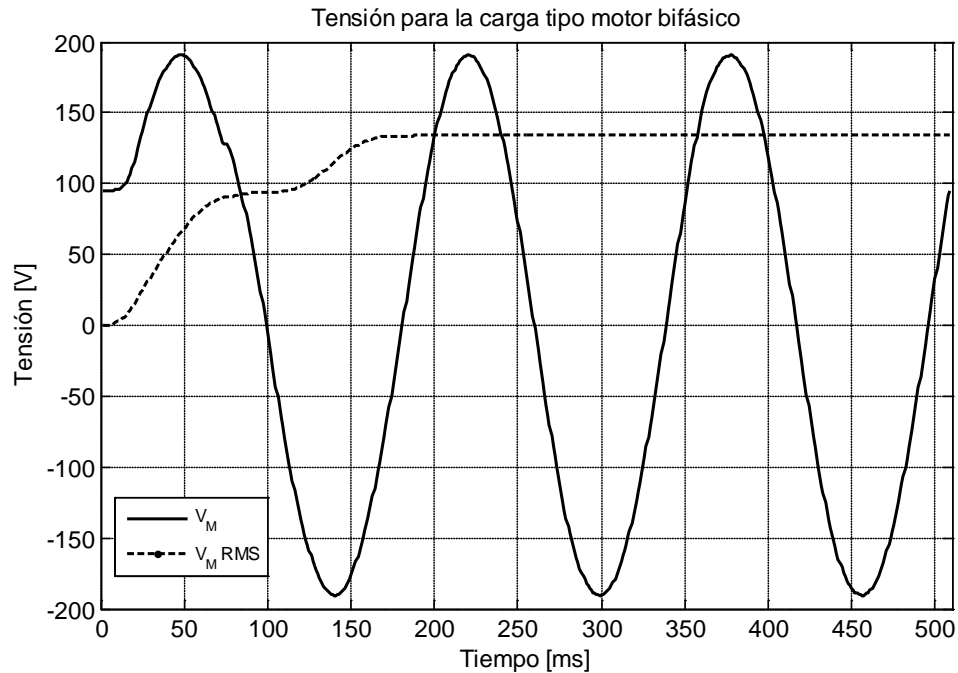


Figura 15. Corriente eléctrica para la carga tipo motor bifásico



La Figura 15 muestra el comportamiento de la corriente del motor, manifestando el valor de la corriente de arranque y el cambio que sufre dicha corriente después de concluir el tiempo de arranque.

Figura 16. Tensión para la carga tipo motor bifásico



#### 4.2.4 Comportamiento de la potencia eléctrica para los tres tipos de carga conectadas en paralelo

El comportamiento de la potencia activa al momento de aplicar los tres tipos de cargas expuestos anteriormente se muestra en la Figura 17.

Igualmente la Figura 18 y Figura 19 muestran el comportamiento de la corriente y tensión eléctrica respectivamente, para este tipo de carga impuesta.

Figura 17. Comportamiento de la potencia eléctrica para tres cargas en paralelo

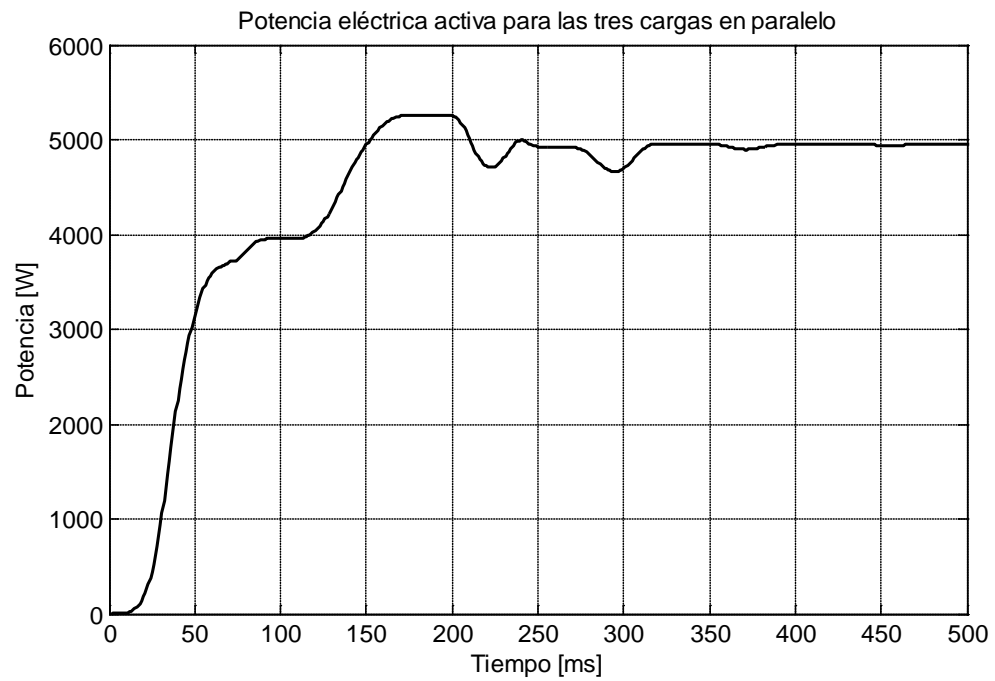


Figura 18. Corriente eléctrica total para las tres cargas conectadas en paralelo

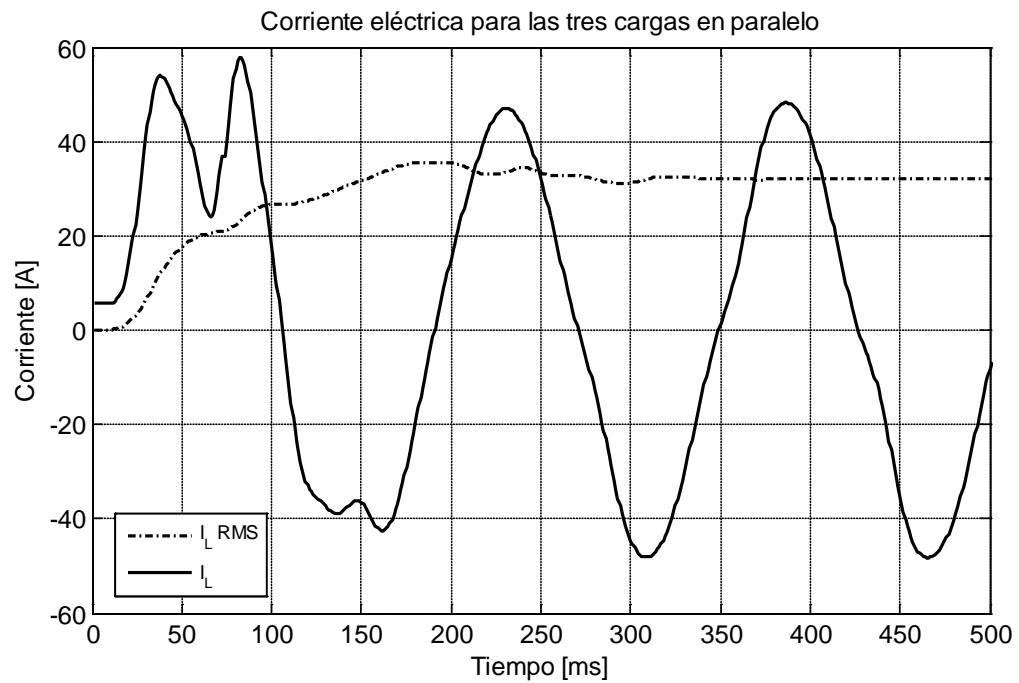
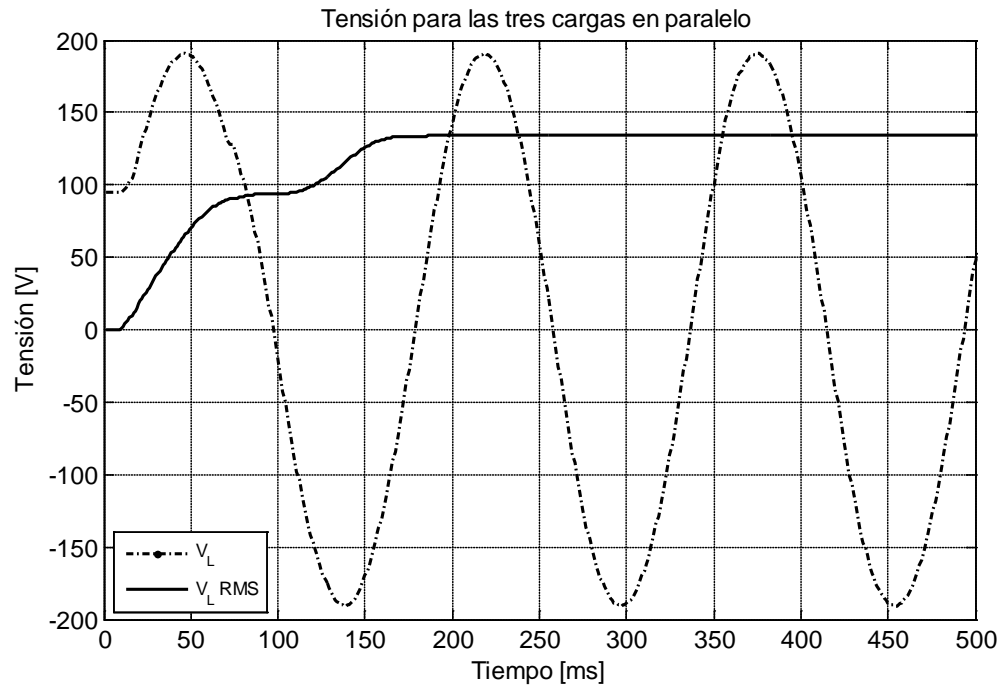


Figura 19. Tensión para las tres cargas conectadas en paralelo



Todas las corrientes y tensiones de valor eficaz se definieron de acuerdo a la siguiente expresión, la cual es válida para cualquier forma de onda.

$$RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t f(t)^2 dt}$$

Siendo T el periodo de la señal.

### 4.3 APLICACIONES PRÁCTICAS DE UN GRUPO ELECTRÓGENO

A través del estudio de las etapas que constituyen un grupo electrógeno, de las ecuaciones que describen sus variables y de los valores de parámetro asociados, es pertinente concluir este informe con una propuesta de uso para esta clase de sistemas en aplicaciones de generación eléctrica de baja potencia.

Inicialmente se considerará el consumo energético promedio en una vivienda. Para ello, la Tabla 12 ofrece un resumen de artefactos típicos empleados a escala residencial junto con su consumo asociado en kWh.

Tabla 12. Consumo promedio en kWh de una vivienda

<b>Artefacto</b>	<b>Consumo [kWh]</b>
Bombillos convencionales	0,1
Bombillos ahorradores	0,022
Computador	0,15
Televisor	0,2
Plancha	1,2
Microondas	0,8
Nevera	0,2
Lavadora	0,6
Calentador eléctrico	1
<i>Consumo total</i>	<i>4,272</i>

Fuente: [15]

A partir de lo anterior, se selecciona a 4,272kWh como el valor de suministro requerido. Con este valor así determinado, se realiza una revisión de dispositivos comerciales (plantas a gasolina) que satisfagan dicho requerimiento de consumo. La Tabla 13 incluye referencias comerciales disponibles para este propósito.

Con base en la información de la Tabla 13, se selecciona al dispositivo generador *Standard-Plus* modelo *EP5000CX* del fabricante Honda como la opción más viable para emplearse en una eventual aplicación, debido a que permite satisfacer el valor de consumo promedio propuesto.

Tabla 13. Plantas eléctricas comerciales generadoras a gasolina

Modelo planta eléctrica	Marca	Potencia generada continua [kW]	Potencia generada máxima [kW]	Capacidad de combustible [m <sup>3</sup> ]	Horas continuas de operación
SK-GGR3100P <sup>7</sup>	Sokan	2,8	3,1	15	7
Standard-plus <sup>8</sup> EP6500CXS	Honda	5,5	6,5	25,5	7,3
Standard-plus <sup>9</sup> EP5000 CX	Honda	4,5	5,0	25	7,7
DJ 5000CL <sup>10</sup>	Forte	4,5	5,0	25	8
YS6000E <sup>11</sup>	Sawafuji	5,9	6,0	6,7	2,3

Asimismo, a partir de información del fabricante se determina que 25m<sup>3</sup> de gasolina permitirán un suministro de 4,5kW durante 7,7h de operación permanente del dispositivo.

A partir de este dimensionamiento y tomando en cuenta aspectos como los tratados en detalle en este capítulo y los anteriores, se verifican las bases para trabajos futuros que permitan realizar estudios específicos sobre ciertas características dinámicas de operación para este tipo de sistemas y así proponer estrategias para mejorar su desempeño (algoritmos de control).

Fuente:

<sup>7</sup> Eduardoño. Energía: plantas eléctricas 0.9 a 7.0 KVA: gasolina-uso liviano. Disponible desde internet en: <<http://www.eduardono.com/>>

<sup>8</sup> Honda. Generadores: standard plus. Disponible desde internet en: <<http://www.honda.mx/fuerza/generadores/eg6500/>>

<sup>9</sup> Honda. Generadores: standard plus. Disponible desde internet en: <<http://www.honda.mx/fuerza/generadores/ep5000cx/>>

<sup>10</sup> Forte global motor products: generadores a gasolina. Disponible desde internet en:

<[http://globalmotor.net/pagesproducts/PDF/linea\\_agricola/generadores\\_gasolina.pdf](http://globalmotor.net/pagesproducts/PDF/linea_agricola/generadores_gasolina.pdf)>

<sup>11</sup> Eduardoño. Energía: plantas eléctricas 0.9 a 7.0 KVA: gasolina-uso pesado. Disponible desde internet en: <<http://www.eduardono.com/>>

## 5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en desarrollo del presente proyecto de grado, es posible proponer las siguientes conclusiones:

- Se determinó un modelo dinámico apropiado de motor de combustión interna para la alternativa de microgeneración propuesta, correspondiente con un grupo electrógeno. Esto se corrobora a partir del desarrollo de las Secciones 2.1 y 2.2, así como de las expresiones matemáticas (2.3), (2.8), (2.10), (2.11) y (2.13) presentadas en el Capítulo 2.
- Se realizó un procedimiento de análisis numérico que permitió determinar las características operativas y de desempeño para el sistema de microgeneración eléctrica. Como herramienta de análisis se empleó el entorno Simulink® de MATLAB®. La respuesta cualitativa del sistema simulado fue validada a partir de consideraciones prácticas con base en los fenómenos físicos modelados. A nivel cuantitativo se obtuvieron discrepancias justificadas en la complejidad del modelo, la imposibilidad de acceder a variables internas del sistema experimental y la falta de calibración de los instrumentos empleados, que trasciende en la imprecisión de las medidas a pesar de la cuantificación de la incertidumbre, falencias que constituyen la principal motivación de actividades complementarias a manera de trabajo futuro. Los resultados de simulación para el modelo del motor de combustión interna se presentaron en el Capítulo 3.
- Con el desarrollo del presente trabajo de grado se da paso a la continuidad como herramienta de trabajo de futuras investigaciones, enriqueciendo el conocimiento y formación de ingenieros en diferentes áreas de aprendizaje.

## 6. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Para un modelo completo del sistema de microgeneración, se deben tener en cuenta aspectos como el comportamiento del regulador de velocidad y el actuador de combustible que presenta el acople de par mecánico entre los subsistemas, reflejando una variación en el consumo de combustible y por consiguiente, un ajuste de ganancia en el dispositivo de actuación.

Asimismo, como trabajo futuro se propone:

- Realizar un ajuste de parámetros conveniente en el modelo de manera que sea posible obtener mejores resultados cuantitativos respecto a las mediciones proporcionadas por el Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas.
- Adicionar la instrumentación necesaria al grupo electrógeno disponible en el laboratorio, de manera que sea posible obtener mayor información experimental de las señales que se requieran analizar.
- El diseño de una etapa de control tanto para el motor de combustión interna como para el sistema de microgeneración.

## CITAS

- [1] PULKRABEK, Willard W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Second Edition. Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-191855-9
- [2] PAYRI GONZÁLEZ, Francisco, MARTÍN DÍAZ, Jaime. Motores alternativos. México: Limusa: Universidad Politécnica de Valencia, 2010. 286p. ISBN 978-607-05-0185-2
- [3] F. OBERT, Edward. Motores de combustión interna: Análisis y aplicaciones. Segunda edición. México: Compañía Editorial Continental, S.A. 764p.
- [4] GANESAN, V. Internal Combustion Engines. Tata McGraw-Hill India: Second edition. ISBN: 0-07-049457-6
- [5] ELGOWAINY, Amgad, WANG, Michael. Fuel Cycle Comparison of Distributed Power Generation Technologies. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory. ANL/ESD/08-4. November 2008.
- [6] ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Tecnologías de generación de energía eléctrica. México: Limusa, 2009. 386p. ISBN: 978-607-05-0135-7
- [7] G. Quiñonez-Varela, A. Cruden, "Development of a small-scale generator set model for local network voltage and frequency stability analysis" IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 2, JUNE 2007.
- [8] G. Quiñonez-Varela, A. Cruden, A. Grant, and A. Castaneda, "Electrical integration of wind turbines into industrial power systems: The case of a mining

unit,” in Proc. IEEE PowerTech 2001, Porto, Portugal, Sep. 10–13, 2001, vol. 4, p. 5, ISBN 0-7803-7140-2.

[9] G. S. Stavrakakis and G.N. Kariniotakis, “A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diesel-wind turbines systems interaction. Part I: A general multimachine power system model,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 10, no. 3, pp. 577–583, Sep. 1995.

[10] Wind–Diesel Generation Using Doubly Fed Induction Machines, Ruben Peña , Member, IEEE, Roberto Cardenas, Senior Member, IEEE, Jose Proboste, Jon Clare, Senior Member, IEEE, and Greg Asher, Fellow, IEEE.

[11] CHACÓN VELASCO, Jorge Luis. “Práctica N°1: Identificación y operación del grupo electrógeno” Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA), Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander.

[12] CHACÓN VELASCO, Jorge Luis. “Práctica N°2: Generación de potencia eléctrica por medio del grupo electrógeno utilizando como combustible la gasolina” Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA), Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander.

[13] HEYWOOD, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, 1988.

[14] CHAPMAN, Stephen J. Máquinas Eléctricas. Tercera Edición. McGraw-Hill.

[15] ESTRADA, Leonardo. “Normativa colombiana CODENSA: Cobro del recibo de la energía eléctrica en Bogotá”. Internet: (<https://sites.google.com/site/centralure/tarifas-bogota>).

[16] BARRERA CÁRDENAS, René Alexander. Modelado de la máquina síncrona mediante redes neuronales, Colombia, Bucaramanga, 2010. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

[17] GONZÁLEZ ACEVEDO, Hernando. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico, Colombia, Bucaramanga, 2008. Maestría en Ingeniería: Área Electrónica, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

[18] VILLAMIZAR MONTES, Libardo. Prototipo de herramienta software para la estimación de parámetros de la máquina síncrona bajo condiciones de carga, Colombia, Bucaramanga, 2008. Maestría en Ingeniería: Área Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

[19] ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. Guía práctica para el cálculo de instalaciones eléctricas. Limusa Noriega Editores.

## BIBLIOGRAFÍA

ARIAS, Tatiana, HERNANDEZ, Manuel. Análisis de oscilaciones de un sistema SMIB mediante el ajuste del compensador (POD) del SVC. Trabajo de grado para optar por título de Ingeniero Electricista. Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Eléctrica, Colombia, Pereira, 2012. Universidad Tecnológica de Pereira.

BARRERA CÁRDENAS, René Alexander. Modelado de la máquina síncrona mediante redes neuronales, Colombia, Bucaramanga, 2010. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

CHACÓN VELASCO, Jorge Luis. “Práctica N°1: Identificación y operación del grupo electrógeno” Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA), Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander.

CHACÓN VELASCO, Jorge Luis. “Práctica N°2: Generación de potencia por medio del grupo electrógeno utilizando como combustible la gasolina” Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA), Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander.

CHAPMAN, Stephen J. Máquinas Eléctricas. Tercera Edición. McGraw-Hill.

ELGOWAINY, Amgad, WANG, Michael. Fuel Cycle Comparison of Distributed Power Generation Technologies. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory. ANL/ESD/08-4. November 2008.

ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Tecnologías de generación de energía eléctrica. México: Limusa, 2009. 386p. ISBN: 978-607-05-0135-7

ESTRADA, Leonardo. "Normativa colombiana CODENSA: Cobro del recibo de la energía eléctrica en Bogotá". Internet: (<https://sites.google.com/site/centralure/tarifas-bogota>).

F. OBERT, Edward. Motores de combustión interna: Análisis y aplicaciones. Segunda edición. México: Compañía Editorial Continental, S.A. 764p.

FRAILE MORA, Jesús. Máquinas Eléctricas. Sexta Edición. McGraw-Hill, 2008. ISBN: 978-84-481-6112-5

GONZÁLEZ ACEVEDO, Hernando. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico, Colombia, Bucaramanga, 2008. Maestría en Ingeniería: Área Electrónica, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

G. Quiñonez-Varela, A. Cruden, "Development of a small-scale generator set model for local network voltage and frequency stability analysis" IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 2, JUNE 2007.

G. Quiñonez-Varela, A. Cruden, A. Grant, and A. Castaneda, "Electrical integration of wind turbines into industrial power systems: The case of a mining unit," in Proc. IEEE PowerTech 2001, Porto, Portugal, Sep. 10–13, 2001, vol. 4, p. 5, ISBN 0-7803-7140-2.

G. S. Stavrakakis and G.N. Kariniotakis, "A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diesel-wind turbines systems interaction. Part I: A general multimachine power system model," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 10, no. 3, pp. 577–583, Sep. 1995.

GANESAN, V. Internal Combustion Engines. Tata McGraw-Hill India: Second edition. ISBN: 0-07-049457-6

HEYWOOD, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, 1988.

Ing. GONZÁLEZ ACEVEDO, Hernando. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico, Colombia, Bucaramanga, 2008. Maestría en Ingeniería: Área Electrónica, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

Ing. VILLAMIZAR MONTES, Libardo. Prototipo de herramienta software para la estimación de parámetros de la máquina síncrona bajo condiciones de carga, Colombia, Bucaramanga, 2008. Maestría en Ingeniería: Área Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

JÁVITA, Jesús, AGUILAR Rommel. Análisis de pequeña señal de un sistema máquina-barra infinita, Ecuador, Quito, 2005. Departamento de Energía Eléctrica. Escuela Politécnica Nacional.

KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994. ISBN: 0-07-035958-X

ORTEGA PLANA, Juan María, RAMIREZ VÁZQUEZ, José. Máquinas de Corriente Alterna, Enciclopedia CEAC de Electricidad. Ediciones CEAC, S.A. – 1973. Cuarta Edición. ISBN 84-329-6003-9.

PAYRI GONZÁLEZ, Francisco, MARTÍN DÍAZ, Jaime. Motores alternativos. México: Limusa: Universidad Politécnica de Valencia, 2010. 286p. ISBN 978-607-05-0185-2.

PAYRI GONZÁLEZ, Francisco, MARTÍN DÍAZ, Jaime. Motores alternativos. México: Limusa: Universidad Politécnica de Valencia, 2010. 286p. ISBN 978-607-05-0185-2

PULKRABEK, Willard W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Second Edition. Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-191855-9

VILLAMIZAR MONTES, Libardo. Prototipo de herramienta software para la estimación de parámetros de la máquina síncrona bajo condiciones de carga, Colombia, Bucaramanga, 2008. Maestría en Ingeniería: Área Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

Wind–Diesel Generation Using Doubly Fed Induction Machines, Ruben Peña , Member, IEEE, Roberto Cardenas, Senior Member, IEEE, Jose Proboste, Jon Clare, Senior Member, IEEE, and Greg Asher, Fellow, IEEE.