



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Caracterización de un motogenerador de 3,5 kw operado con biogás y almacenamiento de energía en baterías AGM

Daniel Franco Robledo

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, D.C., Colombia
2022**

Caracterización de un motogenerador de 3,5 kw operado con biogás y almacenamiento de energía en baterías AGM

Daniel Franco Robledo

**Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Ingeniería Mecánica**

Director:

**PhD. Fabio Emiro Sierra Vargas
Ingeniero Mecánico**

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, D.C
2022**

Este trabajo de grado está dedicado a:

A Dios quien ha sido mi guía durante toda mi vida

A mis padres quienes me han ayudado en este proceso y me aconsejan.

A mi hermano Iván David quien valora la academia
y quien siempre ha sido un apoyo para alcanzar mis logros.

Declaración de obra original

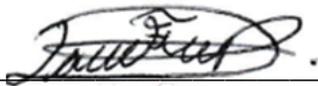
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Daniel Franco Robledo

Fecha 10/12/2022

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios quien me ha otorgado la vida y ha iluminado todo para proporcionar el cumplimiento de mis aspiraciones.

Así mismo, agradezco al PhD. Ingeniero Fabio Emiro Sierra Vargas quien fue el director de la investigación y quien aportó sus conocimientos en cada etapa del estudio para que se alcanzaran los resultados que esperaba.

También agradezco a la Universidad Nacional de Colombia, especialmente a la sede Bogotá, la cual brindó todos los recursos y herramientas del Laboratorio de Plantas Térmicas y Energías Renovables para llegar a estos resultados.

Agradezco al Ingeniero Jorge Nicolás Parada Enríquez quien me ayudó, como asistente del laboratorio, en la realización de las instalaciones, pruebas y aporte de conceptos para alcanzar los resultados.

Resumen

Caracterización de un motogenerador de 3,5 kw operado con biogás y almacenamiento de energía en baterías AGM

El presente estudio experimental tiene como finalidad caracterizar un conjunto motogenerador de 3,5 [kW] que opera con biogás y dos baterías AGM de 12 [V] y 300 [Ah] cada una. La máxima eficiencia del motogenerador fue de 15,329 [%]. Las cargas de las baterías durante los primeros 10 minutos evidenciaron un incremento considerable del voltaje. A su vez, durante el mismo período de tiempo, el porcentaje de carga aumentó de manera drástica. Se muestra que la información del tiempo de descarga proporcionada por el fabricante no se asemeja al tiempo medido en el estudio. El estudio concluye que la manera más eficiente de utilizar un motogenerador es conectando cargas altas sin sobrepasar el amperaje máximo indicado. También se puede concluir que, el consumo de gas natural fue prácticamente constante conectando cargas altas o bajas. Cabe anotar que el motogenerador funcionó, sin problemas, con gas natural, a pesar de que está diseñado para operar con biogás.

Palabras clave: caracterización, Motogenerador, baterías, banco de resistencias.

Abstract

Characterization of a 3.5 kW motor generator operated with biogas and energy storage in AGM batteries

The purpose of this experimental study is to characterize a 3.5 [kW] motor generator set that operates with biogas and two AGM batteries of 12 [V] and 300 [Ah] each. The maximum efficiency of the motor generator was 15,329 [%]. The battery charges during the first 10 minutes showed a considerable increase in voltage. In turn, during the same period of time, the load percentage increased dramatically. It is shown that the discharge time information provided by the manufacturer does not resemble the time measured in the study. The study concludes that the most efficient way to use a motor generator is by connecting high loads without exceeding the maximum amperage indicated. It can also be concluded that the consumption of natural gas was practically constant connecting high or low loads. It should be noted that the motor generator worked with natural gas without problems, despite the fact that it is designed to operate with biogas.

Keywords: Characterization, motor generator, batteries, resistance bank.

Contenido

	Pág.
Resumen	Error! Bookmark not defined.
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	3
1.1 Problema/justificación	7
1.2 Objetivos de la investigación	8
1.2.1 Objetivo general	8
1.2.2 Objetivos específicos.....	8
1.3 Justificación de la investigación	8
2. Marco teórico.....	11
2.1 Biogás	11
2.2 Gas natural de Colombia	11
2.3 Motor de Combustión Interna.....	13
2.4 Consumo Especifico de Combustible.....	13
2.5 Motogenerador	13
2.6 Generador Eléctrico	14
2.7 EGS	16
2.8 Batería.....	17
2.8.1 Tipos de Baterías Recargables.....	17
Baterías Plomo - Ácido - AGM	18
Baterías Ni-MH	18
Baterías de Iones de Litio	18
2.8.2 Porcentaje de Carga SOC	19
2.8.3 Ciclo de Vida.....	19
2.8.4 Rango de Temperatura de Operación	19
2.8.5 Controlador.....	19
2.9 Inversor.....	20
2.10 Rectificador	20
2.11 Carga Eléctrica	20
2.12 Ecuaciones	21
Balance de Energía	21
2.14 Segunda Ley de la Termodinámica	22
2.15 Ciclo Otto	22
Ecuaciones Motogenerador	26
3. Experimentación	29
3.1 Metodología	29
3.1.1 Tipo de investigación.....	29
3.1.2 Diseño de investigación	29

3.1.3	Caracterización Motogenerador	29
3.1.4.	Caracterización Baterías	30
3.1.5.	Metodología Montaje Final	30
3.1.6	Descripción de Equipos	31
	Motogenerador	31
	Baterías AGM.....	32
	Banco de resistencias	32
	Reóstato Roosevelt, N.Y.	36
	Cargador de baterías Schumacher SC1353	37
	Transformador de AC a DC se 3500 XX.....	37
	Ventiladores	37
	Estructura metálica.....	37
	Inversor	37
3.1.7	Descripción de equipos de medición	39
	Pinza amperimétrica digital ERASMUS EA-330.....	39
	Pinza amperimétrica digital AC/DC.....	39
	Multímetro digital Protek 506	40
	Tacómetro digital de contacto Minipa MDT-2238A	40
	Medidor de gas natural American Meter Company AC-250	41
	Módulo para toma de datos de National Instruments NI-9225	41
	Indicador de carga de batería	42
	Chasis compac DAQ	42
3.1.8	Técnicas e instrumentos	43
	Toma de Datos.....	43
	Motogenerador	43
	Carga resistiva	43
	Caracterización Baterías	46
4.	Resultados	49
	Datos de carga y descarga de las baterías.....	53
	Aplicación de Ecuaciones.....	63
5.	Análisis	65
6.	Conclusiones y Recomendaciones	73
	Bibliografía	75

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema de la máquina eléctrica	14
Figura 2. Esquema del generador síncrono	15
Figura 3. Banco de resistencias.....	21
Figura 4. Esquema del ciclo otto ideal	23
Figura 5. Diagrama P-V del ciclo otto ideal	23
Figura 6. Esquema de motor real de encendido por chispa de cuatro tiempos	24
Figura 7. Diagrama P-V del ciclo otto real.....	25
Figura 8. Diagrama T-S del ciclo otto ideal	25
Figura 9. Diagrama P-V del ciclo otto ideal	26
Figura 10. Esquema del sistema.....	30
Figura 11. Motogenerador PX3600EBG.	31
Figura 12. Baterías AGM MTEK 12[V] y 300 [Ah]	32
Figura 13. Características de carga de baterías facilitada por el fabricante	33
Figura 14. Gráfica de los ciclos de vida de las baterías facilitada por el fabricante	34
Figura 15. Circuito eléctrico del banco de resistencias.....	35
Figura 16. Simulación del banco de resistencias	35
Figura 17. Panel de control del banco de resistencias	36
Figura 18. Banco de resistencias en funcionamiento	36
Figura 19. Reóstato	36
Figura 20. Cargador de baterías schumacher sc1353.....	37
Figura 21. Transformador AC a DC	37
Figura 22. Ventilador del banco de resistencias.....	38
Figura 23. Diagrama de la estructura para el sistema.....	38
Figura 24. Inversor DC a AC.....	39
Figura 25. Pinza amperimétrica	39
Figura 26. Pinza amperimétrica AC y DC Fluke.....	40
Figura 27. Multímetro digital	40

Figura 28. Tacómetro Digital MDT.....	41
Figura 29. Medidor de gas natural American Meter Company A C-250.	41
Figura 30. Modulo National Instruments ni-9225	42
Figura 31. Indicador de carga de batería circuitarte.....	42
Figura 32. Chasis Compact DAQ	43
Figura 33. Esquema de la caracterización del motogenerador	45
Figura 34. Esquema de la descarga de las baterías con el banco de resistencia	46
Figura 35. Esquema de la descarga de las baterías con el reóstato.....	47
Figura 36. Eficiencia vs potencia eléctrica de la caracterización del motogenerador de la prueba realizada con el medidor dentro del laboratorio.....	50
Figura 37. Consumo específico de combustible vs potencia eléctrica de la prueba realizada con el medidor dentro del laboratorio.....	51
Figura 38. Eficiencia vs potencia eléctrica de la caracterización del motogenerador de la prueba realizada con el medidor fuera del laboratorio.....	52
Figura 39. Consumo específico vs potencia eléctrica de la caracterización del motogenerador de la prueba realizada con el medidor fuera del laboratorio.....	53
Figura 40. Primera carga rápida de la Batería A.....	54
Figura 41. Segunda carga rápida de la Batería A.....	55
Figura 42. Primera carga rápida de la Batería B.....	56
Figura 43. Segunda carga rápida de la Batería B.....	57
Figura 44. Descarga de la batería A con el banco de resistencias a 10 [A] y 13 [Ω].....	58
Figura 45. Descarga de la batería B con el banco de resistencias a 10 [A] y 13 [Ω].....	59
Figura 46. Descarga de la batería A con el banco de resistencias a 4,4 [A] y 26 [Ω].....	60
Figura 47. Descarga de la batería B con el banco de resistencias a 4,4 [A] y 26 [Ω].....	61
Figura 48. Descarga de la batería A con el reóstato durante una hora a 16 [A] y 1 [Ω].....	62
Figura 49. Descarga de la batería B con el reóstato durante una hora a 16 [A] y 1 [Ω].....	63

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Composición típica del gas natural según Eiti Colombia, peso molecular del gas y poder calorífico inferior	13
Tabla 2. Descarga de las baterías facilitadas por el fabricante	34
Tabla 3. Cálculos de la caracterización del motogenerador	44
Tabla 4. Tabla de mediciones de la caracterización del motogenerador	45
Tabla 5. Tabla de datos de la carga rápida de la batería.....	47
Tabla 6. Datos de la descarga de las baterías con el reóstato.....	48
Tabla 7. Tabla de mediciones de la caracterización del motogenerador con el medidor de gas natural dentro del laboratorio	49
Tabla 8. Tabla de cálculos del motogenerador en la prueba realizada con el medidor dentro del laboratorio	50
Tabla 9. Mediciones de la caracterización del motogenerador de la prueba realizada con el medidor general de los laboratorios.....	51
Tabla 10. Cálculos de la caracterización del motogenerador de la prueba realizada con el medidor fuera del laboratorio	52
Tabla 11. Datos de la primera carga rápida de la Batería A.....	53
Tabla 12. Datos de la Segunda carga rápida de la Batería A	54
Tabla 13. Datos de la primera carga rápida de la Batería B.....	55
Tabla 14. Datos de la Segunda carga rápida de la Batería B	56
Tabla 15. Datos de la descarga de la Batería A con el banco de resistencias a 10 [A] y 13 [Ω].....	57
Tabla 16. Datos de la descarga de la batería B con el banco de resistencias a 10 [A] y 13 [Ω]	58
Tabla 17. Datos de la descarga de la Batería A con el banco de resistencias a 4,4 [A] y 26 [Ω]	59
Tabla 18. Datos de la descarga de la batería B con el banco de resistencias a 4,4 [A] y 26 [Ω]	60
Tabla 19. Datos de la descarga de la batería A con el reóstato durante una hora 16 [A] y 1 [Ω].....	61
Tabla 20. Datos de la descarga de la batería B con el reóstato durante una hora a 16 [A] y 1 [Ω]	62

Introducción

La energía eléctrica se utiliza para abastecer muchas necesidades que se tienen actualmente. Esta es obtenida al transformar diferentes tipos de energía, como la energía de combustibles de origen fósil, energía hidroeléctrica, energía solar, energía eólica, energía geotérmica, energía de la biomasa y la energía nuclear.

La mayoría de las comunidades o instalaciones técnicas aisladas (instalaciones turísticas, granjas, entre otros.) que no cuentan con suministro de energía eléctrica de las redes nacionales, dependen de motogeneradores que usualmente operan con diesel para generar electricidad. [Basbous et al. (2012)] Los conjuntos de DG utilizados para estos fines están cargados con cargas desequilibradas y cargas no lineales, como fuentes de alimentación en equipos de telecomunicaciones, equipos médicos, iluminación, aplicaciones domésticas, bombas, ventiladores, etc. [Singh et al.(2006b)].

En Colombia, los hogares que tienen acceso a la red eléctrica aumentaron de 8 millones a 12,1 millones desde el año 2000, equivalente a casi el 95,8 % de la población. El 4,2 % correspondiente a 2 millones de personas, no tiene acceso a la red eléctrica y el 26 %, es decir, medio millón de ellos, utilizan fuentes de energías alternativas. Es así como, en Choco, Guajira y Boyacá, pocos hogares tienen acceso a la red eléctrica, el acceso a la red eléctrica ha aumentado en un 40 % y por eso, el uso de fuentes alternativas como, paneles solares, turbinas eólicas y motogeneradores pueden solucionar el problema. [Mamaghani et al. (2016)].

De igual forma, las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia corresponden al 52 % del área nacional. De acuerdo con Bueno y Rodríguez (2019) aproximadamente el 5 % de la población colombiana no cuenta con suministro de energía eléctrica. El combustible Diesel se utiliza en las zonas no interconectadas en Colombia, siendo una fuente de energía no renovable.

La obtención del mismo en dichas zonas se dificulta debido a los incrementos en el precio y a las condiciones geográficas que complican su distribución.

Ahora bien, según lo planteado por Cagua, Olmos, Herrera y Gallego (2016) una alternativa para disminuir el consumo de combustibles fósiles es utilizar combustibles alternativos como el biogás. Adicionalmente, en el grupo de investigación de Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética se está investigando la forma como afecta el rendimiento de combustible en el motogenerador agregando un conjunto de baterías.

Los motogeneradores cuando se encuentran en operación generalmente no funcionan de manera eficiente. El generador eléctrico entrega una determinada cantidad de energía eléctrica a la carga y el motogenerador consume casi la misma cantidad de combustible independientemente de la cantidad de electricidad que entrega. En algunos estudios que se presentarán posteriormente, se utiliza un conjunto de baterías para almacenar la energía eléctrica cuando el motogenerador se encuentra operando.

En el presente estudio se realiza la caracterización de un conjunto motogenerador de 3 [kW] que opera con gas natural acoplado a un sistema de almacenamiento de baterías AGM de 300 [Ah], por tal razón, se desarrolló de la siguiente manera: se realizaron pruebas al motogenerador con gas natural, operado a condiciones locales en Bogotá D.C., utilizando velocidad constante y carga variable, así como también, evaluando el desempeño energético, para lo cual se utilizaron las baterías AGM. Igualmente, se utilizó un conjunto motogenerador diseñado para operar con biogás; sin embargo, se operó con gas natural, debido a que se contaba con un suministro continuo en el laboratorio. En este caso, es importante mencionar que, el motogenerador cuenta con un conjunto de baterías AGM para almacenar la energía eléctrica cuando se encuentra en operación y poderla utilizar cuando sea necesario.

Por otra parte, el contenido del presente estudio se encuentra dividido de la siguiente manera: Antecedentes, problema de investigación, marco teórico, metodología, conclusiones, agradecimientos, referencias e información de los autores.

1. Antecedentes

En algunas investigaciones se incorporan sistemas de almacenamiento de energía (ESS) por sus siglas en inglés (Energy Storage Systems) para compensar la variabilidad de la energía suministrada por las energías renovables. Es el caso de Abbey et al. (2008) quienes utilizaron un sistema de almacenamiento de energía en un sistema de generación de energía híbrido con el propósito de capturar una mayor parte de la energía eólica y optimizar la operación del grupo electrógeno diesel y, de esta manera, obtener una mayor eficiencia del sistema, reduciendo el consumo de combustible. Esto lo realizaron mediante simulaciones en un software, determinando que el almacenamiento de energía reduce el costo económico en circunstancias específicas en que el costo de la electricidad generada de manera convencional es alto y se obtienen beneficios ambientales. A su vez, propusieron una configuración de sistema de control para un sistema de almacenamiento de energía de dos niveles y se discutieron varias estrategias de control.

En otro estudio, Magnago, Tibola, Dalla y Pinheiro (2019) utilizaron un grupo electrógeno que opera con etanol, con velocidad variable, acoplado a un banco de baterías, ya que, se considera que esto tiene varias ventajas, en comparación con los generadores diesel de velocidad fija. Por lo general, la velocidad del grupo electrógeno está controlada por el actuador del motor de combustión interna (ICE) y la corriente del elemento de almacenamiento por el rectificador del generador eléctrico [5]. Se presenta así, un enfoque diferente para administrar el grupo electrógeno, donde la velocidad es regulada por el generadorelctrico y la corriente por el motor de combustión interna.

En el estudio realizado por Muselli, Notton, and Louche (1999) se desarrolló una metodología a través de simulaciones para calcular el tamaño correcto de un sistema híbrido fotovoltaico (FV) compuesto por un motogenerador que opera con gasolina o

diesel, un panel solar, unas baterías, un controlador que enciende o apaga el motogenerador cuando las baterías necesiten carga y un inversor de corriente AC/DC, para optimizar su gestión. Se demostró que la configuración óptima, es decir, la configuración de capacidad que minimiza el coste energético, se obtiene con una capacidad de almacenamiento de batería de dos días. Igualmente, se encontró que una configuración óptima es aquella donde el motogenerador se enciende cuando la carga de la batería está al 30 % de su capacidad máxima y donde se apaga, cuando la carga de la batería está al 70 % de capacidad máxima de la misma.

Johnson, Ellis, Denda, Morino, Shinji, Ogata, and Tadokoro (2013) en su estudio pretendieron mitigar los efectos desestabilizadores de las fluctuaciones de energía eléctrica obtenida por medio de una instalación fotovoltaica. Se desarrolló un controlador para que el motogenerador y una batería suavizarán la producción de energía. La variabilidad del sistema fotovoltaico se redujo a un nivel específico con una batería más pequeña o con un sistema de acondicionamiento de energía. Esto permite también que, la vida útil de la batería pueda ser extendida.

Por su parte, en el estudio realizado por Bo, Vaktskjold, Pedersen, and Mo (2019) se implementó un control predictivo del modelo para controlar un grupo electrógeno que opera a gas natural y una batería. Los motogeneradores que operan con diesel y las turbinas que operan con gas natural, son utilizados en la generación de energía eléctrica en barcos, debido a que, no varía demasiado la frecuencia eléctrica, mientras que los motogeneradores que operan con gas natural si modifican cuando la carga eléctrica varia demasiado, debido a que, se premezcla el gas natural con el aire antes de ser comprimido en el cilindro, variando así, el consumo de gas natural y alterando el funcionamiento.

El motogenerador que opera con gas natural de ciclo Otto y la batería son una manera de que, las variaciones de carga puedan ser manejadas por la batería, mientras que los motores pueden generar la potencia media. Es importante mencionar los usos que tiene los paquetes de baterías, tales como: reservar rotación, reducir picos, suavizar potencia, mejorar el rendimiento dinámico, carga estratégica y funcionar con cero emisiones. Aquí se especifica que, el controlador y la batería suavizan las fluctuaciones de energía eléctrica.

Por su parte, en el estudio realizado por Niwas and Singh (2016) se diseñó un sistema conformado por una batería que suministra energía eléctrica a la carga, durante los periodos de sobrecarga y, almacena la energía durante las cargas livianas para que la corriente extraída del generador sea siempre óptima del 80 % al 100 % de su capacidad nominal. El generador síncrono de campo devanado es accionado a una velocidad constante por un motor que opera con diesel (DG). En el estudio se prueba el factor de potencia unitario (UPF) y la nivelación de carga y se utiliza un convertidor de corriente modulado por ancho de pulso (PWM-VSC) para suministrar la demanda de potencia reactiva de la carga. El enlace CC del sistema VSC almacena eficazmente la energía de la batería para nivelar la carga del grupo electrógeno. Por lo tanto, el factor de potencia y la nivelación de carga son satisfactorios con la ayuda de PWMVSC.

En la investigación llevada a cabo por Singh, Solanki, and Chandra (2006) se presenta un grupo electrógeno que opera con diesel (DG) y un sistema de almacenamiento de energía en batería (BESS) que mejora el rendimiento del conjunto motogenerador cuando se opera a carga completa o casi en condiciones de carga completa (hasta 70-80 % de carga). Cuando se opera en condiciones de carga ligera (carga inferior al 80 %), la batería recibe carga y en condiciones de carga pesada (carga superior al 100 %), la energía de la batería se utiliza para suministrar energía adicional a la carga, proporciona la compensación de potencia reactiva, armónicos y corriente de carga desequilibrada. De la misma manera, se menciona que el funcionamiento del sistema de almacenamiento de energía gestiona la energía y calidad de la misma.

Adicionalmente, en el estudio realizado por Lindstad, Eskeland, and Rialland (2017) se evalúan los pro y los contra de instalar baterías en embarcaciones de apoyo en alta mar, que ayudan en operaciones de suministro de petróleo y gas, en el manejo de anclas y operaciones submarinas. Se evidencia que, la combinación de baterías con motores de combustión reduce la contaminación local y el impacto climático. A su vez, se demuestra un beneficio en el costo actual de la batería y del combustible para las embarcaciones nuevas, pero no para las antiguas. Se reduce del 40 % al 45 % el potencial del calentamiento global anual en las áreas del Ártico y una reducción de alrededor del 20 % en el Mar del Norte (GWP 20). Por lo tanto, se plantea que, la reducción de la contaminación local es independiente del área operativa y tiene una magnitud del 25 % al 30 %.

De igual forma, en el estudio realizado por Zhou, Cámara, and Dakyo (2016) se presentan estrategias coordinadas de gestión de energía para un barco eléctrico híbrido (HEB), basadas en el enfoque de distribución de energía de carga dinámica, utilizando dos generadores que operan con diesel y un sistema de almacenamiento de energía de baterías. Se evidencia que los motogeneradores son la fuente principal de suministro de energía y se les asigna el componente de baja frecuencia y el de alta frecuencia, igualmente, se les asigna a las baterías de litio. Las prestaciones del control se evalúan mediante simulaciones en MATLAB/Simulink y mediante pruebas experimentales a escala. Cuando el componente de baja frecuencia de la carga es alto, cada generador diesel aporta el 50 % del total de las asignaciones de carga del motogenerador y cuando la demanda de carga es baja, se apaga un generador diésel para evitar un funcionamiento ineficiente en condiciones de carga baja. Además, las velocidades de los generadores diesel también se controlan para garantizar buen rendimiento del motor en las simulaciones.

En el estudio realizado por Pavkovic, Sedic, and Guzovic (2016) se comprueba que en los motogeneradores con sistemas de almacenamiento de energía de baterías (BSS) en microredes independientes se reduce el consumo de combustible que, durante 30 días se estudiaron en una plataforma de perforación de petróleo en tierra aislada, caracterizada por perfiles de carga activa y reactiva altamente variables, debido a que son necesarios acoplamientos y desacoplamientos intermitentes de maquinaria eléctrica de alta potencia, como motores top-drive, malacates y bombas de lodo, al evitar el funcionamiento a baja potencia de los generadores individuales y al proporcionar los requisitos de potencia pico (recorte de pico) con un sistema de almacenamiento de energía dedicado, el consumo se puede reducir en aproximadamente un 12%, en comparación con la práctica actual en el campo y las emisiones de dióxido de carbón se reducen.

El análisis también ha mostrado que la inversión retorna entre uno o dos años, del sistema de almacenamiento de energía, dependiendo de la tasa de utilización de la planta de energía.

Igualmente, los costos de inversión y operación/mantenimiento de ESS se han estimado con base en la literatura disponible.

De otra parte, en el estudio realizado por Ehsan and Naznin (2004) el conjunto electrógeno de 1,5 kw con motor de combustión al cual, se le realizaron pequeñas modificaciones y que el encendido es por chispa, se operó con biogás. Es importante hacer referencia a que, el biogás se produjo sintéticamente usando una mezcla de suministro de gas natural y dióxido de carbono. Se operó el motor con mezclas de los dos gases con un contenido de metano del 55 %, 60 %, 65 % y 70 % en volumen, que simulan una variedad de fuentes de biogás. La potencia de salida máxima se redujo en un 20 % con biogás con contenido de metano alrededor del 60 %. El consumo de combustible específico al freno (bsfc) fue alto debido al CO₂ en el biogás, pero las eficiencias máximas generales fueron similares cuando se operó con gasolina. El rendimiento con una capacidad de carga máxima reducida, solo era posible, si el contenido de metano del biogás utilizado era del 60 % o más. Se halló que, es pertinente generar energía eléctrica a pequeña escala con generadores a biogás en empresas agrícolas y avícolas, en zonas rurales en Bangladesh.

1.1 Problema/justificación

Los grupos electrógenos cuando se encuentran en funcionamiento utilizan una determinada cantidad de combustible, la cual es casi constante, independientemente si cuentan con un consumo eléctrico bajo o elevado. Se busca que un sistema de almacenamiento de baterías almacene la energía eléctrica suministrada por el motogenerador con el objetivo de reducir el consumo de combustible.

En Colombia, los hogares que tienen acceso a la red eléctrica aumentaron de 8 millones a 12,1 millones desde el año 2000, lo cual corresponde a casi el 95,8 % de la población. El 4,2 % , es decir, 2 millones de personas, no tiene acceso a la red eléctrica y el 26 % que equivale a medio millón de ellos, utilizan fuentes de energías alternativas. En Choco, Guajira y Boyacá pocos hogares tienen acceso a la red eléctrica y el acceso a la red eléctrica ha aumentado en un 40% y por eso, el uso de fuentes alternativas como, paneles solares, turbinas eólicas y motogeneradores pueden solucionar el problema, así lo manifiestan Mamaghani, Escandon, Najafi, Shirazi, and Rinaldi (2016).

Por otra parte, Bueno y Rodríguez (2019) aseguran que, las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia corresponden al 52 % del área nacional. Aproximadamente, el 5 % de la población colombiana no cuenta con suministro de energía eléctrica. El combustible Diesel se utiliza en las zonas no interconectadas en Colombia, siendo una fuente de energía no renovable. La obtención del mismo, en dichas zonas, se dificulta debido a los incrementos en el precio y a las condiciones geográficas que complican su distribución.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar un motogenerador de 3,5 [kW] operado con gas natural y almacenamiento de energía en baterías AGM

1.2.2 Objetivos específicos

Realizar mediciones de consumo de combustible [m^3] del motogenerador que funciona con velocidad angular constante y cargas eléctricas variables.

Realizar el proceso de carga rápida de dos baterías AGM registrando en intervalos de tiempo mediciones de voltaje [V] y porcentaje de carga [%].

Realizar el proceso de descarga de dos baterías AGM registrando en intervalos de tiempo mediciones de voltaje [V] y porcentaje de carga [%] con cargas eléctricas variables.

1.3 Justificación de la investigación

Esta investigación se realiza con el fin de contribuir a que la totalidad de los hogares colombianos que no tienen acceso a la red eléctrica, puedan acceder al uso de fuentes alternativas de energía, como los motogeneradores que operan con biogás, como el caso del presente estudio.

El uso de motogeneradores puede ayudar a solucionar el problema de todas las zonas no interconectadas de Colombia, puesto que, el biogás es una fuente de energía

renovable. Es importante mencionar que, la obtención del biogás en las zonas geográficas mencionadas, no se dificulta, ya que, es producido en las propias viviendas de dichas zonas.

2. Marco teórico

2.1 Biogás

El biogás es una fuente de energía renovable versátil que se produce por digestión anaeróbica de diferentes sustratos. Se puede utilizar una gran cantidad de desechos orgánicos. Arce, España, Garfias y Vásquez (2017) citaron a Thrän, et al. (2007) quienes estimaron que:

28 estados de la Unión Europea y la sucesión europea de la antigua Unión Soviética podrían producir 250 mil millones de metros cúbicos estándar de biometano en plantas de biogás para 2020. Según Thrän et al. esta cifra se puede duplicar si se suma el biometano procedente de la producción termoquímica de gas natural sintético (p.13).

Según Balat and Balat (2009), el biogás es una forma de energía renovable y podría sustituir (especialmente en el sector rural) fuentes de energía convencionales (combustibles fósiles, petróleo, etc.). Los componentes más importantes del biogás son el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y componentes sulfúricos (H₂S). El gas generalmente se compone de metano (55–65 %), dióxido de carbono (35–45 %), nitrógeno (0–3 %), hidrógeno (0–1 %) y sulfuro de hidrógeno (0–1 %), Nitrógeno (N₂) (0–3 %) Hidrógeno (H₂) (0–1 %) y (O₂) (0–2 %).

2.2 Gas natural de Colombia

El gas natural de acuerdo con Eiti Colombia (2017) se puede definir como:

Una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, que en su mayor parte está compuesta por metano y etano, y en menor proporción, por propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados. Si el contenido de hidrocarburos es más alto

que el metano, se le denomina gas rico; de lo contrario, se conoce como gas seco. Las principales impurezas que puede contener la mezcla son vapor de agua, gas carbónico, Nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y helio, entre otros (Gas Natural Fenosa, 2017, p.1).

El gas natural es una forma de energía que se extrae del subsuelo. Se le agrega un odorizante llamado mercaptano, que le permite ser detectado en cualquier momento. Se distribuye a través de gasoductos de acero y polietileno, materiales altamente resistentes, incluso en zonas sísmicas. De esta forma, se puede consumir en hogares, comercios e industrias. El gas es considerado como el tipo de energía más amigable con el medio ambiente, ya que, no contamina y no es tóxico.

Según Mokhatab, Mak, Valappil, and Wood (2013) el gas natural contribuye a bajas emisiones de gases de efecto invernadero y a la alta eficiencia de conversión en la generación de energía. De acuerdo con Faramawy, Zaki, and Sakr (2016) el gas natural (GN) es una mezcla de hidrocarburos naturalmente gaseosos que se forma bajo la superficie terrestre. Es considerado el combustible fósil más limpio, además de ser una fuente segura de energía cuando se transporta, almacena y se utiliza. En cuanto a su composición, es el metano (CH_4) el que compone en la mayoría, aunque también puede contener (C_2+ hidrocarburos, N_2 , CO_2 , He, H_2S , y gases nobles) según su origen.

De acuerdo con los planteamientos realizados por Economides and Wood (2009), el gas natural es la más limpia y rica en hidrógeno de todas las fuentes de energía de hidrocarburos, tiene una alta eficiencia de conversión de energía para la generación de la misma. Por ello, el gas natural es una opción de combustible fósil, desde una perspectiva de eficiencia y emisiones, como el combustible que se debe operar en generación de energía. Al respecto, Wang and Economides (2013) manifiestan que la producción y distribución de gas natural aumentará. (citado por Eiti Colombia, 2017). Teniendo como base los datos presentes en la Tabla 1 se obtuvo el poder calórico del gas en [kJ/g]:

Tabla 1. Composición típica del gas natural según Eiti Colombia, peso molecular del gasy poder calorífico inferior

Constituyente	Fórmula química	Composición por volumen	Peso atómico g/mol	Peso molecular real g/mol	Poder calorífico Inferior Kcal/Kg.	Poder calorífico Inferior real Kcal/Kg.	Poder calorífico Inferior KJ/g.
METANO	CH ₄	81,86%	16,000	13,098	12052,000	9865,767	41,278
ETANO	C ₂ H ₆	11,61%	30,000	3,483	11089,878	1287,535	5,387
PROPANO	C ₃ H ₈	1,92%	44,000	0,845	11082,000	212,774	0,890
IBUTANO	C ₄ H ₁₀	0,23%	58,000	0,133	11304,984	26,001	0,109
NBUTANO	C ₄ H ₁₀	0,22%	58,000	0,128	11304,984	24,871	0,104
NITROGEN	N ₂	0,90%	28,000	0,252	0,000	0,000	0,000
DIOXIDO DE CARBONO	CO ₂	3,18%	44,000	1,399	0,000	0,000	0,000
Total	N.A.	99,92%	N.A.	19,338	N.A.	11416,949	47,769

Fuente: Eiti Colombia, (2017)

2.3 Motor de Combustión Interna

El motor de combustión interna (CI) es un motor térmico que convierte la energía química que tiene un combustible en energía mecánica, en un eje de salida giratorio. El proceso comienza, convirtiendo la energía química del combustible en energía térmica, mediante la combustión u oxidación con aire dentro del motor que eleva la temperatura y presión de los gases en su interior, por ende, el gas a alta presión se expande contra los mecanismos mecánicos del motor. Es así como, los elementos mecánicos del motor convierten esta expansión en un cigüeñal giratorio, que es la salida del motor. El cigüeñal, a su vez, está conectado a una transmisión o tren de potencia para transmitir la energía mecánica rotatoria para el uso final deseado, así lo expresa Pulkrabek (2013;2014).

2.4 Consumo Especifico de Combustible

De acuerdo con Gudmundsson (2013), el consumo específico de combustible se define como la cantidad de combustible quemado en la unidad de tiempo requerido para producir una potencia dada del motor.

2.5 Motogenerador

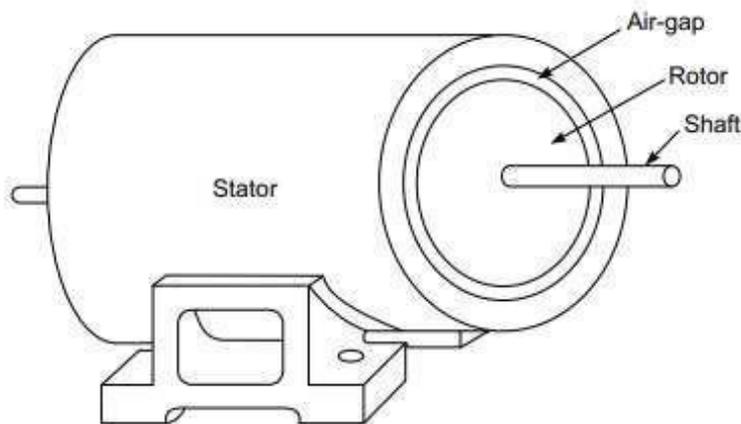
Leuchter, Bauer, Rerucha, and Hajek (2008) mencionan que: un motogenerador (EGS) es una fuente de energía eléctrica que se destina a aplicaciones que necesitan energía

eléctrica móvil. Cummins (2022) agrega que se pueden utilizar combustibles como, gasolina, diesel, gas propano, gas natural o biogás.

2.6 Generador Eléctrico

Las máquinas eléctricas, tales como, generadores o motores, se componen de dos partes: el elemento giratorio cilíndrico llamado rotor y el elemento estacionario anular llamado estator, con el entrehierro intermedio como se ilustra en la figura 2. El rotor está compuesto por un eje axial apoyado sobre cojinetes en cada extremo, los cuales se ubican en cubiertas atornilladas al estator. El eje se extiende fuera de la tapa de un extremo, acoplándose a un motor o turbina, en el caso de un generador o a la carga en el caso de un motor. El estator y el rotor están hechos de material magnético (acero) que conduce el flujo magnético del que depende el proceso de conversión de energía. [201(2014)] A continuación, se muestra un esquema de una máquina eléctrica:

Figura 1. Esquema de la máquina eléctrica



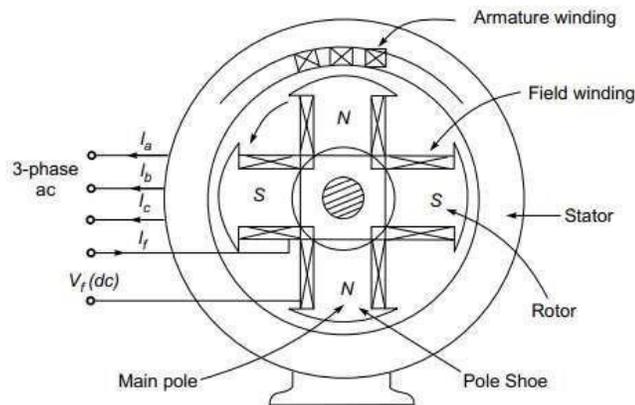
Fuente; 201(2014)

En las máquinas síncronas, el campo principal se crea mediante polos de campo excitados con corriente continua ubicados en el rotor; el devanado de los polos del campo se llama devanado de campo. El movimiento relativo del campo que pasa por un

segundo devanado, ubicado en el estator induce una fem en el estator que, intercambia corriente con el circuito eléctrico externo. El devanado de campo consume una pequeña cantidad de corriente eléctrica. El estator se compone de la armadura que lleva un bobinado trifásico. El número de polos del rotor en una fase, es el mismo en las demás fases., por ello, las tres fases tienen devanados idénticos con el mismo desplazamiento angular entre cualquier par de fases. Cuando el rotor gira, produce una fem alterna en cada fase. Se suman las fem de las fases y se obtiene corriente eléctrica con una frecuencia. Para un número dado de polos, existe una correspondencia fija entre la velocidad del rotor y la frecuencia del estator; por lo tanto, la velocidad del rotor se denomina velocidad síncrona. Cuando se permite que fluyan corrientes en los devanados del inductor, éstas producen un campo giratorio sincrónico con respecto al campo del estator. El campo se excita a partir de corriente de baja potencia. Por consiguiente, estos tipos de máquinas son doblemente excitados.

A continuación, se muestra un esquema de un generador síncrono

Figura 2. Esquema del generador síncrono



Fuente: 201(2014)

Una máquina de inducción se excita individualmente desde la red trifásica en el estator. Por lo tanto, el devanado del estator debe transportar, tanto la corriente de carga, como la corriente de excitación que produce el campo. El devanado del estator es trifásico, similar al devanado del inducido de una máquina síncrona. Cuando se excita, produce un campo que girasincrónicamente (201, 2014).

2.7 EGS

Leuchter, Bauer, Rerucha, and Hajek (2008) afirman que: un grupo electrógeno eléctrico (EGS) es una fuente de potencia eléctrica destinado a cualquier aplicación eléctrica móvil. Actualmente, está siendo utilizado por la industria de la construcción, en la agricultura, para aplicaciones del transporte terrestre y aéreo y para la prestación de servicios médicos. Los EGS se han vuelto bastante indispensables para las fuerzas de defensa, así como equipos de gestión de crisis, aparte de su uso en infraestructura logística e instalaciones de capacitación (basadas en sobre simulación por ordenador y conceptos de realidad virtual) que demandan una fuente confiable de energía. Un EGS clásico se basa en el principio motor- generador con un generador síncrono común excitado electromagnéticamente (SG) que es impulsado a una velocidad constante por cualquiera de los dos motores de gasolina o diesel (DE) para generar una frecuencia eléctrica fija (50,60 Hz) que corresponde a la frecuencia deseada de la tensión de salida.

Agregan que: un grupo electrógeno antiguo es típicamente muy pesado, ruidoso, y tiene una baja eficiencia. Se caracterizan las generaciones posteriores de EGS por DEs modernos en combinación con nuevos tipos de generadores de imanes permanentes (PM) sin escobillas, asíncronos o síncronos que ofrecen una mayor eficiencia. No obstante, siguen siendo del clásico motor-generador del tipo de velocidad constante. (Leuchter et al, 2008).

Por otra parte, Mobarra, Rezkallah, and Ilinca (2022) afirman que, los motogeneradores pueden operar con velocidad fija o velocidad variable. Los que operan con velocidad fija cuando suministran energía eléctrica a unas cargas bajas, tienen una baja eficiencia de combustible y condensación de residuos de combustible en las paredes de los cilindros del motor que aumentan la fricción y el desgaste prematuro y los que operan con velocidad variable que reducen la velocidad a su régimen ideal Según el par mecánico requerido por el generador eléctrico y permiten el funcionamiento a una velocidad optima de acuerdo a la carga eléctrica pero requieren control y equipo eléctrico adicional para mantener la potencia de salida a los estándares eléctricos. Los generadores que operan con velocidad fija pueden usar baterías y detener la velocidad fija en baja carga. Cuando se utiliza este método el motor se reinicia en el momento en que la carga aumenta o el nivel de la batería es crítico.

2.8 Batería

La batería es un dispositivo que se compone de un electroquímico y almacena energía eléctrica por reacciones de oxidación-reducción.

Según Manimekalai, Harikumar, and Raghavan (2013) las baterías contienen un electrodo positivo y un electrodo negativo, al igual que, unas celdas que liberan electrones y otras que reciben electrones que se extraen de la batería. El electrodo negativo contiene las sustancias oxidadas que liberan electrones y el electrodo positivo contiene el oxidante que acepta electrones. Kiehne (2003) establece que la batería posee electrodos positivos y negativos sumergidos en el electrolito, el cual es un aislante electrónico, pero un buen conductor de iones. Los electrodos están separados en el interior, evitando que los electrones fluyan de un electrodo a otro electrodo, pero permiten que los iones positivos y negativos fluyan entre los electrodos. Los electrodos están unidos a cables que conforman el circuito externo y permiten que fluyan los electrones. Los electrones fluyen por una carga del ánodo hasta el cátodo. Durante la descarga, el electrodo positivo es el cátodo y el electrodo negativo es el ánodo, los iones positivos fluyen del ánodo al cátodo en el electrolito y los iones negativos fluyen del cátodo al ánodo por el electrolito. El ánodo acumula carga negativa y el cátodo acumula carga positiva, creando el voltaje de celda. Durante la carga, los electrones fluyen hacia el cátodo, que ahora es el electrodo negativo. El material del electrodo negativo se disuelve en el electrolito y se forma un ion positivo y un electrón en una reacción de oxidación. El electrodo positivo consume electrones porque fluyen los iones positivos en el electrolito en una reacción de reducción. En las baterías recargables las reacciones son reversibles y al descargar las baterías los electrodos vuelven a su estado precargado (Rahn and Wang, 2013).

2.8.1 Tipos de Baterías Recargables

Hu, Zou, Zhang, and Li (2017) afirman que, las baterías recargables son los dispositivos más extendidos de la actualidad. Las tecnologías en baterías incluyen baterías de plomo-ácido, baterías de níquel-metal-hidruro (NiMH), baterías de iones de litio (Li-ion).

Baterías Plomo - Ácido - AGM

Las baterías de plomo - ácido se utilizan en arranque, iluminación e ignición en automóviles. Las baterías AGM son baterías de plomo - ácido que inmovilizan el electrolito, utilizando esteras de fibra de vidrio absorbente. Las baterías de plomo - ácido tienen el electrodo positivo recubierto con óxido de plomo PbO_2 y el electrodo negativo está hecho de plomo Pb . El electrolito es ácido sulfúrico H_2SO_4 diluido con agua H_2O . El ácido sulfúrico se disocia en iones de hidrogeno positivos H^+ e iones negativos HSO_4^- en agua. Las baterías de Pb - ácido se pueden sobrecargar sin consecuencias nefastas, aunque es recomendable no sobrecargarlas. (Rahn and Wang, 2013).

Manimekalai et al. (2013) menciona que las baterías AGM se componen de unas alfombras de vidrio que están intercaladas entre Placas. Estas placas de vidrio absorben electrolito. El Oxígeno de las moléculas de la placa positiva se desplazan a través del electrolito en las esteras de vidrio y luego recombinan el hidrógeno en la placa negativa para formar agua. En estas baterías, el electrodo de plomo de calcio se utiliza para minimizar la gasificación y la perdida de agua. El voltaje y la corriente se deben controlar y deben ser inferiores con respecto a la tasa $C/20$.

Baterías Ni-MH

Las baterías Ni-MH tienen un mayor rendimiento que las Pb -ácido. Su precio es mayor, un buen ciclo de vida, capacidad de recarga rápida, se utilizan en automóviles híbridos, pero se descargan rápido sin una carga. El electrodo positivo contiene hidróxido de níquel y el electrodo negativo está compuesto por aleaciones de níquel que absorben el hidrogeno. La celda tiene un separador eléctricamente aislante que es un electrolito alcalino, por ejemplo, una solución de hidróxido de potasio KOH y una caja metálica ventilada. Las baterías de Ni-MH se pueden sobrecargar sin consecuencias nefastas, aunque es mejor no sobrecargarlas (Rahn and Wang, 2013).

Baterías de Iones de Litio

Las baterías de iones de litio se utilizan en vehículos híbridos porque son livianas. Tienen un ciclo de vida largo de más de 500 ciclos y baja tasa de autodescarga menor a 10 %. El costo es mayor. Las baterías de iones de litio se degradan

irreversiblemente si se sobrecargan (Rahn and Wang, 2013).

2.8.2 Porcentaje de Carga SOC

El porcentaje de carga soc es el porcentaje de carga máximo que una batería recargable tiene (Rahn and Wang, 2013).

2.8.3 Ciclo de Vida

Rahn and Wang (2013) agregan que el ciclo de vida de una batería depende de la química, el ciclo de carga y descarga, la temperatura y, el historial, por ejemplo el almacenamiento y fabricación. Las baterías de iones de litio tienen el ciclo de vida más largo. A 100 % de descarga tiene 300 ciclos. A 20 % y 40 % tiene 20000 ciclos. Las baterías de Ni-MH tienen 500 ciclos a 80 % de descarga. Las baterías de Pb-ácido tienen 200 ciclos a 100 % de descarga. Se puede lograr 1500 ciclos a 25 % de descarga. El ciclo de vida finaliza cuando la batería tiene una caída de 50 % a 80 % de carga dependiendo de la química y la solicitud.

2.8.4 Rango de Temperatura de Operación

Las baterías funcionan mal a una temperatura muy baja o muy alta. A una baja temperatura la difusión de iones se obstaculiza y se producen reacciones como el revestimiento de litio. A altas temperaturas se produce corrosión y gases. El rango operativo de una batería en descarga tiene un límite inferior y en carga tiene un límite superior. En baterías de Pb-ácido es de -40 [°C]- 60[°C]. En baterías de iones de litio es de -20 [°C]-60 [°C]. En baterías de Ni-MH es de -20 [°C]- 45 [°C] (Rahn and Wang, 2013).

2.8.5 Controlador

LokeshReddy, Kumar, Chandra, Babu, and Rajasekar (2017) establecen que, un controlador de carga controla la sobrecarga y descarga de la batería para que mejore la vida útil de la batería. De igual forma, controla la carga de las baterías, encendiendo el motogenerador cuando la carga se encuentre en el 50 % y apagándolo cuando la carga se encuentre en 100 %. El controlador del grupo electrógeno puede tener la función de controlar remotamente a dicho grupo electrógeno. Mejora el mantenimiento y al mismo tiempo asegura el trabajo estable del grupo electrógeno (Shi, Zhao, Chen, Wu, Liu, and Wang, 2020).

2.9 Inversor

Ginar (2019) menciona que, los inversores de potencia son el tren motriz de los accionamientos de potencia, constituyendo una configuración electrónica de potencia con la función básica de generar una corriente alterna (CA) a partir de una fuente de corriente continua (CC). En tanto que, Ashok Kumar, Albert Alexander, and Rajendran (2021) expresan que, el voltaje de entrada y de salida, la frecuencia de salida y el manejo general de la potencia dependen del diseño del dispositivo o circuito específico. El inversor no produce energía; la energía es proporcionada por la fuente de CC. Un inversor de potencia puede ser electrónico o puede combinar efectos mecánicos (como un aparato giratorio) y circuitos electrónicos. Los inversores estáticos no utilizan piezas móviles en el proceso de conversión.

2.10 Rectificador

Los convertidores de energía son componentes necesarios para convertir la energía de CA de la red en algo que pueda usarse para el proceso de almacenamiento de energía y viceversa(Mansour, 2019).

2.11 Carga Eléctrica

Según Blume (2017) los elementos que se conectan al sistema eléctrico son las cargas eléctricas. Se pueden tener tres tipos de cargas que varían según su adelanto o atraso en la relación de voltaje y corriente. Cargas resistivas, inductivas y capacitivas.

Las cargas resistivas son las que se tienen con la fricción y reducción del flujo de corriente si el voltaje permanece constante. Las cargas inductivas tienen una bobina de alambre para producir un campo magnético. Con respecto a las cargas capacitivas, son las que tienen capacitores. Un capacitor tiene dos conductores metálicos separados por un aislante, llamado dieléctrico. Los capacitores permanecen cargados cuando se elimina el voltaje.

2.12 Ecuaciones

Balance de Energía

El balance de energía de un sistema se lleva a cabo a través de la primera ley de la termodinámica.

La primera ley de la termodinámica o principio de la conservación de la energía afirma que el cambio neto (incremento o disminución) en la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso. (Cengel, 2012). Es decir:

(Energía total que entra al sistema) - (Energía total que sale del sistema) = (Cambio en la energía total del sistema)

$$0 \quad (1.1)$$

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sist} \quad (1.2)$$

Figura 3. Banco de resistencias



Cengel (2012) afirma que, esta relación es el balance de energía y se aplica a cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso.

La mezcla de gas natural, aire, gases residuales y EGR que se encuentra atrapada en la cámara de combustión durante las etapas de compresión, combustión y expansión está encerrada por las paredes del cilindro, la superficie interna de la culata, la superficie superior del pistón y las válvulas y conforma las fronteras del sistema (Cengel, 2012).

Romero, Carranza y Henao (2017) agregan que, en este caso únicamente se tendrá en cuenta la mezcla de gas natural y aire. De la primera ley de la termodinámica en un sistema cerrado, se obtiene la descomposición de la energía del sistema como se observa en la ecuación 1.3.

$$\text{Donde: } Q_{ent} - Q_{sal} - W_{sal} = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP \quad (1.3)$$

Q_{ent} : Calor que se suministra al sistema, Q_{sal} : es el calor que disipa al sistema de refrigeración, W_{sal} : es el trabajo producido por el sistema, U es la energía interna, EC es la energía cinética y EP es la energía potencial. W_{ent} es el trabajo que se debe suministrar al sistema que sería igual a 0, la energía cinética EC y la energía potencial EP se desprecian por ser un sistema estacionario. Se reduce la ecuación como se muestra a continuación:

$$Q_{ent} - Q_{sal} - W_{sal} = \Delta U \quad (1.4)$$

Q_{ent} es suministrado por el combustible en la combustión y se reemplaza en la ecuación por Q_{comb} , Q_{sal} es el calor disipado a través de las paredes al refrigerante y se reemplaza en la ecuación por Q_p , $(m_{adm}h_{adm})$ es la energía aportada por la mezcla de aire y combustible en la admisión y $(m_{esc}h_{esc})$ es la energía de los gases de escape. Se observa a continuación la ecuación:

$$\frac{dm_{adm}}{dt} h_{adm} - \frac{dm_{esc}}{dt} h_{esc} = \frac{dQ_{comb}}{dt} - \frac{dQ_p}{dt} - \frac{dW}{dt} \quad (1.5)$$

2.14 Segunda Ley de la Termodinámica

Cengel (2012) define que: “la Segunda ley de la termodinámica establece que un proceso ocurre en dirección cierta, no en cualquiera. Un proceso no ocurre a menos que satisfaga tanto la primera como la Segunda leyes de la termodinámica”.

2.15 Ciclo Otto

El ciclo de Otto es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes de encendido por chispa. En el ciclo Otto el émbolo realiza cuatro tiempos completos (dos ciclos mecánicos) dentro del cilindro, y el cigüeñal que completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico. Los motores de combustión interna pueden ser de dos o de cuatro

tiempos. En las máquinas de dos tiempos, las cuatro etapas se desarrollan en los tiempos de potencia y de compresión. Es importante mencionar que, las máquinas de dos tiempos tienen una menor eficiencia que las de cuatro tiempos, debido a que, los gases de escape se expulsan de manera incompleta y al expulsar los gases de escape, se expulsa una cantidad de mezcla fresca de aire y combustible. Las máquinas de dos tiempos son más sencillas, más económicas, tienen altas relaciones entre potencia y peso, entre potencia y volumen y son adecuadas en aplicaciones que requieren tamaño y peso pequeños como motocicletas, sierras de cadena y podadoras de pasto.

Un motor de dos tiempos tiene más potencia que uno de cuatro tiempos, puesto que, produce potencia en cada revolución de las máquinas.

Figura 4. Esquema del ciclo otto ideal

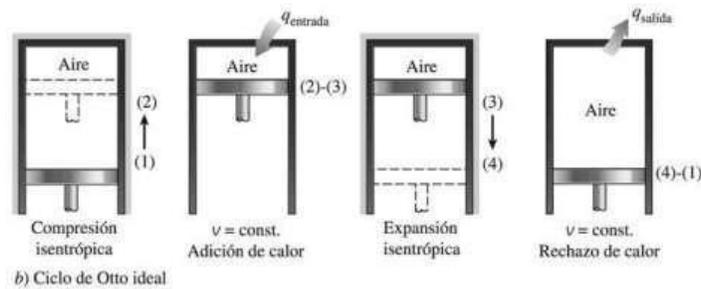
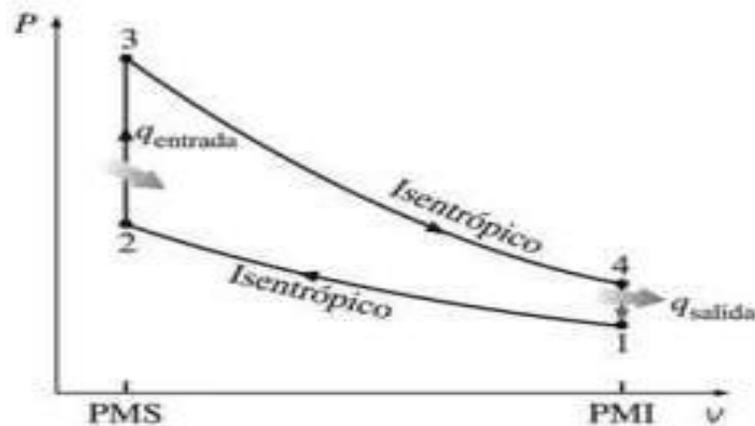


Figura 5. Diagrama P-V del ciclo otto ideal



En cambio, en el de cuatro tiempos, la potencia se produce cuando el pistón se encuentra en la etapa de expansión. Las principales compañías de automóviles estudian los motores de dos tiempos para que aparezcan nuevamente en el futuro. En el análisis termodinámico de los ciclos reales de cuatro y dos tiempos se supone el aire estándar. El ciclo Otto ideal se compone de cuatro procesos reversibles internamente:

1-2 Compresión isentrópica 2-3 Adición de calor a volumen constante 3-4 Expansión isentrópica 4-1 Rechazo de calor a volumen constante.

El ciclo Otto ideal se muestra en un diagrama P-V (ver figura 9). El ciclo Otto ideal se parece un poco a un motor de combustión interna porque consta de dos tiempos en una rotación del cigüeñal.

Figura 6. Esquema de motor real de encendido por chispa de cuatro tiempos

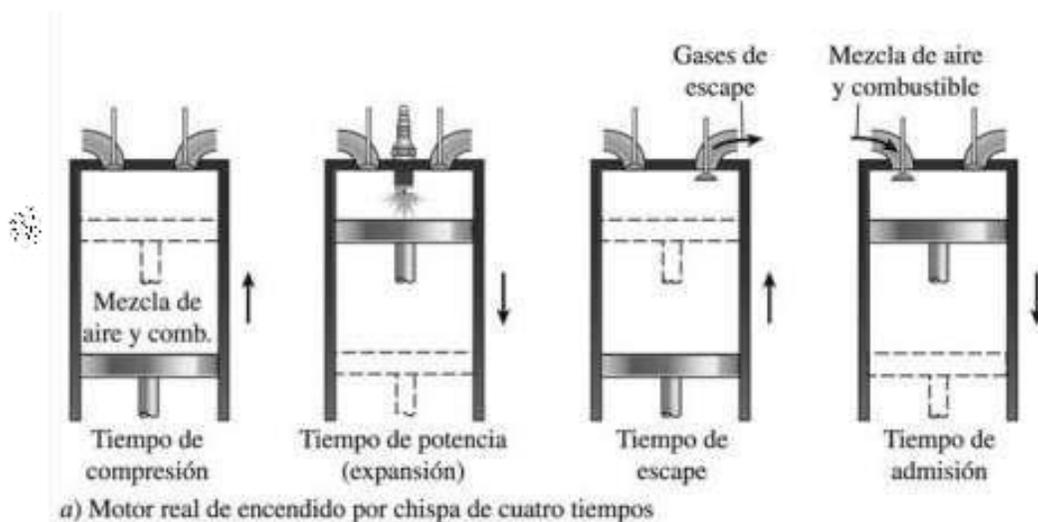


Figura 7. Diagrama P-V del ciclo otto real

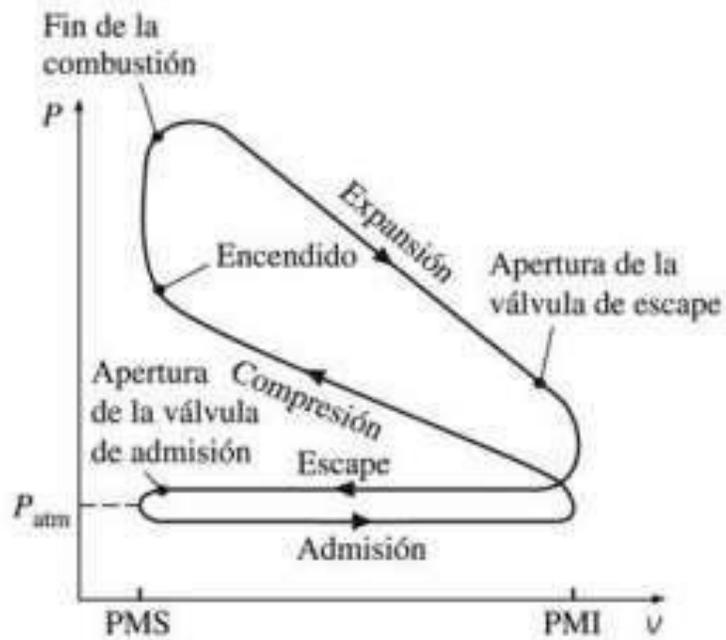
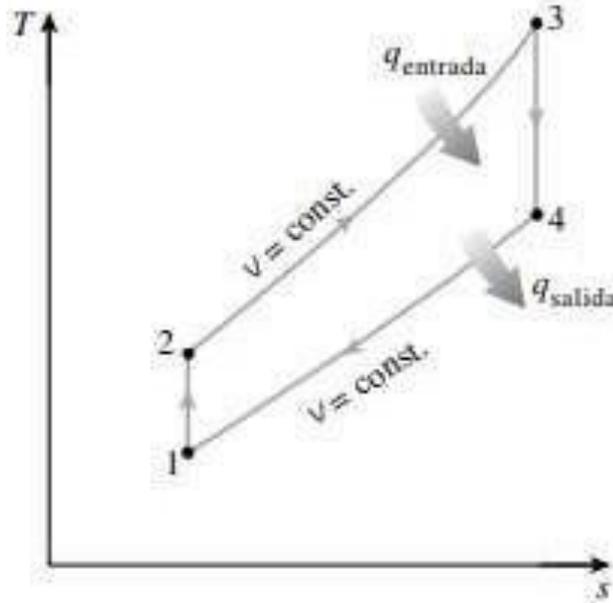
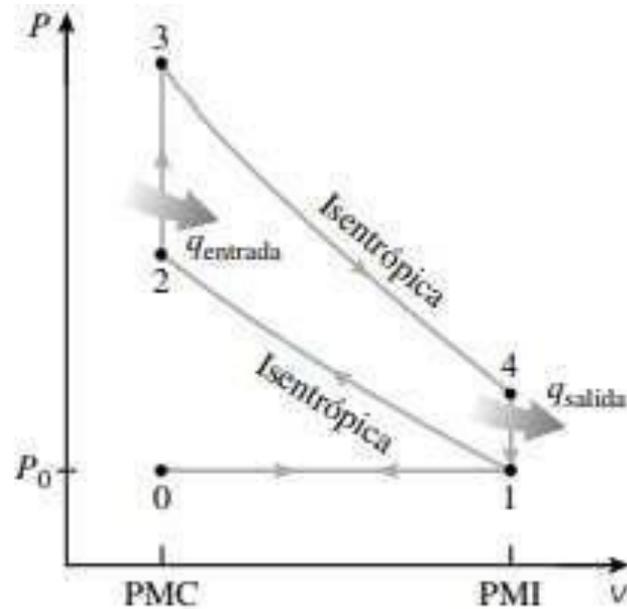


Figura 8. Diagrama T-S del ciclo otto ideal



A continuación, se presenta el diagrama P-V del ciclo otto ideal en la figura 9

Figura 9. Diagrama P-V del ciclo otto ideal

El ciclo de Otto modificado se ejecuta en un sistema abierto durante los procesos de admisión y escape y en un sistema cerrado durante los cuatro procesos restantes. Las interacciones de trabajo durante los procesos de admisión a presión constante, durante el proceso 0'1 y de expulsión a presión constante, durante el proceso 1-0, pueden expresarse de la siguiente manera:

$$W_{Salida,0-1} = P_0(V_1 - V_0) \quad (1.6)$$

$$W_{Entrada,1-0} = P_0(V_1 - V_0) \quad (1.7)$$

En el proceso de admisión y en el proceso de escape no se tiene trabajo. Por lo tanto, no se tiene efecto en la producción neta de trabajo en el ciclo. El ciclo de Otto se ejecuta en un sistema cerrado, y no se tiene en cuenta los cambios en las energías cinética y potencial.

Ecuaciones Motogenerador

Se halla la masa del gas natural a través, de la ecuación de estado de los gases ideales:

$$PV = nRT \quad (1.8)$$

Donde:

P= Presión absoluta [mbar] V= Volumen

[m³]n= Moles del gas

R = Constante universal de los gases ideales $\frac{\text{m}^3 \cdot \text{Pa}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

T= Temperatura absoluta [K]

Se obtiene el peso atómico del gas natural a través, de los pesos atómicos de sus componentes.

La información fue facilitada por Vanti E.S.P. que se presenta en la figura 1.

$$\text{Peso atómico gas} = \text{Peso atómico a} + \text{peso atómico n} \quad (1.9)$$

Se halla a través, del peso atómico y el número de moles la masa del gas.

$$m_{\text{gas}} = \text{Peso atómico} * n \quad (1.10)$$

Con la masa del gas y el volumen del gas se halla la densidad.

$$P_{\text{gas}} = \frac{m_{\text{gas}}}{V_{\text{gas}}} \quad (1.11)$$

Se halla el poder calorífico del gas natural a través, de la composición química que facilita Vanti S.A. E.S.P. que se presenta en la figura.

$$P_{\text{Clgas}} = P_{\text{Cla}} + P_{\text{Cln}} \quad (1.12)$$

Se obtiene la potencia de entrada a través, del poder calorífico y de la masa del gas.

$$P_{\text{ent}} = P_{\text{Clgas}} * m_{\text{gas}} \quad (1.13)$$

Se obtiene la potencia de salida que es la potencia eléctrica que entrega el motogenerador a través, del voltaje y amperaje.

$$P_{sal} = V_{sal} * A_{sal} \quad (1.14)$$

Se hallan las eficiencias del motogenerador cada vez que se enciende una resistencia seenciende, a través, de la potencia de salida y la potencia de entrada.

$$\eta_{mg} = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \quad (1.15)$$

3. Experimentación

3.1 Metodología

3.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es descriptivo – comparativo, porque se **realizó** la descripción y explicación de las tablas, las figuras y los porcentajes del registro de datos medidos: volumen de gas natural consumido [m^3], velocidad angular [RPM], voltaje de salida [V], amperaje de salida [A] y frecuencia de salida [Hz] en el motogenerador con las resistencias conectadas. A su vez, se realizaron mediciones de voltaje [V] y porcentaje de carga [%], en intervalos de tiempo de 10 minutos en los procesos de carga rápida y de descarga de dos baterías AGM con cargas eléctricas variables.

3.1.2 Diseño de investigación

El diseño de la investigación fue de tipo experimental porque se realizaron cambios en las variables durante la caracterización del motogenerador y de las baterías. La variable utilizada fueron las cargas eléctricas y se realizaron mediciones observables según los datos recolectados en las tablas, figuras y porcentajes.

3.1.3 Caracterización Motogenerador

Se realizó la caracterización del motogenerador realizando mediciones de volumen de gas consumido, velocidad angular, voltaje de salida, amperaje de salida y frecuencia de salida con las resistencias. Igualmente, se realizaron cálculos para obtener la eficiencia más alta del motogenerador.

3.1.4. Caracterización Baterías

Se realizó la caracterización de las baterías, sometiéndolas a procesos de carga rápida y lenta y de descarga con cargas resistivas, capacitivas e inductivas. Igualmente, se realizaron mediciones de voltaje, amperaje, porcentaje de carga y resistencia.

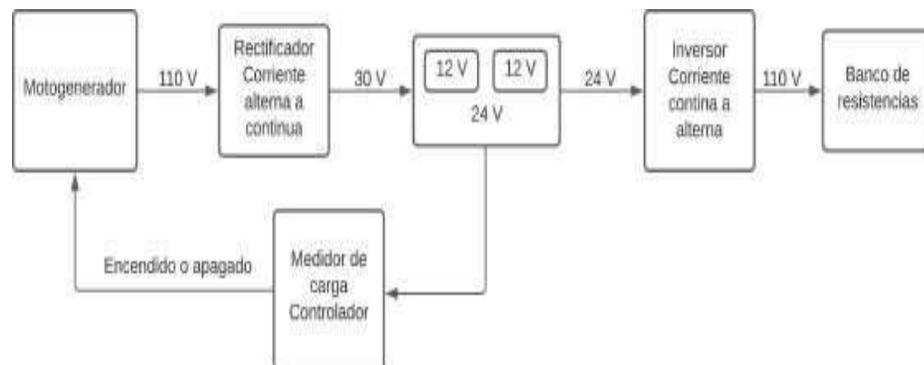
3.1.5. Metodología Montaje Final

El motogenerador se conectará al rectificador de AC a DC con el objetivo de suministrarle a las baterías corriente DC y cargarlas cuando se necesite. Las baterías se conectarán al inversor de DC a AC para suministrarle corriente AC al banco de resistencias. Sin embargo, el controlador se conectará a las baterías para medir el voltaje [V] y el porcentaje de carga % y al motogenerador para encenderlo cuando las baterías tengan un 50 % de carga y apagarlo cuando tengan un 100 % de carga.

El esquema del sistema cuenta con 7 elementos, los cuales serán nombrados a continuación:

1. Motogenerador
2. Transformador de AC a DC
3. Dos baterías AGM de 12V
4. Medidor de carga de baterías
5. Controlador de encendido y apagado del motogenerador
6. Inversor de DC a AC
7. Banco de resistencias

Figura 10. Esquema del sistema



3.1.6 Descripción de Equipos

Motogenerador

El motogenerador entrega una potencia nominal de 3.0 [kW] y una potencia máxima de 3.5 [kW]. Es de la marca Puxin y el modelo es PX3600EBG. Este opera originalmente con biogás.

El motor de combustión interna es un Honda GX390 estacionario de 4 tiempos, que según el fabricante aporta 13 [hp] y posee una cilindrada de 389 cc; el motor es monocilíndrico con un diámetro por carrera de 8864, dimensiones 407x485x449 mm, peso en seco 31.5 kg, potencia neta máxima Según el fabricante de 8.7 kw a 3600 rpm, torque neto máximo Según el fabricante de 26.5 Nm a 2500 rpm. La relación de compresión es de 8:1 con sistema OHV (válvulas a la cabeza), posee un descompresor que facilita su arranque, un eje horizontal con arranque manual, y alerta de aceite que hace detener el equipo, en caso de bajo nivel de aceite. Una fotografía del motogenerador se puede observar en la figura 12. A su vez, el generador tiene una frecuencia de 50 hz, un voltaje de salida de 110 v, una potencia relativa de 3KW y una potencia máxima de 3.5 KW (Co.Ltd, s.f.).

Figura 11. Motogenerador PX3600EBG.



Baterías AGM

Las baterías son de tipo AGM, de 12 [V] y 300 [Ah] de la marca MTEK, como las que se pueden observar en la figura 12. De acuerdo con los datos que facilita el fabricante, se presenta el ciclo de vida de la batería y en la figura 14 se observan características de descarga con corriente y potencia constante.

Figura 12. Baterías AGM MTEK 12[V] y 300 [Ah]



En la figura 13 se presentan las características de la carga de las baterías proporcionada por el fabricante. Se puede observar el porcentaje de carga, corriente y voltaje durante 20 horas. Se muestra, además, la carga de la batería que inicia con un porcentaje de carga inicial de [0 %].

Cada celda recibe un voltaje de 2,30 [V] cuando la batería esté completamente cargada. La temperatura ambiente a la que se realiza la carga es 25 [°C].

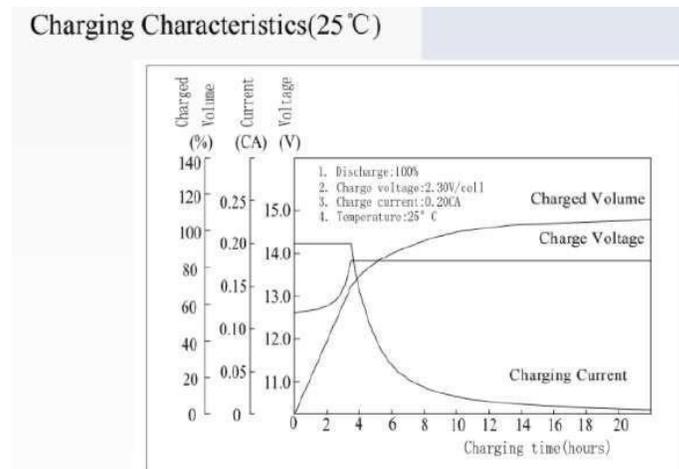
El porcentaje de carga inicia desde 0 % e incrementa considerablemente hasta 70% durante aproximadamente 3,8 horas transcurridas y luego continúa aumentando durante 9,2 horas hasta un porcentaje de carga de 100 % que se estabiliza durante el tiempo restante.

La corriente inicia desde 0,2 [A] y se estabiliza durante un tiempo de 4 horas. Luego decrece considerablemente hasta 0,04 [A] en un período de 7 horas y continúa

decreciendo un poco hasta 0,01 [A] durante el tiempo restante.

El voltaje inicia en 12,7 [V] aproximadamente y aumenta un poco durante 3 horas, luego incrementa considerablemente a 13,8 [V] durante una hora y se estabiliza durante el tiempo restante.

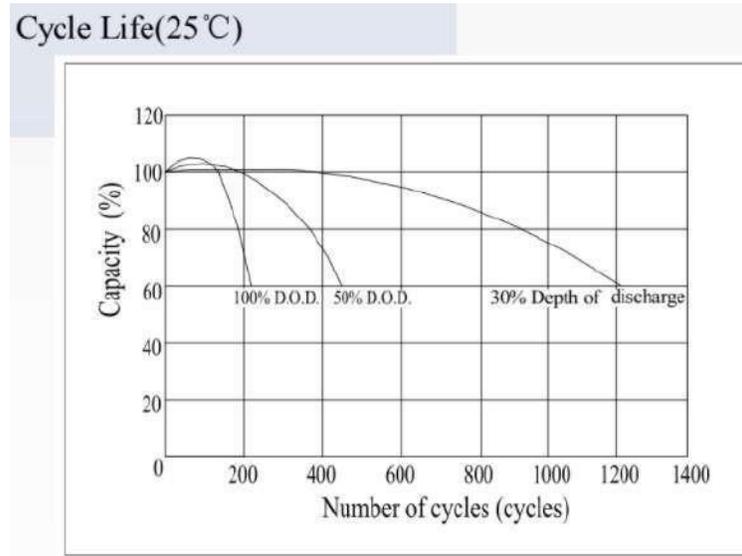
Figura 13. Características de carga de baterías facilitada por el fabricante



En la figura 14 se presenta el ciclo de vida de las baterías proporcionada por el fabricante.

La descarga de la batería se realiza a una temperatura ambiente de 20 [°C]. La descarga que inicia desde un porcentaje de carga de 100% y termina en 0%, muestra un número de ciclos de 210 aproximadamente. En la descarga que inicia desde un porcentaje de carga de 100 % y termina en un porcentaje de carga de 50 %, muestra un número de ciclos de 450 aproximadamente. La descarga que inicia desde un porcentaje de carga de 100 % y termina en un porcentaje de carga de 30 %, evidencia un número de ciclos de 1205 aproximadamente.

En la tabla 2 se muestran las características de descarga a una corriente constante. La tabla fue proporcionada por el fabricante. La descarga se realiza a una temperatura ambiente de 20 [°C]. Al descargar la batería durante un tiempo de 10 minutos, por ejemplo, con una corriente de 601 [A], el voltaje final será de 10,20 [V].

Figura 14. Gráfica de los ciclos de vida de las baterías facilitada por el fabricante

En la siguiente tabla se muestran las características de descarga a una potencia constante. La tabla fue proporcionada por el fabricante. La descarga se realiza a una temperatura ambiente de 25[°C]. Al descargar la batería durante un tiempo de 10 minutos, por ejemplo, con una potencia de 6496 [W], el voltaje final será de 10,20 [A].

Tabla 2. Descarga de las baterías facilitadas por el fabricante

Constant Current Discharge Characteristics (A, 25°C)

F.V/TIME	5min	10min	15min	30min	60min	3h	5h	10h	20h
9.60V	934	632	500	319	196	77.0	55.1	30.6	16.1
10.20V	887	601	479	306	187	76.0	54.2	30.4	16.0
10.80V	834	565	455	292	179	74.4	53.2	30.0	15.8

Constant Power Discharge Characteristics (Watt, 25°C)

F.V/TIME	5min	10min	15min	30min	60min	3h	5h	10h	20h
9.60V	9814	6838	5495	3584	2240	906	650	365	194
10.20V	9323	6496	5274	3442	2150	893	641	361	192
10.80V	8764	6106	5011	3270	2044	875	628	361	190

Banco de resistencias

El banco de resistencias es el consumo eléctrico que se conectará al motogenerador o a las baterías. Este se fabricó en el Laboratorio de Plantas Térmicas y Energías Renovables de la Universidad Nacional de Colombia, en la sede Bogotá D.C. y consta de 8 resistencias. La resistencia eléctrica es de aproximadamente 26 $[\Omega]$ cada una. A continuación, se presenta en la figura 15 el esquema del circuito eléctrico del banco de resistencias. El banco de resistencias está conformado por 8 resistencias dispuestas en paralelo y por cada una circula una corriente de 4,23 [A] aproximadamente. El voltaje que se conecta en el banco es de 110 [V]. Se puede observar en la figura 16 el voltaje de 110 [V], la corriente entre la fuente y las resistencias de 33846 [A], la resistencia de 3,25 [Omega] y la potencia de 3793 [W] aproximadamente del circuito con las 8 resistencias encendidas.

En la figura 17 se puede observar el voltímetro, el amperímetro y los interruptores del panel de control.

Figura 15. Circuito eléctrico del banco de resistencias

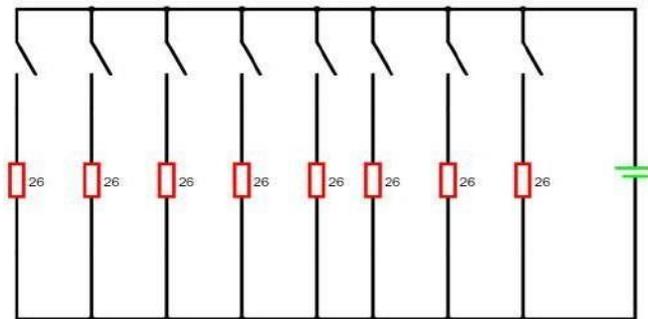


Figura 16. Simulación del banco de resistencias

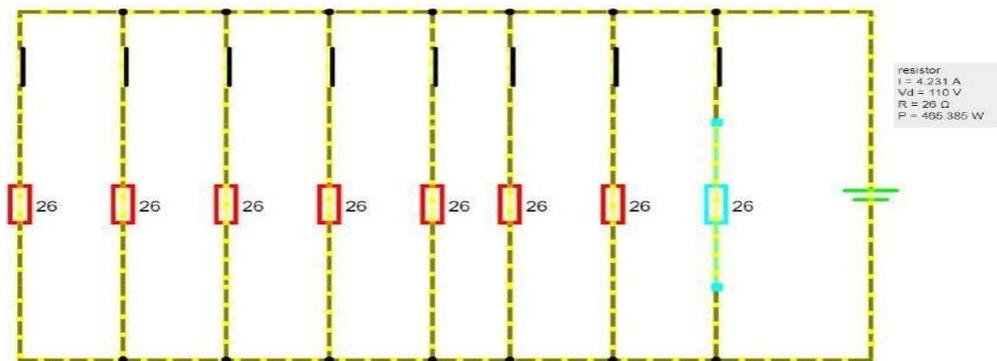


Figura 17. Panel de control del banco de resistencias**Figura 18.** Banco de resistencias en funcionamiento**Reóstato Roosevelt, N.Y.**

Tiene una resistencia mínima de 1,4 [ohm] y un consumo máximo de 18 [A].

Figura 19. Reóstato

Cargador de baterías Schumacher SC1353

Figura 20. Cargador de baterías Schumacher SC1353

Carga baterías y acepta un voltaje de entrada de 120 Vac, una corriente de entrada de 10A o 48 A, un voltaje de salida de 6V o 12V, una corriente de salida en 6V o 12 V de 2A o 40A, un arranque de motor de 200A. Tiene pantalla digital, indicadores LED y botones de control. (Ideamac, 2022a).

Transformador de AC a DC se 3500 XX

Tiene una entrada de voltaje universal de 110Vac o 220Vac, una salida de voltaje de 12V o 15V o 24V, o 30V, o 36V, o 48V, o 60V o 72V dc, una frecuencia de trabajo de 50 Hz o 60 Hz, un rango de voltaje de salida ajustable, control y regulación PWM para asegurar un voltaje de salida estable y preciso, igualmente, un ventilador dual integrado de refrigeración por aire, filtro EMI integrado, prueba de carga completa al 100 %, protección de sobrecorriente, sobretensión, cortocircuito, térmica, ondulación y llanto de salida baja.

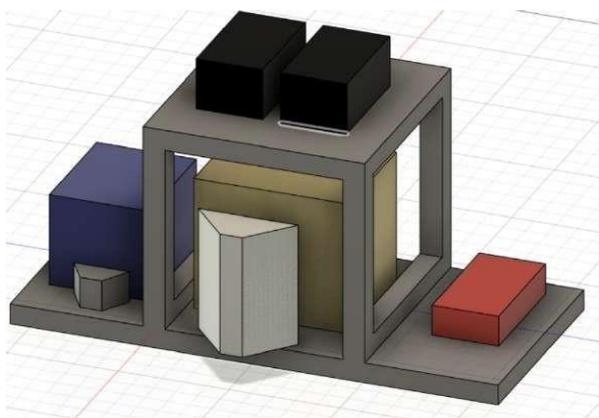
Figura 21. Transformador AC a DC

Ventiladores

Dos ventiladores para refrigerar el motor de combustión y el banco de resistencias.

Figura 22. Ventilador del banco de resistencias**Estructura metálica**

Se propone una estructura similar a la que se puede observar en la figura 23 que soporte el montaje del sistema, donde las figuras de color negro representan las baterías, la de color azul el banco de resistencias, la de color roja el sistema de control, la de color dorado el motogenerador y los dos trapecios representan ventiladores; además, se plantean de dimensiones 2.2X1x1.5 m.

Figura 23. Diagrama de la estructura para el sistema.**Inversor**

En la figura 24 el inversor tiene un rango de voltaje de entrada cc de 10V a 15V, un voltaje de salida de 230V o 110V ac +/-8 %, una potencia de salida de 2000W en 8,7A, una potencia de salida pico de 4000W, una frecuencia de salida de 50 HZ o 60 Hz, una forma de onda de salida sinusoidal modificada, alarma de voltaje de batería baja en 10,5V cc +/-0,5V, apagado por bajo voltaje de batería en 10V, +/-0,5V cc, protección de

cortocircuito de salida, es diseñado con las normas CB, CE, IEC60950, EN61000, 2006/28/E, protección de batería inversa por fusible (Ideamac, 2022b).

Figura 24. Inversor DC a AC



3.1.7 Descripción de equipos de medición

A continuación, se describen los equipos de medición:

Pinza amperimétrica digital ERASMUS EA-330

Mide intensidad de corriente hasta 1000A AC, voltaje hasta 600V AC. A su vez, tiene autorango, TRMS e interface RS 232 (Erasmus, 2022).

Figura 25. Pinza amperimétrica



Pinza amperimétrica digital AC/DC

La pinza amperimétrica de verdadero valor eficaz Fluke 374 tiene un rango hasta 600 V y 600 A, tanto en el modo CA, como en CC. Además, es compatible con la nueva sonda de corriente flexible iFlex (se vende por separado) que aumenta el rango de medida hasta 2.500 A de CA, proporciona una mayor flexibilidad de visualización y un acceso a los cables mejorado (Fluke, 2022).

Figura 26. Pinza amperimétrica AC y DC Fluke**Multímetro digital Protek 506**

Tiene un rango de voltaje 0 a 1000V (0.5 %) de V_{cc} , de voltaje 0 a 750V (1.5 %) de V_{ac} , de corriente de 0 a 20A (1 %) de I_{cc} , de corriente 0 a 20A (1 %) de I_{ac} , de resistencia de 0 a 40 M Ω (1 %), conductividad audible (diodo), temperatura en C°/F°, de frecuencia de 0 a 10 MHz.

Advertencia de mala conexión (20A), pantalla LCD con retroiluminación, Medidas adicionales de capacitancia e inductancia, interfaz de comunicación RS232; sus dimensiones son: 98mm x 155mm x 55mm (viaindustrial.com, 2022).

Figura 27. Multímetro digital**Tacómetro digital de contacto Minipa MDT-2238A**

Mide las RPM por dos sistemas, uno por medio de foto (lugares de difícil acceso o con una rotación superior a 20000 RPM) y otro a través de contacto (mayor comodidad

con adaptadores tipo Funil y tipo Cone), además de la medición de velocidad de superficie en esteras(Compelslr.com, 2022).

Figura 28. Tacómetro Digital MDT



Medidor de gas natural American Meter Company AC-250

Tiene un rango de volumen de 0 a 0,25 a una presión de 10 PSI. (Moragas,2022).

Figura 29. Medidor de gas natural American Meter Company A C-250.



Módulo para toma de datos de National Instruments NI-9225

Tiene un rango amplio de toma de datos en alto voltaje como: potencia, monitoreo de calidad de energía, pruebas de motor, pruebas de anaquel de baterías. Tiene una

entrada de voltaje NI-9225 Serie C con 3 canales, fuentes de información síncronas, frecuencia de muestreo de 50 kS/s por canal, desconexión de canal a canal, sincronizar estimaciones de alto voltaje, programa para USB con el software controlador NI-DAQmx fácil de utilizar, determinación de 24 bits (Apexwaves, 2022).

Figura 30. Módulo National Instruments ni-9225



Indicador de carga de batería

Muestra la capacidad de carga de la batería en %, voltaje y temperatura en un voltaje de 12V o 24V o 36V o 48V o 60V o 72V o 84V (Circuitarte.com, 2022).

Figura 31. Indicador de carga de batería circuitarte



Chasis compact DAQ

Tiene un chasis USB energizado por bus, diseñado para sistemas pequeños y portátiles de medidas de sensor. Se puede combinar con módulos de E/S de la Serie C para poder realizar diversas medidas de E/S analógica, E/S digital y contador/temporizador. Puede incluir múltiples contadores/temporizadores de

uso general de 32 bits a los que puede acceder a través de un módulo digital de la Serie C instalado y temporizado por hardware en aplicaciones que utilizan codificadores de cuadratura, medidas de ancho de pulso (PWM), conteo de eventos, generación de tren de pulsos y medidas de período o frecuencia. Ofrece múltiples motores de temporización, lo cual le permite ejecutar diversas operaciones temporizadas por hardware, con velocidades independientes para entrada analógica.

Figura 32. Chasis Compact DAQ



3.1.8 Técnicas e instrumentos

Toma de Datos

Motogenerador

Se calcula con el consumo de gas natural y el poder calorífico la eficiencia del motogenerador. A continuación, se presentan los pasos realizados:

1. Se enciende el motogenerador y después se espera que alcance la temperatura nominal.

Este proceso tarda aproximadamente 10 minutos.

2. El banco de resistencias eléctricas Se conecta al motogenerador. Solamente se emplean 6 resistencias con una corriente total de 19,3 [A], puesto que, el motogenerador posee un breaker que soporta máximo 23 [A].
3. Se realiza la medición del consumo de gas natural sin ninguna resistencia encendida. El medidor del laboratorio y el externo arrojan un volumen de gas natural

en [m3], el cual es registrado, en primera instancia, por medio del medidor del laboratorio y, después se realizan los mismos pasos con el medidor externo. Al terminar un intervalo de tiempo de 10 minutos, se registra el volumen arrojado por el medidor. La diferencia de los valores del volumen es el consumo de gas natural. Luego, se enciende la primera resistencia y se espera que transcurra un intervalo de tiempo de 1 minuto, con el objetivo de que la resistencia se estabilice. Posterior a ello, se registran los valores del Voltaje [V], de la corriente [A], de la frecuencia [Hz] y de la velocidad angular [ω] con la pinza amperimétrica y el tacómetro y se espera a que transcurra un intervalo de tiempo de 10 minutos. Se registra nuevamente el valor del medidor. La diferencia de las dos lecturas corresponde al consumo de gas natural durante este intervalo de tiempo.

- Se enciende la segunda resistencia y se espera un intervalo de tiempo de 1 minuto para que esta se estabilice. Luego, se registran los datos como se realizó con la primera resistencia. El procedimiento se realiza de la misma manera con la tercera resistencia hasta llegar a la sexta.

Los cálculos realizados serán registrados en una tabla como se puede observar en la figura

Tabla 3. Cálculos de la caracterización del motogenerador

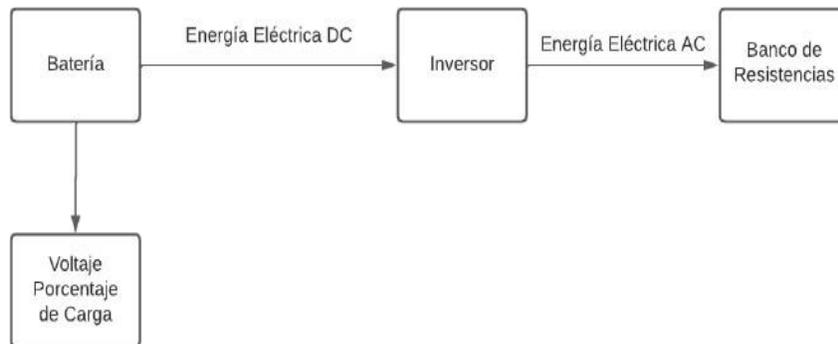
Cálculos Moto generador									
Cantidad Resistencias	Moles Gas Natural	Potencia Eléctrica [W]	Masa Gas Natural [g]	Densidad Gas Natural [$\frac{g}{m^3}$]	Energía Entrada [kJ]	Energía Salida [kJ]	Eficiencia [%]	Consumo Combustible [$\frac{m^3}{h}$]	Consumo Especifico Combustible [$\frac{m^3}{W \cdot h}$]

Los datos obtenidos de los pasos anteriores serán anotados en una tabla como

2. Dos baterías
3. Banco de resistencias

A continuación, se muestra el esquema de la descarga de las baterías con el banco de resistencias:

Figura 34. Esquema de la descarga de las baterías con el banco de resistencia



Caracterización Baterías

Las baterías se sometieron a procesos de rápida y a procesos de descarga. En la carga rápida de 5 horas y 20 minutos. También se realizó la descarga con diferentes cargas como carga resistiva y capacitiva.

Carga Rápida

Las baterías fueron cargadas durante 5 horas y 20 minutos aproximadamente con el cargador de baterías. La carga se realizó a 45 [A] aproximadamente según el cargador. Cuando transcurría un intervalo de 10 minutos, se registró el voltaje [V] y el porcentaje de carga% obtenidos con el cargador de la batería que se estaba cargando.

Los datos se registraron en una tabla como se muestra en la Tabla 5.

4. Resultados

A continuación, se pueden observar los datos obtenidos de las mediciones: Datos del Motogenerador. Los resultados obtenidos para cada uno de los casos de estudio se pueden encontrar en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Tabla de mediciones de la caracterización del motogenerador con el medidor de gas natural dentro del laboratorio

Mediciones Motogenerador							
Cantidad Resistencias	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Lectura 1 [m ³]	Lectura 2 [m ³]	Consumo Combustible [m ³]	Velocidad Angular [rpm]	Frecuencia [Hz]
-	118,100	0,000	23850,500	23850,795	0,295	3120,200	0,000
1	115,200	4,500	23850,850	23851,145	0,295	3073,000	51,900
2	111,600	8,600	23851,300	23851,594	0,294	3042,000	51,300
3	107,400	12,700	23851,650	23851,942	0,292	2994,000	50,200
4	104,400	16,400	23852,000	23852,289	0,289	2962,000	49,300
5	99,600	19,300	23852,375	23852,659	0,284	2875,000	47,900
6	92,500	21,600	23852,726	23852,990	0,264	2620,000	45,500

Tabla 8. Tabla de cálculos del motogenerador en la prueba realizada con el medidor dentro del laboratorio

Cálculos Motogenerador									
Cantidad Resistencias	Numero Moles Gas Natural	Potencia Eléctrica [W]	Masa Gas Natural [g]	Densidad Gas Natural $\left[\frac{g}{m^3}\right]$	Energía Entrada [kJ]	Energía Salida [kJ]	Eficiencia [%]	Consumo Combustible $\left[\frac{m^3}{h}\right]$	Consumo Específico $\left[\frac{m^3}{Wh}\right]$
0	9,27880484	0	179,4298185	608,2366729	8571,0958	0	0	1,77	.
1	9,27880484	518,4	179,4298185	608,2366729	8571,09581	311,04	3,628940885	1,77	0,003414352
2	9,24735137	959,76	178,8213818	608,2366729	8542,04124	575,856	6,743433149	1,764	0,001837959
3	9,18444421	1363,98	177,6053085	608,2366729	8483,92112	818,388	9,64628949	1,752	0,001284476
4	9,09008349	1712,16	175,7803985	608,2366729	8396,76843	1027,296	12,23442099	1,734	0,001012756
5	8,93281361	1922,28	172,7392151	608,2366729	8251,48562	1153,368	13,9776842	1,704	0,000886447
6	8,30374409	1998	160,5744816	608,2366729	7670,40438	1198,8	15,62890221	1,584	0,000792793

Figura 36. Eficiencia vs potencia eléctrica de la caracterización del motogenerador de la prueba realizada con el medidor dentro del laboratorio

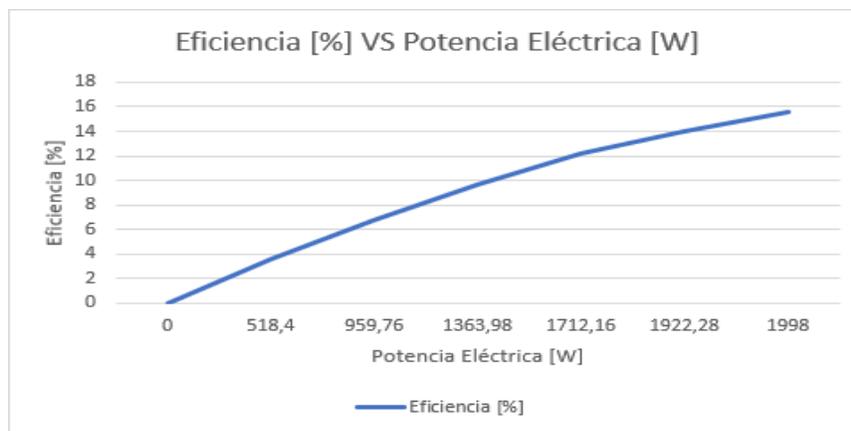


Figura 37. Consumo específico de combustible vs potencia eléctrica de la prueba realizada con el medidor dentro del laboratorio

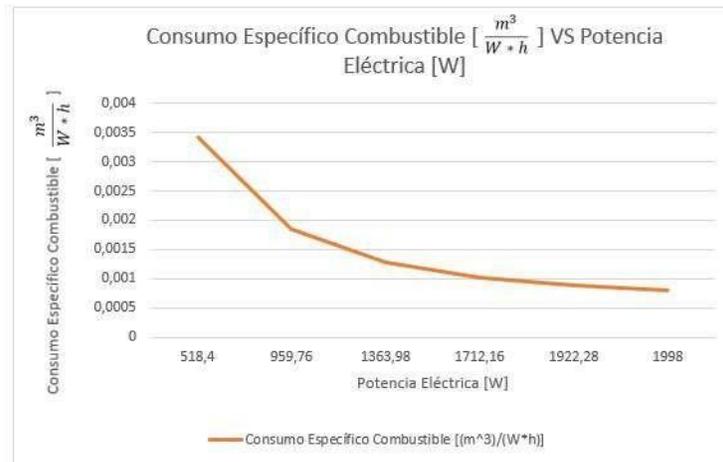


Tabla 9. Mediciones de la caracterización del motogenerador de la prueba realizada con el medidor general de los laboratorios

Mediciones Motogenerador							
Cantidad Resistencia	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Lectura 1 [m ³]	Lectura 2 [m ³]	Consumo Combustible [m ³]	Velocidad Angular [rpm]	Frecuencia [Hz]
-	118,100	0,000	6579,000	6579,108	0,108	3120,200	0,000
1	115,200	4,500	6579,150	6579,250	0,100	3073,000	51,900
2	111,600	8,600	6579,300	6579,411	0,111	3042,000	51,300
3	107,400	12,700	6579,450	6579,547	0,097	2994,000	50,200
4	104,400	16,400	6579,600	6579,712	0,112	2962,000	49,300
5	99,600	19,300	6579,750	6579,849	0,099	2875,000	47,900
6	92,500	21,600	6579,900	6579,994	0,094	2620,000	45,500

Tabla 10. Cálculos de la caracterización del motogenerador de la prueba realizada con el medidor fuera del laboratorio

Cantidad Resistencias	Numero Moles	Potencia Eléctrica [W]	Masa Gas Natural [g]	Densidad Gas Natural [$\frac{g}{m^3}$]	Energía Entrada [kJ]	Energía Salida [kJ]	Eficiencia [%]	Consumo Combustible [$\frac{m^3}{h}$]	Consumo Especifico Combustible [$\frac{m^3}{W \cdot h}$]
0	10,044	0	194,223	1798,365	9277,766	0	0	0,648	-
1	9,300	518,4	179,837	1798,365	8590,524	311,04	3,621	0,6	0,001157407
2	10,323	959,76	199,619	1798,365	9535,482	575,856	6,039	0,666	0,000939235
3	9,021	1363,98	174,441	1798,365	8332,808	818,388	9,821	0,582	0,0004266925
4	10,416	1712,16	201,417	1798,365	9621,387	1027,296	10,677	0,672	0,000392487
5	9,207	1922,28	178,038	1798,365	8504,619	1153,968	13,562	0,594	0,000309008
6	8,742	1998	169,046	1798,365	8075,093	1198,8	14,846	0,564	0,000282282

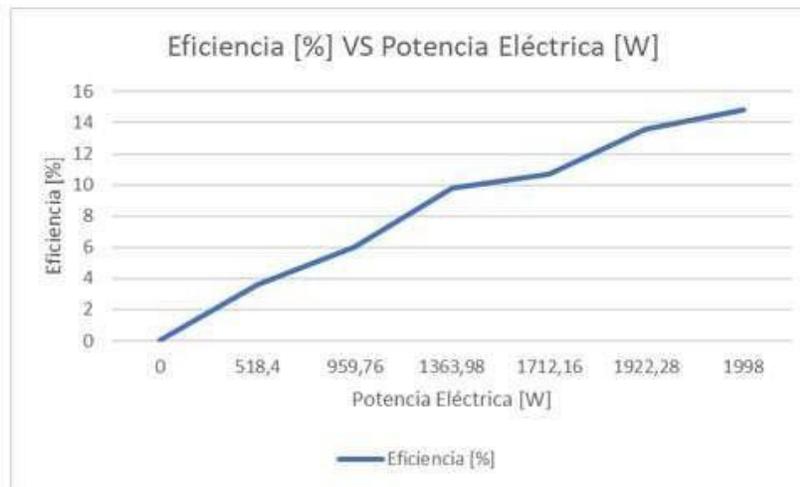
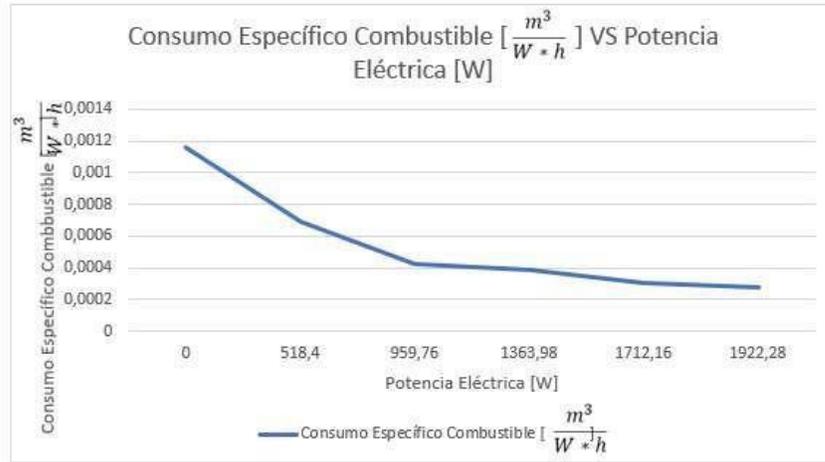
Figura 38. Eficiencia vs potencia eléctrica de la caracterización del motogenerador de la prueba realizada con el medidor fuera del laboratorio

Figura 39. Consumo específico vs potencia eléctrica de la caracterización del motogenerador de la prueba realizada con el medidor fuera del laboratorio

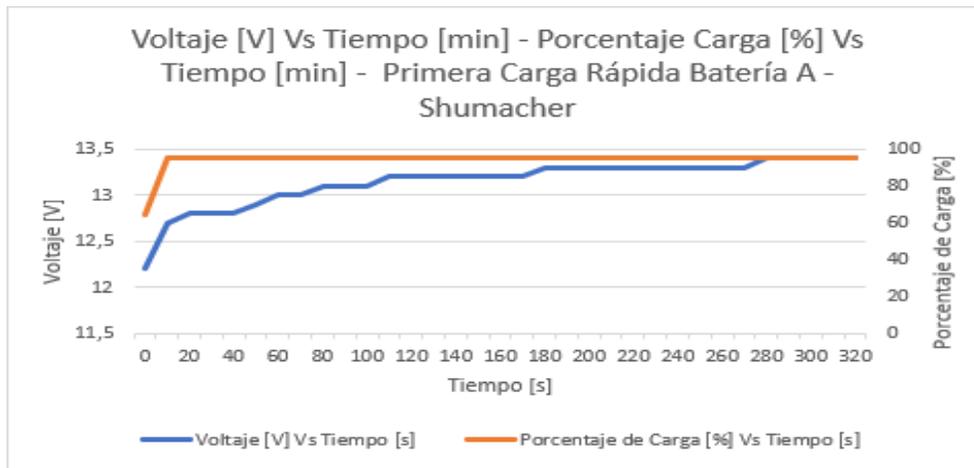


Datos de carga y descarga de las baterías

A continuación, se muestran los datos de la carga y descarga de las baterías:

Tabla 11. Datos de la primera carga rápida de la Batería A

Primera Carga Rápida Batería A					
Tiempo [min]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]	Tiempo [min]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]
0	64	12,2	170	95	13,2
10	95	12,7	180	95	13,3
20	95	12,8	190	95	13,3
30	95	12,8	200	95	13,3
40	95	12,8	210	95	13,3
50	95	12,9	220	95	13,3
60	95	13	230	95	13,3
70	95	13	240	95	13,3
80	95	13,1	250	95	13,3
90	95	13,1	260	95	13,3
100	95	13,1	270	95	13,3
110	95	13,2	280	95	13,4
120	95	13,2	290	95	13,4
130	95	13,2	300	95	13,4
140	95	13,2	310	95	13,4
150	95	13,2	320	95	13,4
160	95	13,2			

Figura 40. Primera carga rápida de la Batería A**Tabla 12.** Datos de la Segunda carga rápida de la Batería A

Segunda Carga Rápida Batería A					
Tiempo [min]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]	Tiempo [min]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]
0	50	12,1	170	95	13,4
10	89	12,7	180	95	13,4
20	93	12,7	190	95	13,4
30	95	12,8	200	95	13,4
40	95	12,9	210	95	13,4
50	95	12,9	220	95	13,4
60	95	13	230	95	13,4
70	95	13	240	95	13,4
80	95	13,1	250	95	13,4
90	95	13,2	260	95	13,4
100	95	13,2	270	95	13,4
110	95	13,3	280	95	13,4
120	95	13,3	290	95	13,5
130	95	13,3	300	95	13,5
140	95	13,3	310	95	13,5
150	95	13,4	320	95	13,5
160	95	13,4			

Figura 41. Segunda carga rápida de la Batería A

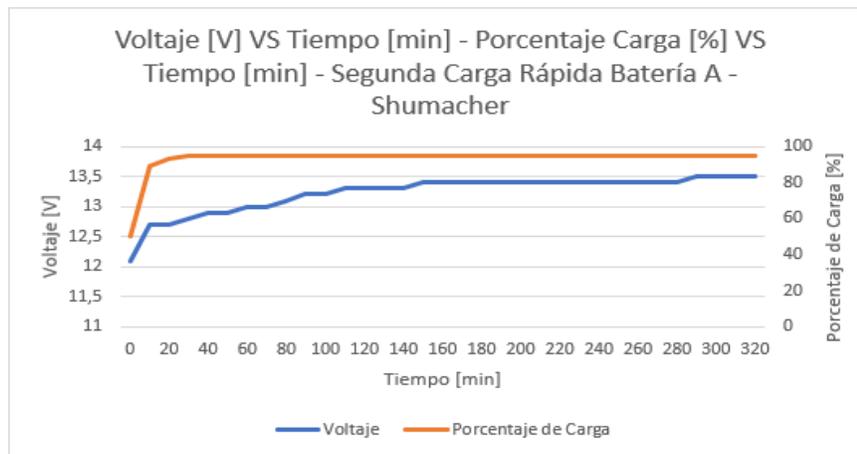
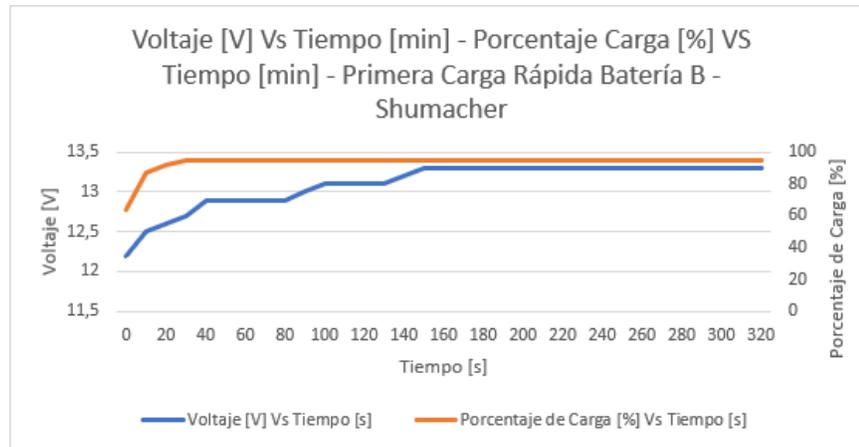


Tabla 13. Datos de la primera carga rápida de la Batería B

Primera Carga Rápida Batería B					
Tiempo [min]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]	Tiempo [min]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]
0	64	12,2	170	95	13,3
10	87	12,5	180	95	13,3
20	92	12,6	190	95	13,3
30	95	12,7	200	95	13,3
40	95	12,9	210	95	13,3
50	95	12,9	220	95	13,3
60	95	12,9	230	95	13,3
70	95	12,9	240	95	13,3
80	95	12,9	250	95	13,3
90	95	13	260	95	13,3
100	95	13,1	270	95	13,3
110	95	13,1	280	95	13,3
120	95	13,1	290	95	13,3
130	95	13,1	300	95	13,3
140	95	13,2	310	95	13,3
150	95	13,3	320	95	13,3
160	95	13,3			

Figura 42. Primera carga rápida de la Batería B**Tabla 14.** Datos de la Segunda carga rápida de la Batería B

Segunda Carga Rápida Batería B					
Tiempo [min]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]	Tiempo [min]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]
0	64	12,2	170	95	13,3
10	92	12,7	180	95	13,3
20	95	12,8	190	95	13,3
30	95	12,8	200	95	13,3
40	95	12,8	210	95	13,3
50	95	13	220	95	13,3
60	95	13	230	95	13,3
70	95	13	240	95	13,4
80	95	13,1	250	95	13,4
90	95	13,1	260	95	13,4
100	95	13,2	270	95	13,4
110	95	13,3	280	95	13,4
120	95	13,3	290	95	13,4
130	95	13,3	300	95	13,4
140	95	13,3	310	95	13,4
150	95	13,3	320	95	13,4
160	95	13,3			

Figura 43. Segunda carga rápida de la Batería B

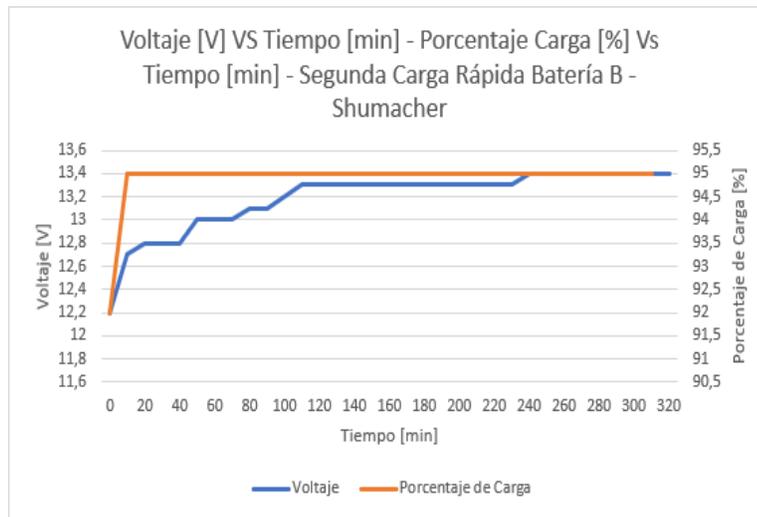
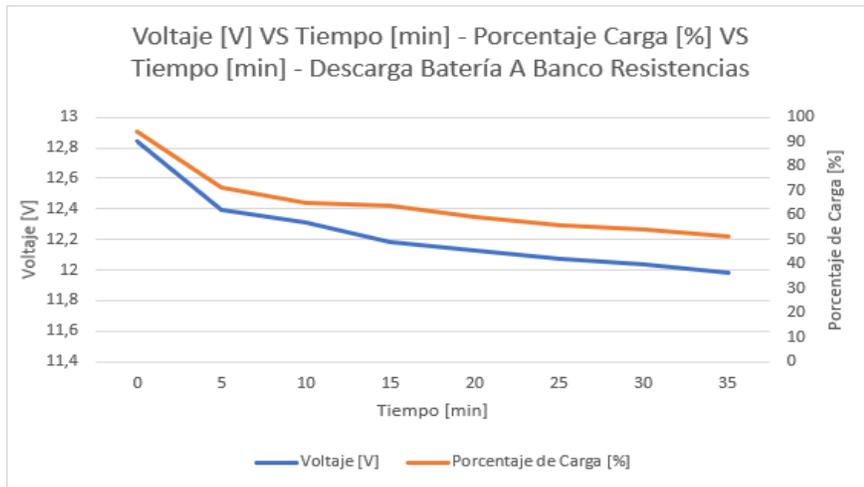


Tabla 15. Datos de la descarga de la Batería A con el banco de resistencias a 10 [A] y 13 [Ω]

Descarga Batería A Banco Resistencias			
Tiempo [min]	Amperaje [A]	Voltaje [V]	Porcentaje Carga [%]
0	10	12,84	94
5	10	12,39	71
10	10	12,31	65
15	10	12,18	64
20	10	12,13	59
25	10	12,07	56
30	10	12,04	54
35	10	11,98	51

Figura 44. Descarga de la batería A con el banco de resistencias a 10 [A] y 13 [Ω]**Tabla 16.** Datos de la descarga de la batería B con el banco de resistencias a 10 [A] y 13 [Ω]

Descarga Batería B Banco Resistencias			
Tiempo [min]	Amperaje [A]	Voltaje [V]	Porcentaje Carga [%]
0	10	13,5	95
10	10	13	73
15	10	12,29	70
20	10	12,26	68
25	10	12,15	62
30	10	12,04	54
35	10	11,96	50

Figura 45. Descarga de la batería B con el banco de resistencias a 10 [A] y 13 [Ω]

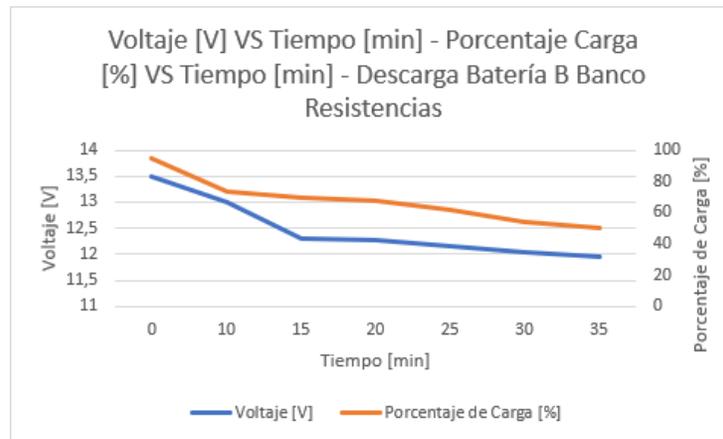
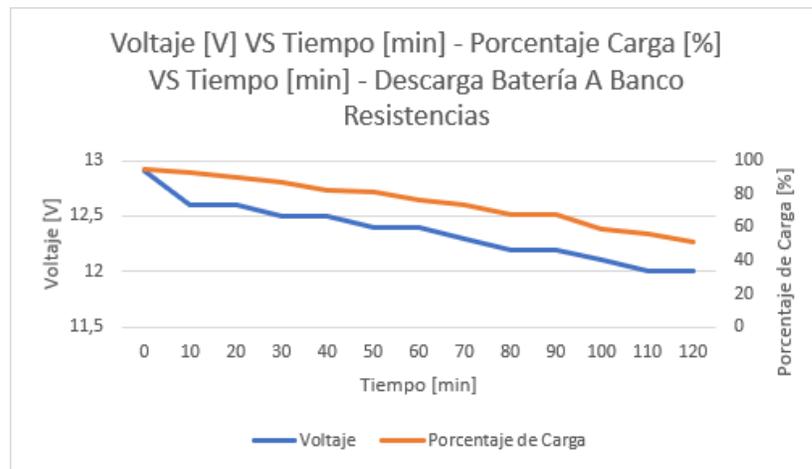


Tabla 17. Datos de la descarga de la Batería A con el banco de resistencias

Descarga Batería A Banco Resistencias		
Tiempo [min]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]
0	95	12,9
10	93	12,6
20	90	12,6
30	87	12,5
40	82	12,5
50	81	12,4
60	76	12,4
70	73	12,3
80	68	12,2
90	68	12,2
100	59	12,1
110	56	12
120	51	12

Figura 46. Descarga de la batería A con el banco de resistencias a 4,4 [A] y 26 [Ω]**Tabla 18.** Datos de la descarga de la batería B con el banco de resistencias a 4,4 [A] y 26 [Ω]

Descarga Batería B Banco Resistencias		
Tiempo [min]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]
0	95	12,9
10	93	12,6
20	89	12,6
30	85	12,5
40	82	12,4
50	78	12,4
60	75	12,3
70	71	12,3
80	68	12,3
90	68	12,2
100	59	12,1
110	56	12
120	50	11,9

Figura 47. Descarga de la batería B con el banco de resistencias a 4,4 [A] y 26 [Ω]

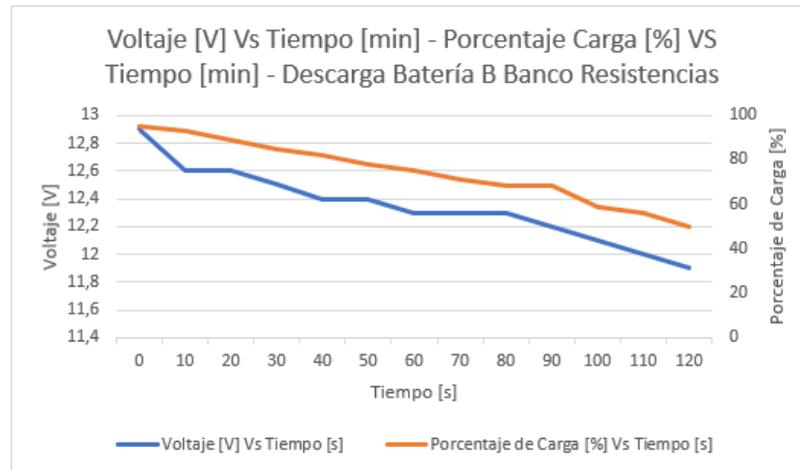
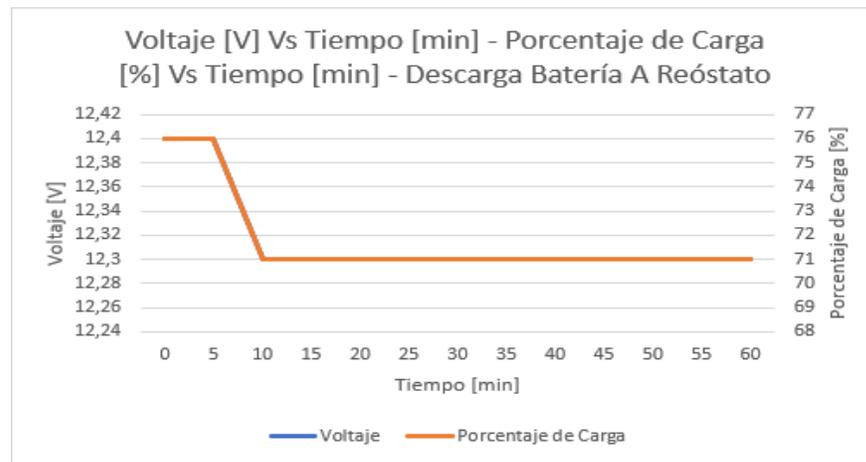


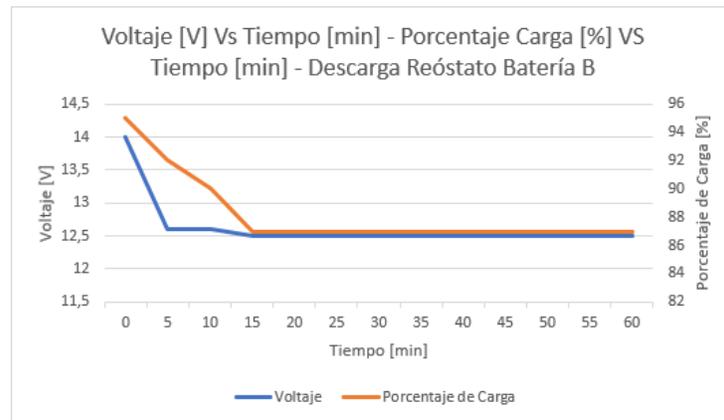
Tabla 19. Datos de la descarga de la batería A con el reóstato durante una hora 16[A] y 1 [Ω]

Descarga Batería A Reóstato Durante Una Hora			
Tiempo [min]	Resistencia [Ω]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]
0	1	76	12,4
5	1	76	12,4
10	1	71	12,3
15	1	71	12,3
20	1	71	12,3
25	1	71	12,3
30	1	71	12,3
35	1	71	12,3
40	1	71	12,3
45	1	71	12,3
50	1	71	12,3
55	1	71	12,3
60	1	71	12,3

Figura 48. Descarga de la batería A con el reóstato durante una hora a 16 [A] y 1 [Ω]**Tabla 20.** Datos de la descarga de la batería B con el reóstato durante una hora a 16 [A] y 1 [Ω]

Descarga Batería B Reóstato Durante Una Hora			
Tiempo [min]	Resistencia [Ω]	Porcentaje Carga [%]	Voltaje [V]
0	1	95	14
5	1	92	12,6
10	1	90	12,6
15	1	87	12,5
20	1	87	12,5
25	1	87	12,5
30	1	87	12,5
35	1	87	12,5
40	1	87	12,5
45	1	87	12,5
50	1	87	12,5
55	1	87	12,5
60	1	87	12,5

Figura 49. Descarga de la batería B con el reóstato durante una hora a 16 [A] y 1 [Ω]



Aplicación de Ecuaciones

5. Análisis

La figura 36, eficiencia VS Potencia eléctrica, utilizando el medidor interno del laboratorio indica que, cuando el motogenerador está encendido y no se está utilizando una carga, la eficiencia es 0. Cuando se utiliza una carga alta, la eficiencia es la más alta de 15,62%, esto significa que la manera más eficiente de utilizar el motogenerador es cercano a su máxima potencia.

La figura 37, de consumo específico de combustible VS potencia eléctrica, indica que cuando el motogenerador está encendido y no se está utilizando una potencia eléctrica, el consumo específico de combustible tiende a infinito porque se divide por 0. Cuando se está utilizando una potencia eléctrica máxima, el consumo específico de combustible es aproximadamente $0,00079 \frac{m^3}{Wh}$.

$$\frac{m^3}{Wh}$$

Eso significa que, el consumo específico de combustible menor se presenta cuando se utiliza una carga cercana a la máxima potencia eléctrica.

La figura 38, eficiencia VS potencia eléctrica, utilizando el medidor general de los laboratorios indica que, cuando el motogenerador está encendido y no se utiliza una carga, la eficiencia es de 0. En tanto que, si se utiliza una carga máxima, la eficiencia es aproximadamente 15 %, lo cual quiere decir que, la máxima eficiencia se obtiene utilizando una carga cercana a la máxima potencia eléctrica.

La figura 39, consumo específico de combustible VS potencia eléctrica, indica que, cuando el motogenerador este encendido y no se utiliza una carga, el consumo específico de combustible tiende a infinito porque se divide por 0. Cuando la carga es máxima, el consumo específico de combustible es aproximadamente $0,00028 \frac{m^3}{Wh}$.

$$\frac{m^3}{Wh}$$

Eso quiere decir que, el consumo específico de combustible menor se presenta cuando se utiliza una carga cercana a la potencia eléctrica máxima.

La figura 40, representa la carga rápida realizada a las baterías e indica que cuando se inicia con un porcentaje de carga de 64 % y un voltaje aproximado de 12 [V] durante 5 horas y 20 minutos, el porcentaje de carga máximo obtenido es de 95 % y el voltaje es de 13,4 [V] aproximadamente. La Gráfica del fabricante indica que se inicia con un porcentaje de carga de 50 % y un voltaje de 12,7 [V] y termina con un porcentaje de carga de 100 % y un voltaje de 13,8 [V] durante 20 horas. Eso significa que a pesar de que, se realizó carga rápida las Gráficas son similares a las del fabricante. Además, hay que decir que la temperatura ambiente de la carga del fabricante es de 25 [°C] y la de la carga realizada en laboratorio es de 15 [°C] aproximadamente, entonces la carga se afecta. Sin embargo, en las cargas realizadas en el laboratorio luego de 10 minutos aproximadamente, se alcanza el porcentaje de carga máximo de 95 %, eso quiere decir que el equipo de medición que se utilizó no tiene buena exactitud. Las cargas se realizaron con un porcentaje de carga inicial de 64 % porque el día anterior se descargaron a 50 % y se autocargaron.

En la misma figura, se muestra que durante el primer proceso de carga rápida de la batería A el voltaje incremento de manera considerable desde 12,2 [V] hasta 13,2[V]. Después, hubo un incremento menor desde 13,2 [V] hasta 13,4 [V] durante un largo periodo de 210 minutos. En cuanto al porcentaje de carga [%] se muestra que aumento desde 64 [%] hasta 95 [%] durante un periodo de tiempo muy corto de 10 minutos y seguidamente se estabilizó en 95 [%] con una larga duración de 310 minutos. La información de la carga proporcionada por el fabricante indica que el proceso se realizó de manera lenta y no es posible compararlo con la carga rápida. Sin embargo, en la gráfica de carga proporcionada por el fabricante se puede apreciar que cuando la batería inicia con un porcentaje de carga de 55 [%] se tiene un voltaje de 12,7 [V] y que a diferencia del proceso realizado en el laboratorio, cuando se inicia con un porcentaje de carga de 64 [%] se tiene un voltaje de 12,2 [V]. A su vez, la información proporcionada por el fabricante indica que la batería termina con un porcentaje de carga de 100 [%] y con un voltaje de 13,8 [V] y en el proceso realizado en el laboratorio se termina con un porcentaje de carga de 95 [%] y con un voltaje de 13,4 [V]. Se debe tener en cuenta que la batería se descargó hasta tener un porcentaje de carga de 50 [%] el día anterior de la

carga, pero al día siguiente la batería tenía un porcentaje de carga de 64 [%] debido a que las baterías tienen un proceso de autocarga. Un aspecto a tener en cuenta es que la temperatura ambiente afecta la carga de las baterías porque cuando se tiene una temperatura ambiente mayor, se acelera la reacción de los reactivos de la batería. Debido a que el fabricante realizó la carga lenta a 25 [°C] y en el laboratorio se realizó a 15 [°C], posiblemente la carga se afectó. También, se puede afirmar que el proceso de carga rápida debió tardar más tiempo para alcanzar un porcentaje de carga de 100 [%]. En la figura 41 se muestra que el segundo proceso de carga de la batería A tardó 5 horas y 20 minutos con el registro de los valores de voltaje [V] y porcentaje de carga [%] en intervalos de tiempo de 10 minutos. Durante los primeros 110 minutos el voltaje aumentó de manera considerable desde 12,2 [V] a 13,3 [V]. Después, hubo un incremento menor desde 13,3 [V] hasta 13,5 [V] durante un largo periodo de 210 minutos. En cuanto al porcentaje de carga [%] muestra que aumentó desde 50 [%] hasta 89 [%] durante un periodo de tiempo muy corto de 10 minutos, siguiendo con un aumento desde 89 [%] hasta 93 [%] también durante un periodo de tiempo corto de 10 minutos, luego aumenta desde 93 [%] hasta 95 [%] durante un periodo muy corto de 10 minutos y después se estabiliza en 95 [%] con una larga duración de 290 minutos.

La información de la carga proporcionada por el fabricante indica que el proceso se realizó de manera lenta y no es posible compararlo con el proceso de la carga rápida. Sin embargo, en la gráfica de carga proporcionada por el fabricante se puede apreciar que cuando la batería inicia con un voltaje de 12,7 [V], se tiene un porcentaje de carga de 55 [%] y que, a diferencia del proceso realizado en el laboratorio, cuando se inicia con un voltaje de 12,1 [V] se tiene un porcentaje de carga de 50 [%]. A su vez, la información proporcionada por el fabricante indica que la batería termina con un porcentaje de carga del 100 [%] y con un voltaje de 13,8 [V] y en el proceso realizado en el laboratorio se termina con un porcentaje de carga de 95 [%] y con un voltaje de 13,5 [V]. Hay que tener en cuenta que la batería se descargó hasta tener un porcentaje de carga de 50 [%] porque la carga se inició una vez se descargó la batería. Un aspecto a tener en cuenta es que la temperatura ambiente afecta la carga de las baterías porque cuando se tiene una temperatura ambiente mayor, se acelera la reacción de los reactivos de la batería. Debido a que el fabricante realizó la carga lenta a 25 [°C] y en el laboratorio se realizó a 15 [°C], posiblemente la carga se afectó. También se puede afirmar que el proceso de carga rápida debió tardar más tiempo para alcanzar un porcentaje de carga de 100 [%].

En la figura 42 se muestra que el primer proceso de carga de la batería B tardó 5 horas y 20 minutos, con el registro de los valores de voltaje [V] y porcentaje de carga [%] en intervalos de tiempo de 10 minutos. Durante los primeros 150 minutos, el voltaje incrementó de manera considerable desde 12,2 [V] hasta 13,3 [V]. Después, se estabilizó en 13,3 [V] durante un largo período de 170 minutos. En cuanto al porcentaje de carga [%] se muestra que aumentó desde 64 [%] hasta 87 [%] durante un periodo de tiempo muy corto de 10 minutos, luego aumentó de 87 [%] hasta 92 [%] durante un periodo de tiempo muy corto de 10 minutos, después incrementó desde 92 [%] hasta 95 [%] durante un periodo de tiempo muy corto de 10 minutos y posteriormente se estabilizó en 95 [%] con una larga duración de 290 minutos. La información de la carga proporcionada por el fabricante indica que el proceso se realizó de manera lenta y, no es posible compararlo con la carga rápida. Sin embargo, en la figura de carga proporcionada por el fabricante se puede apreciar que cuando la batería inicia con un porcentaje de carga de 55 [%] se tiene un voltaje de 12,7 [V] y que, a diferencia del proceso realizado en el laboratorio, cuando se inicia con un porcentaje de carga de 64 [%] se tiene un voltaje de 12,2 [V]. A su vez, la información proporcionada por el fabricante indica que la batería termina con un porcentaje de carga de 100 [%] y con un voltaje de 13,8 [V] y en el proceso realizado en el laboratorio se termina con un porcentaje de carga de 95 [%] y con un voltaje de 13,3 [V]. Hay que tener en cuenta que la batería se descargó hasta tener un porcentaje de carga de 50 [%] el día anterior de la carga, pero al día siguiente, la batería tenía un porcentaje de carga de 64 [%] debido a que las baterías tienen un proceso de autocarga. Un aspecto a tener en cuenta es que la temperatura ambiente afecta la carga de las baterías porque cuando se tiene una temperatura ambiente mayor, se acelera la reacción de los reactivos de la batería. Debido a que el fabricante realizó la carga lenta a 25 [°C] y en el laboratorio se realizó a 15 [°C], posiblemente la carga se afectó. También, se evidencia que el proceso de carga rápida debió tardar más tiempo alcanzar un porcentaje de carga del 100 [%].

En la figura 43 se muestra que el segundo proceso de la carga rápida de la batería B tardó 5 horas y 20 minutos, con el registro de los valores de voltaje [V] y porcentaje de carga [%] en intervalos de tiempo de 10 minutos. Durante los primeros 110 minutos el voltaje aumentó de manera considerable desde 12,2 [V] hasta 13,3 [V]. Después hubo un incremento menor desde 13,3 [V] hasta 13,4 [V] durante un largo periodo de 210 minutos. En cuanto al porcentaje de carga [%] se puede afirmar que aumentó, desde 64 [%]

hasta 92 [%] durante un periodo de tiempo muy corto de 10 minutos, luego incrementó desde 92 [%] hasta 95 [%] durante un periodo muy corto de 10 minutos y después se estabilizó en 95 [%] con una larga duración de 310 minutos. La información de la carga proporcionada por el fabricante indica que el proceso se realizó de manera lenta y no es posible compararlo con la carga rápida. Sin embargo, en la gráfica de carga proporcionada por el fabricante se puede apreciar que cuando la batería inicia con un porcentaje de carga de 55 [%] se tiene un voltaje de 12,7 [V] y que a diferencia del proceso realizado en el laboratorio, cuando se inicia con un porcentaje de carga de 64 [%] se tiene un voltaje de 12,2 [V]. A su vez, la información proporcionada por el fabricante indica que la batería termina con un porcentaje de carga de 100 [%] y con un voltaje de 13,8 [V] y en el proceso realizado en el laboratorio se terminó con un porcentaje de carga de 95 [%] y con un voltaje de 13,4 [V]. Hay que tener en cuenta que la batería se descargó hasta un porcentaje de carga de 50 [%] el día anterior a la carga, pero al día siguiente la batería tenía un porcentaje de carga de 64 [%] debido a que las baterías tienen un proceso de autocarga. Un aspecto a tener en cuenta es que la temperatura ambiente afecta la carga de las baterías, porque a una temperatura mayor, se acelera la reacción de los reactivos de la batería. Debido a que el fabricante llevó a cabo la carga lenta a 25 [°C] y en el laboratorio se realizó a 15 [°C], posiblemente la carga se afectó. Hay que tener en cuenta que el proceso de carga rápida debió tardar más tiempo para alcanzar un porcentaje de carga de 100 [%].

En la figura 46 se muestra que el proceso de descarga de la batería A con el banco de resistencias, con dos resistencias encendidas que consumen un amperaje total de 8,8 [A] y con una resistencia total de 13 [Ω] tardó 35 minutos con el registro de los valores de voltaje [V] y porcentaje de carga [%] en intervalos de 10 minutos. La batería inició con un voltaje de 12,84 [V] y con un porcentaje de carga de 94 [%] y terminó con un voltaje de 11,98 [V] y con un porcentaje de carga de 51 [%].

En la figura 47 se muestra que el proceso de descarga de la batería B con el banco de resistencias, con dos resistencias encendidas que consumen un amperaje total de 8,8 [A] y con una resistencia total de 13 [Ω] tardó 35 minutos. La batería inició con un voltaje de 13,5 [V] y con un porcentaje de carga de 95 [%] y terminó con un voltaje de 11,96 [V] y con un porcentaje de carga de 50 [%].

En la figura 48 se muestra que el proceso de descarga de la batería A con el banco de resistencias, con una resistencia encendida que consume 4,4 [A] y 26 [Ω] tardó 2 horas con el registro de los valores de voltaje [V] y porcentaje de carga [%] en intervalos de 10 minutos.

La descarga de la batería estuvo similar entre algunos intervalos. En los intervalos de 60 minutos a 80 minutos el voltaje bajó considerablemente de 12,4 [V] a 12,2 [V] y con un porcentaje de carga de 76 [%] a 68 [%] y en los intervalos de 90 minutos a 110 minutos bajo de 12,2 [V] a 12 [V] y con un porcentaje de 68 [%] a 56 [%]. La batería inició con un voltaje 12,9 [V] y terminó con 12 [V]. En cuanto al porcentaje de carga se evidencia que inició con un 95 [%] y terminó con un 51 [%].

En la figura 49 se muestra que el proceso de descarga de la batería B con el banco de resistencias con una resistencia encendida que consume 4,4 [A] y una resistencia de 26 [Ω] tardó 2 horas, con el registro de los valores de voltaje [V] y porcentaje de carga [%] en intervalos de 10 minutos.

Igualmente, se registra que durante los primeros 80 minutos el voltaje bajó de 12,9 [V] a 12,3 [V] y con un porcentaje de carga de 95 [%] a 68 [%] y después disminuyó de manera considerable de 12,3 [V] a 11,9 [V] durante 40 minutos y con un porcentaje de carga de 60 [%] a 50 [%]. La descarga inició con un voltaje de 12,9 [V] y terminó con un voltaje de 11,9 [V]. En cuanto al porcentaje de carga se muestra que inició con un 95 [%] y terminó con un 50 [%].

En la figura 50 se muestra que la descarga de la batería A con el reóstato que consume 16

[A] y con una resistencia de 1 [Ω] tardó 1 hora con el registro de los valores de voltaje [V] y porcentaje de carga [%] en intervalos de 10 minutos. Se muestra que el voltaje bajo de manera considerable en el intervalo de 5 minutos a 10 minutos porque bajo de 12,4 [V] a 12,3 [V] y el porcentaje de carga bajo de 76 [%] a 71 [%]. Después el voltaje se estabilizó en 12,3 [V] y el porcentaje de carga se estabilizó en 71 [%]. Se ilustra que el proceso inició con un voltaje de 12,4 [V] y con un porcentaje de carga de 76 [%], terminó con un voltaje de 12,3 [V] y con un porcentaje de carga de 71 [%]. Asimismo, la descarga fue similar a la descarga de la batería B a

diferencia de que esta última inició con un voltaje de 14 [V], posiblemente porque el equipo arrojó un valor que no es acorde con la carga de la batería, debido a que después de los 10 minutos bajó a 12,9 [V].

En la figura 51 se muestra que la descarga de la batería B con el reóstato que consume un amperaje de 16 [A] con una resistencia de 1 [Ω] tardó 1 hora con el registro de los valores de voltaje [V] y porcentaje de carga [%] en intervalos de 10 minutos. Igualmente, que el voltaje bajó de manera considerable [V] durante los primeros 5 minutos porque descendió de 14 [V] a 12,6 [V], con un porcentaje de carga de 95 [%] a 87 [%] y se estabilizó en 12,5 [V] y en 87 [%] en el intervalo de 15 minutos a 60 minutos. Es evidente que, la descarga inició con un voltaje de 14 [V], con un porcentaje de carga de 95 [%], terminó con un voltaje de 12,5 [V] y con un porcentaje de carga de 87 [%]. Igualmente, la descarga es similar a la de la batería A, a diferencia de que la batería B inició con un voltaje de 14 [V], posiblemente porque el equipo arrojó un valor que no es acorde con la descarga, porque a los 10 minutos el voltaje bajó a 12,9 [V].

El fabricante afirma que si se descarga una batería a una temperatura ambiente de 25 [°C] hasta un voltaje de 10,8 [V] y con un consumo de 875 [W] la duración de la descarga será de 3 horas. Sin embargo, en el estudio realizado se descargaron las baterías a una temperatura de 15 [°C] hasta un voltaje de 12 [V] y con un consumo de 484 [W] equivalente a una resistencia eléctrica encendida la duración fue de 2 horas. La descarga de las baterías debió durar más tiempo.

El fabricante afirma que si se descarga una batería a una temperatura ambiente de 25 [°C] hasta un voltaje de 10,8 [V] y con un consumo de 875 [W] la duración de la descarga será de 3 horas. Sin embargo, en el estudio realizado, se descargaron las baterías a una temperatura de 15 [°C] hasta un voltaje de 12 [V] y con un consumo de 968 [W] equivalente a dos resistencias eléctricas encendidas, la duración fue de 35 minutos. La descarga de las baterías debió durar más tiempo.

La descarga realizada sobre la batería A con el banco de resistencias con 2 resistencias encendidas inicia con un porcentaje de carga de 94 % y un voltaje de 12,84 [V], termina con un porcentaje de carga de 51 % y un voltaje de 11,98 % durante 35 minutos.

La descarga realizada sobre la batería B con el banco de resistencias con 2 inicia con un porcentaje de carga de 95 % y un voltaje de 13,5 [V] y termina con un porcentaje de carga de 50% y un voltaje de 11,96 % durante 35 minutos.

La descarga sobre la batería A con el banco de resistencias con una resistencia encendida inicia con un porcentaje de carga de 95 % y un voltaje de 12,9 [V] y termina con un porcentaje de carga de 51 % y un voltaje de 12 [V] durante 120 minutos.

La descarga realizada sobre la batería B con el banco de resistencias con una resistencia encendida inicia con un porcentaje de carga de 95 % y un voltaje de 12,9 [V] y termina con un porcentaje de carga de 50 % y un voltaje de 11,9 [V] durante 120 minutos.

En la descarga realizada sobre la batería A con el reóstato se inicia con un porcentaje de carga de 76 % y un voltaje de 12,4 [V] y termina con un porcentaje de carga de 71 [V] y un voltaje de 12,3 [V] durante una hora. En la descarga realizada sobre la batería B con el reóstato se inicia con un porcentaje de carga de 95 % y un voltaje de 14 [V] y termina con un porcentaje de carga de 87 % y un voltaje de 12,5 [V] durante una hora.

Las viviendas que no cuentan con acceso a la red eléctrica en Colombia pueden obtener energía eléctrica, a través de un motogenerador que opere con biogás. En el presente estudio se caracterizó un conjunto motogenerador mediante un banco de resistencias eléctricas que funcionó como carga variable y el motogenerador se operó a una velocidad angular constante. A su vez, se realizó la carga rápida de dos baterías AGM con el cargador de baterías y se midió voltaje [V] y porcentaje de carga [%]. Se descargaron las baterías conectando cargas eléctricas variables y se midió voltaje [V] y porcentaje de carga [%]. Esta investigación se diseñó para determinar el consumo de gas natural por parte del motogenerador, con cargas eléctricas variables y velocidad angular constante y almacenar la energía eléctrica que no utilizarán en baterías para que las zonas que no cuentan con esta, aprovechen de manera correcta el combustible, que sería biogás, con el fin de no utilizar combustibles de origen fósiles.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Se evidencia que el conjunto motogenerador tiene una variación no considerable en el consumo de combustible, cuando proporciona energía eléctrica a cargas variables y velocidad angular constante. Se demostró que la manera de aprovechar mejor el combustible es que el motogenerador entregue la máxima potencia a las cargas, sin sobrepasar el amperaje indicado, evitando el incremento en costos de combustible y de emisiones de gases de efecto invernadero.

Se demuestra también que el proceso de carga rápida de las baterías no superó el 95 [%] de porcentaje de carga, debido a que el tiempo de duración no fue suficiente. Aunque no se alcanzó un porcentaje de carga de 100 [%], las baterías funcionan de manera óptima para almacenar energía. Las cargas rápidas para las dos baterías arrojaron unos resultados de voltaje [V], porcentaje de carga [%] y tiempo [min] similares.

Finalmente, se indica que en el proceso de descarga de las baterías con el banco de resistencias funcionando con una o dos resistencias, el voltaje [V] y porcentaje de carga [%] se redujo más, comparados con los de la descarga de las baterías con el reóstato, debido a que consumieron una potencia eléctrica mayor por ser corriente alterna, a diferencia del reóstato que consumió una potencia eléctrica menor por ser corriente continua.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda a los operadores del motogenerador que, utilicen el motogenerador a una alta potencia y sin alcanzar la potencia nominal, con el objetivo de no sobrepasar el amperaje máximo indicado de 23 [A].

Se recomienda a futuros estudiantes que realizarán trabajos de investigación con el motogenerador, tener en cuenta que el cargador de baterías proporciona una carga rápida a 40 [A] y el motogenerador cuando se conecten las baterías cargará máximo a 23 [A]. Eso significa que las baterías tardarán más tiempo en cargar.

Se recomienda a futuros estudiantes que realizarán trabajos de investigación con el motogenerador, instalar las baterías con equipos que enciendan automáticamente el motogenerador, en el momento en que las baterías tengan un porcentaje de carga de 50 [%], lo apague en el momento en que tengan un 100 [%].

Se recomienda a futuros estudiantes que realizarán trabajos de investigación con las baterías, descargarlas hasta un porcentaje de carga de 50 [%], con el objetivo de que la vida útil de las baterías no se reduzca considerablemente.

Bibliografía

- Abbey, R., and Geza, J. (2008) *Integrating renewable energy sources and storage into isolated diesel generator supplied electric power systems*. In 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, pages 2178–2183. IEEE, 2008. pages 8
- Amvarworld (2022b)]. Inversores de voltaje. <https://www.amvarworld.com/es/inversores-2000w/614-inversores-de-voltaje-12v-2000w-marca-paco.html>
- Apexwavex. (2022). NI-9225 URL. https://www.apexwaves.com/modular-systems/national-instruments/c-series/NI-9225?gclid=Cj0KCQjw3v6SBhCsARIsACyrRAmxvwTKcWUc881Gi7Uu1GYuk1XbbbPlmA9yMzf5B8QA0Zje8RwtqQaAus2EALw_wcB.
- Arce, O.L., España, V.S., Garfias, I. G. y Vásquez, H. E. (2017). *Generación de energía a partir de biomásas: INNCIBUS*. <https://vinculacion.dgire.unam.mx/vinculacion-1/Memoria-Congreso-2018/trabajos/medio-ambiente-quimica/doc1.pdf>
- Ashok, K., A. and Rajendra, L. (2021) Inverter topologies for solar *Power Electronic Converters for Solar Photovoltaic PV*. Power Electronic Converters for Solar Photovoltaic Systems, pp. 1–39. Academic Press, 2021. ISBN 978-0-12-822730-5. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128227305000015>. p. 18
- Baalberge, F. and Bauer, P. (2008). Power management strategies for generator-set with energy storage for 4q-load. In IEEE *Power Electronics Specialists Conference*, pp 3901–3906. IEEE, 2008.
- Balat, M. and Balat, H. (2009). Biogás as a renewable energy source—a review. *Energy Sources, Part A*, 31(14):1280–1293, 2009. p 11
- Basbous, Y. I., Tammam, B. R., Ilinca, A. and Perron, J. (2012) *A new hybrid pneumatic combustion engine to improve fuel consumption of wind–diesel power system for non-interconnected areas*. *Applied Energy*, 96:459–476, 2012. p. 7
- Blume, S. W. (2017). *System overview, terminology, and basic concepts*. p.18

- Bø, T.I., Vaktskjold, E., Pedersen, E. and Mo, O. (2019) *Model predictive control of marine power plants with gas engines and battery*. IEEE Access, 7:15706–15721, 2019. p. 9
- Bueno, L. M., Rodríguez, S.P., and Molinas, M. (2019)]. Sustainable model for rural electrification projects in non-interconnected areas in Colombia. In 2019 *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, p. 1–6. IEEE.
- Cacua, K, Olmos, V. L., Herrera, B. and Gallego, A. (2016) Experimental evaluation of a diesel-biogás dual fuel engine operated on .micro-trigeneration system for power, drying and cooling. *Applied Thermal Engineering*, 100, pp.762–767.
- Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2012. ISBN 9786071507433. URL <https://books.google.com.co/books?id=z6FbLwEACAAJ>. Circuitarte.com (2022). *Indicador capacidad de carga batería voltaje porcentaje*. <https://www.circuitarte.com/producto/indicador-capacidad-de-carga-bateria-voltaje-porcentaje/>. p. 37
- Compelslr (2022). Tacómetro minipa Mdet-2238. <https://www.compelsrl.com/minipavarios/1882-tacometro-minipa-mdt-2238.html>. p. 36
- Cummins. (2022). Power generators. <https://www.cummins.com/es/generators/power-generators>. p. 13
- Economides, M. and Wood, D. A. (2009). The state of natural gas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1(1-2):1–13, 2009. p. 11. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S187551000900002X>
- Ehsan, M. and Naznin, N. (2004). *Performance of a biogás run petrol engine for small scale power generation*, p. 10. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.493.4131>
- Electric Machines (2014). *Electric Machines*. McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 9780070699670. <https://books.google.com.co/books?id=fR1rNJhBbmcC>
- Eiti Colombia (2017). *Perfiles-gas*. <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/perfiles-hidrocarburos/perfiles-gas/>
- Erasmus.com.co. (2022). *EA-330 Pinza de energía trifásica con software*. <https://www.erasmus.com.co/index.php/es/productos-erasmus/pinzas/pinza-de-energia-trifasica-con-software-detail>. p. 34
- Faramawy, T. Z. and Sakr, A. A. (2016), Natural gas origin, composition, and processing: Areview. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, pp. 34–54. p. 11

- Fluke (2022). *Cómo utilizar el software Fluke Connect™ con las pinzas amperimétricas 377 FC y 378 FC FieldSense™ de Fluke*. <https://www.fluke.com/es-do/producto/comprobacion-eléctrica/pinzas-amperimetricas/fluke-374>. p. 35
- Ginart, A. (2019). *Fault Diagnosis for Robust Inverter Power Drives (Energy Engineering)*. The Institution of Engineering and Technology. ISBN 178561410X,9781785614101. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=2F9DE05B1C4355491BF650265F903210>. p.18
- Gudmundsson, S. (2013). *General aviation aircraft design: Applied Methods and Procedures*. Butterworth-Heinemann, https://books.google.com.co/books/about/General_Aviation_Aircraft_Design.html?id=XtU4HVnWeZIC&redir_esc=y
- Haakon E.L. and Riialand, A. (2017) Batteries in offshore support vessels–pollution, climate impact and economics. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, pp. 409–417. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920916302723>
- Ideamaq (2022 a). *Cargadores de baterías*. <https://ideamaq.com.co/producto/herramienta-automotriz/cargadores-de-baterías/cargador-de-baterías-12v-40a-arrancador-200a-schumacher-sc1353/>
- Johnson, J., Ellis, A., Denda, A., Morino, K., Shinji, T., Ogata, T. and Tadokoro, M. (2013). Pvoutput smoothing using a battery and natural gas engine-generator. In 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 1811–1816.
- Kiehne, H.A. (2003). *Battery Technology Handbook*. Eléctrical engineering and electrónics 60. Marcel Dekker, 2nd ed edition, 2003. ISBN 9780824742492,0-8247-4249-4. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=127e3f685384d1e0e3c12c75ca0e69fc>. p. 16
- Leuchter, J., Bauer, P., Rerucha, V. and Hajek, V. (2008). Dynamic behavior modeling and verification of advanced eléctrica-generator set concept. *IEEE Transactions on Industrial Electrónics*, 56(1), pp.266–279, 2008
- LokeshReddy, M. Pavan, K.P., Manick, C.S., Sudarak, B. T. y Rajasekar, N. (2017) Comparative study on charge controller techniques for solar pv system. *Energy Procedia*, 117, pp.1070–1077. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217324712>

- Magnago, H., Tibola, J. R., Macklini, D. N., Martins, M. and Pinheiro, H. (2019). Control of variable speed ethanol generator set with battery bank. In 2019 IEEE PES *Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*, pp.1–6.
- Mamaghani, A. H., Avella, E. B., Shirazi, A. and Rinaldi, F. (2016) Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia. *Renewable Energy*, 97. Pp.293–305, 2016.
- Manimekalai, P. Harikumar, R. and Raghavan, S. (2013.)An overview of batteries for photovoltaic (pv) systems. *International Journal of Computer Applications*, 82(12), 2013. Pp. 16, 17.
- Mansour, D. E. (2019). 8 - energy storage technologies in mvdc microgrids. In M.M. Eissa, editor, *Medium Voltage Direct Current Grid*, pp. 189–207. Academic Press, 2019. ISBN 978-0-12-814560-9. www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128145609000100. p. 18
- Mobarra, M., Rezkallah, M. y Ilinca, A. (2022). Variable speed diesel generators: Performance and characteristic comparison. *Energies*, 15(2):592, p.16 <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/2/592>
- Mokhatab, S. Mak, J. Y., Valappil, J. and Wood, D. (2013). Handbook of liquefied natural gas. *Gulf Professional Publishing*, p. 11.
- Moragas.mex. (2022). *American Meter AC250 Medidor de gas de baja presión para uso residencial y comercial*. <https://moragas.mx/products/american-meter-ac250-medidor-de-gas>. p. 36.
- Muselli, M. and Notton, A. L. (1999). Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management. *Solar energy*, 65(3), pp. 143–157, 1999. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X9800139X>
- Ni.com. (2022). *Chasis CompactDAQ*. <https://www.ni.com/es-co/shop/hardware/products/compactdaq-chassis.html>. pages 37
- Niwas, S.R. and Singh, B. (2016). Unity power factor operation and load leveling of diesel generator set using battery energy storage system. In 2016 IEEE *Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1–6.
- Pavkovic, D., Sedic, A. and Guzovic, Z (2016). Oil drilling rig diesel power-plant fuel efficiency improvement potentials through rule- based generator scheduling and utilization of battery energy storage system. *Energy conversion and management*, 121, pp.194–211.

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890416303909>
- Pulkrabek, W.W. (2013). Engineering fundamentals of the internal combustion engine. *Pearson Education, 2nd ed., new international ed edition.* p.13. ISBN 1292027290,1269374508,9 78129202729 x6, 9781269374507. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=8D0CF99F54F53A6406E3C526E8443867>
- Puxin Technology Co. (2015). *Biogás Generators Operation Manual.* <http://en.puxintech.com/.p.27>
- Rahn, C.D. and Wang, Ch.Y. (2013). Battery systems engineering. <https://www.wiley.com/en-us/Battery+Systems+Engineering-p-9781119979500>
- Romero, P.C., Carranza, Y, and Henao, E. (2017). *Valoración de la capacidad de cogeneración de una planta eléctrica diesel de 10 kva. Assessment of the cogeneration potential of a 10 kva diesel electric generator set.* p.19. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:6X6qFHlfAmAJ:https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6299880.pdf&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>
- Singh, B., Solanki, J. and Chandra, A. (2006a) Adaline based control of battery energy storage system for diesel generator set. In 2006 IEEE *Power India Conference*, p. 9. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1632546>
- Singh, B., Solanki, J. and Chandra, A. (2006b) A solid state compensator with energy storage for isolated diesel generator set. In 2006 IEEE *International Symposium on Industrial Electronics*, 3, pp. 1774–1778. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Solid-State-Compensator-with-Energy-Storage-for-Singh-Solanki/845900666dc83f2b267ddcb990e9341506f017d2>
- Viaindustrial.com. (2022). Multímetro digital básico autorango protek. <https://www.viaindustrial.com/multimetro-digital-basico-autorango-protek-506-protek/pp/P126008/>. p. 35
- Wang, X. and Economides, M. (2013). Advanced natural gas engineering. *Elsevier*, 2013. p. 11. <https://www.sciencedirect.com/book/9781933762388/advanced-natural-gas-engineering>
- Wellinger, A., Murphy, J.D. and Baxter, D. (2013). *The biogás handbook: science, production and applications.* p. 11. <https://www.elsevier.com/books/the-biogas-handbook/wellinger/978-0-85709-498-8>
- Xiaosong, H. Changfu, Z., Caiping, Z., and Yang, L. (2017). Technological developments in batteries: a survey of principal roles, types, and management

needs. *IEEE Power and Energy Magazine*, 15(5), pp. 20–31, 2017.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8011541>

Yuanqiang, S., Rongyong, Z., Hong, C., Xuekui, W., Qiong, L., and Yan, W. (2020) A new design of generator set controller in cloud service system based iot technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 461: 012067, 04. p.18.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/461/1/012067>

Zhou, Z., Bailo, M., Cámara, and Dakyo, B. Coordinated power control of variable-speed diesel generators and lithium-battery on a hybrid electric boat. (2016) *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(7), pp. 5775–5784