



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA
HÍBRIDO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA A PARTIR DE UN GASIFICADOR DE
BIOMASA Y UN SISTEMA FOTOVOLTAICO**

AUTOR: ESTEBAN JAVIER LASSO VELARDE

**DIRECTOR: ING. PAÚL AYALA
CODIRECTOR: ING. ROBERTO GUTIERREZ**

SANGOLQUÍ, AGOSTO 2015

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL*****CERTIFICADO*****Ing. Paúl Ayala****Ing. Roberto Gutiérrez*****CERTIFICAN***

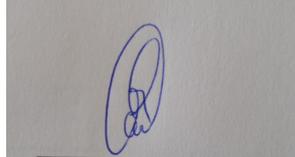
Que el trabajo titulado "Automatización de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica a partir de un gasificador de biomasa y un sistema fotovoltaico", realizado por el señor Esteban Javier Lasso Velarde, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf.). Autoriza a señor Esteban Javier Lasso Velarde que entregue al Ingeniero Luis Orozco en su calidad de Coordinador de la Carrera.

Sangolquí, Agosto de 2015



Ing. Paúl Ayala
DIRECTOR



Ing. Roberto Gutiérrez
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

ESTEBAN JAVIER LASSO VELARDE

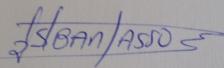
DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado "*Automatización de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica a partir de un gasificador de biomasa y un sistema fotovoltaico*", ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Agosto de 2015



Sr. Esteban Lasso

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

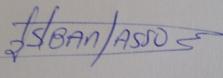
**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

AUTORIZACIÓN

Yo, Esteban Javier Lasso Velarde

Autorizo a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo "*Automatización de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica a partir de un gasificador de biomasa y un sistema fotovoltaico*", cuyo contenido ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Agosto de 2015



Sr. Esteban Lasso

DEDICATORIA

A mis padres.

Carlos por su apoyo incondicional y aliento a lo largo de la carrera, todo el esfuerzo y trabajo realizado se lo dedico a él. Carmen pese a no estar presente físicamente, en mi corazón siempre estuvo presente y se que estaría muy orgullosa del logro que he obtenido.

A mis hermanos.

Mónica, Alejandra y Andrés con los que compartí aquellos momentos de felicidad, alegría, logros y éxitos a lo largo de mis años en la universidad.

A mi enamorada.

Carolina, con quien compartí los momentos más felices y dichosos de la universidad. Su amor, cariño y alegría fueron la inspiración para alcanzar mis logros. Te amo.

Esteban Lasso

AGRADECIMIENTO

A mi director y codirector del proyecto de grado, Ing. Paul Ayala e Ing. Roberto Gutierrez por haberme brindado los conocimientos y ayuda necesaria para poder realizar y culminar con éxito este proyecto.

Al departamento de Eléctrica y Electrónica por haber facilitado y gestionado todo el proceso de graduación.

A la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE por haberme permitido realizar el proyecto de grado e incentivar la investigación dentro de la universidad.

Esteban Lasso

Índice general

CERTIFICADO	I
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	II
AUTORIZACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e Importancia	2
1.3 Alcance del Proyecto	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo General	3
1.4.2 Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO 2	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 Gasificador de Biomasa	5

2.1.1	Biomasa	5
2.1.2	Gasificación	8
2.1.3	Gasificador tipo downdraft	9
2.1.4	Elementos del gasificador	10
2.1.4	Generación de energía eléctrica	12
2.2	Sistema fotovoltaico	15
2.2.1	Principio de funcionamiento	15
2.2.2	Partes de un sistema fotovoltaico	17
2.2.3	Caracterización de la energía eléctrica	19
2.2.4	Arreglos de celdas fotovoltaicas	22
CAPÍTULO 3		23
DISEÑO DE LOS SUBSISTEMAS DE GENERACIÓN DE EN- ERGÍA ELÉCTRICA		23
3.1	Generación a partir del gasificador de biomasa	23
3.1.1	Especificaciones técnicas del gasificador de biomasa	23
3.1.2	Especificaciones técnicas del generador a biogás	24
3.1.3	Generador a gasolina vs Generador a biogás	24
3.1.4	Relación combustible-aire	25
3.1.5	Convertidor de corriente alterna a corriente continua	26
3.2	Generación a partir del sistema fotovoltaico	30
3.2.1	Especificaciones técnicas de cada panel fotovoltaico	30
3.2.2	Diseño del convertidor DC-DC	30
3.2.3	Especificaciones técnicas de las baterías	34
3.2.4	Utilización de paneles fotovoltaicos para cargar banco de baterías	34
CAPÍTULO 4		37
INTEGRACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA HIBRIDO DE ENERGÍA		37

4.1	Acoplamiento de fuentes de alimentación	37
4.2	Diagrama de bloques	38
4.3	Esquema del circuito de control	39
4.4	Automatización del sistema híbrido de generación de energía	40
4.4.1	Medición de tensión	40
4.4.2	Medición de corriente	42
4.4.3	Señal PWM para convertidor DC-DC	44
4.5	Optimización del consumo de energía	45
4.5.1	Modos de operación	46
4.5.2	Diagrama de flujo	47
4.6	Especificación de materiales	47
4.6.1	Selección de Actuador	47
4.6.2	Selección de conductores	49
4.6.3	Selección de protecciones	50
4.7	Construcción tablero eléctrico	52
CAPÍTULO 5		54
ANÁLISIS DE RESULTADOS		54
5.1	Sistema de energía gasificador de biomasa	54
5.1.1	Generador a Gasolina	54
5.1.2	Generador a Biogás	56
5.1.3	Rectificador	59
5.2	Sistema de energía fotovoltaico	63
5.2.1	Panel Fotovoltaico	63
5.2.2	Baterías	65
5.3	Sistema híbrido de generación de energía baja carga . .	67
5.4	Sistema híbrido de generación de energía media carga .	68
5.5	Sistema híbrido de generación de energía plena carga .	69
5.6	Sistema híbrido de generación de energía	70

	IX
CAPÍTULO 6	74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
6.1 Conclusiones	74
6.2 Recomendaciones	75
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXO A	A
PROGRAMACIÓN	A
ANEXO B	B
HOJAS TÉCNICAS - SENSOR ACS712	B
ANEXO C	C
HOJAS TÉCNICAS - BATERÍA CSB	C
ANEXO D	D
HOJAS TÉCNICAS - PANEL FOTOVOLTAICO	D

Índice de Figuras

1.	Esquema básico gasificador tipo downdraft	10
2.	Partes eléctricas de un generador	15
3.	Efecto fotoeléctrico	16
4.	Estructura atómica del silicio dopado con fósforo, semiconductor tipo n	17
5.	Estructura atómica del silicio dopado con boro, semiconductor tipo p	17
6.	Partes de un sistema fotovoltaico	18
7.	Circuito equivalente de una celda fotovoltaico	19
8.	Curva corriente vs tensión de una celda fotovoltaico	20
9.	Efectos de la temperatura y la radiación en un celda fotovoltaico .	21
10.	Celdas fotovoltaicas conectadas en serie.	22
11.	Celdas fotovoltaicas conectadas en paralelo.	22
12.	Circuito eléctrico para determinar potencia del generador	25
13.	Esquema relación aire-combustible	26
14.	Diagrama de bloques de rectificador de onda completa	26
15.	Circuito eléctrico rectificador de onda completa	27
16.	Relación de transformación	28
17.	Convertidor buck	31
18.	Circuito equivalente convertidor buck en $t=0$	31
19.	Circuito equivalente convertidor buck en $t=\Delta t$	31
20.	Descarga batería a una corriente constante	35
21.	Conexión en paralelo de fuentes de alimentación	37
22.	Circuito equivalente fuentes en paralelo	38

23.	Diagrama bloques sistema híbrido generación de energía	39
24.	Esquema del circuito de control del sistema híbrido de generación de energía	40
25.	Esquema de medición de tensión	41
26.	Diagrama de flujo	48
27.	Contactador de 3 polos y excitación de bobina 110Vac	49
28.	Características conductores	50
29.	Tablero eléctrico del sistema	52
30.	Montaje fusible, disyuntor y contactor sistema gasificador	53
31.	Interconexión de S. Fotovoltaico y S. Gasificador	53
32.	Cargas resistivas 35W	53
33.	Corriente generador a gasolina	55
34.	Tensión generador a gasolina	56
35.	Distribución normal de la tensión del generador utilizando gasolina	57
36.	Corriente generador a biogás	58
37.	Tensión generador a biogás	59
38.	Distribución normal de la tensión del generador utilizando biogás	60
39.	Corriente de entrada del rectificador	60
40.	Corriente de salida del rectificador	63
41.	Tensión del rectificador	64
42.	Distribución normal de la tensión del rectificador	65
43.	Corriente arreglo de paneles fotovoltaicos	67
44.	Tensión arreglo de paneles fotovoltaicos	68
45.	Distribución normal de la tensión del arreglo de paneles fotovoltaicos	69
46.	Corriente del banco de baterías	70
47.	Tensión del banco de baterías	71
48.	Distribución normal de la tensión del banco de baterías	72
49.	Comportamiento sistemas individuales y sistema híbrido de energía	73
50.	Distribución normal de la tensión del sistema híbrido de generación de energía	73

Índice de Cuadros

1.	Poder calorífico de biomasa	6
2.	Tipos de biomasa	7
3.	Especificaciones técnicas del gasificador de biomasa	23
4.	Especificaciones técnicas del generador a biogás	24
5.	Especificaciones técnicas panel fotovoltaico	30
6.	Especificaciones técnicas batería	34
7.	Características fuentes de alimentación del sistema	38
8.	Características sensor de corriente del Sistema Fotovoltaico	42
9.	Características sensor de corriente del Gasificador	43
10.	Capacidad de generación cada sistema	47
11.	Características contactor S. Gasificador y S. Fotovoltaico	49
12.	Selección del calibre conductores	50
13.	Mediciones de corriente y tensión del generador a gasolina	54
14.	Mediciones de corriente y tensión del generador a biogás	57
15.	Corriente de entrada del rectificador	61
16.	Mediciones de corriente y tensión del rectificador	62
17.	Eficiencia del rectificador	66
18.	Mediciones de corriente y tensión del arreglo de paneles fotovoltaicos.	66
19.	Mediciones de corriente y tensión del banco de baterías	67
20.	Mediciones de corriente y tensión del sistema híbrido de generación de energía	68
21.	Mediciones de corriente y tensión del sistema híbrido de generación de energía	69

22. Mediciones de corriente y tensión del sistema híbrido de generación de energía	72
---	----

RESUMEN

Se diseñó e implementó un sistema híbrido de generación de energía a partir de un gasificador de biomasa y paneles fotovoltaicos pertenecientes al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de Las Fuerzas Armadas - ESPE, con la finalidad de generación de energía en sitios donde no exista este servicio y como investigación del uso y generación de energías renovables. Por medio de los paneles fotovoltaicos se realizó un controlador de carga para un banco de baterías mediante un convertidor DC-DC (convertidor Buck). El banco de baterías será utilizado posteriormente como fuente de energía para alimentar cargas resistivas. El sistema se diseñó para alimentar a cierta cantidad de carga y durante un tiempo establecido. Se realizó la generación de energía del sistema gasificador de biomasa, utilizando el biogás obtenido del proceso de gasificación como combustible en un generador de combustión interna. Se realizó un convertidor de corriente alterna a corriente continua, rectificador, para realizar el acoplamiento de las fuentes de alimentación en corriente continua entre el sistema gasificador de biomasa y sistema fotovoltaico. Se realizó la optimización del sistema de generación de energía en base al consumo de energía de la carga simulada. Se utilizó un microcontrolador para la implementación del control de optimización del sistema y se utilizó un display LCD para desplegar información de generación de los sistemas gasificador y fotovoltaico y del consumo de la carga. La implementación del proyecto se realizó en los laboratorios del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Palabras Claves:

GASIFICADOR DE BIOMASA

GENERADOR

SISTEMA FOTOVOLTAICO

RECTIFICADOR

CONVERTIDOR BUCK

ABSTRACT

This project was designed and implemented a hybrid power generation system with a biomass gasifier and photovoltaic panels, which belong to Department of Energy and Mechanic Sciences at Universidad de Las Fuerzas Armadas - ESPE. The purpose is to generate electricity in places where there isnt this service and for researching of renewable energy generation. The photovoltaic panels charges the battery bank by using a DC-DC converter (Buck converter). The battery bank will be used as an energy source of power to resistive loads. The system was designed to supply a certain amount of charge and for a set time. The biomass gasifier system power generation was performed using biogas which is obtained from gasification process as fuel in a internal combustion generator. An AC to DC converter was designed for conditioning power supplies between the biomass gasifier system and photovoltaic system. The power generation system was Optimized, it was based on the power consumption of a simulated load. A microcontroller was used to control the optimization system and an LCD display was used to display information of generation and consumption of the load. The implementation of the project was sited in the laboratories of Department of Energy and Mechanic Sciences.

Keywords:

BIOMASS GASIFIER

GENERATOR

PHOTOVOLTAIC CELLS

RECTIFIER

BUCK CONVERTER

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La contaminación ambiental en el mundo a causa de la obtención de fuentes de energía en base a combustibles fósiles, y al ser un recurso natural no renovable plantea la necesidad de búsqueda de energía que produzca en menor impacto con el medio ambiente y que pueda sustituir los combustibles fósiles.

El departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica cuenta con un gasificador de biomasa y un sistema fotovoltaico como resultado de proyectos de grado que sirven como herramientas de estudio y como base en investigación y/o desarrollo de nuevos proyectos en el ámbito de las energías renovables.

El gasificador de biomasa produce un gas "pobre", el cual se puede aprovechar como combustible para producir calor a través de la quema del mismo y energía mecánica y eléctrica por medio de un motor de combustión interna y un motor generador respectivamente.

El sistema fotovoltaico convierte la energía solar en energía eléctrica y la almacena en baterías para lograr un uso continuo tanto en el día como en la noche, este tipo de fuente no satisface por completo el consumo energético; por lo que pese a ser una aplicación efectiva, la potencia que genera el sistema fotovoltaico no es suficiente para reemplazar la generación de energía tradicional.

Por lo tanto la necesidad de obtener energía eléctrica renovable, da la iniciativa para obtener un sistema híbrido de energía; donde se pueda aprovechar

la producción de energía de ambos sistemas y así suplir satisfactoriamente un determinado consumo de energía eléctrica en lugares donde no se cuente con este servicio básico para el vivir de las personas de comunidades ecuatorianas.

1.2 Justificación e Importancia

El proyecto se plantea como solución a los problemas de contaminación ambiental a causa de combustibles fósiles, búsqueda y aplicación de fuentes de energías alternativas y renovables; proveyendo un sistema híbrido de generación de energía alternativo, renovable y que tenga bajo impacto ambiental y eficiencia energética.

El proyecto tiene su línea base en el Régimen del buen vivir de la Constitución del Ecuador en el artículo 143, donde indica que "El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua."

El proyecto servirá como demostración para la aplicación en comunidades que carecen del servicio básico de energía eléctrica, lo cual brindaría beneficios tanto económicos como sociales en el país.

Por lo que el desarrollo del proyecto tiene relevancia en el cuidado del medio ambiente, la inclusión de comunidades y la generación de energía alternativa y renovable.

1.3 Alcance del Proyecto

Se realizará la automatización y optimización del sistema híbrido de generación de energía eléctrica en base al consumo eléctrico. Se tomará en cuenta que la carga es netamente resistiva y se medirá la potencia que consume la misma, para determinar los parámetros de funcionamiento óptimo del sistema. Para lograr el

objetivo el proyecto se dividirá en 3 etapas:

En la primera etapa se realizará la generación de energía eléctrica a través de un gasificador de biomasa, por medio del control de la relación aire/combustible en el motor de combustión interna. Además se implementará el sistema fotovoltaico para cargar un banco de baterías y utilizar su energía almacenada.

En la segunda etapa, una vez que cada subsistema tenga su generación de energía eléctrica, se deberá acoplar las fuentes para que puedan operar conjuntamente en función del consumo y de los medios primarios que producen energía como son la fuente solar y su banco de baterías y el gasificador.

Finalmente se integrarán los dos subsistemas para obtener un sistema de generación híbrido de energía eléctrica compuesto por el gasificador de biomasa y el sistema fotovoltaico. Se realizará la automatización de la selección de las fuentes de tensión para aportar mayor o menor potencia al sistema híbrido simulando el consumo que genere la carga, desplegando información de variables tanto de generación como de consumo.

El proyecto será implementado en un micro-controlador.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Automatizar un sistema híbrido de generación de energía eléctrica a partir de un gasificador de biomasa y un sistema fotovoltaico.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico y pruebas de funcionamiento de las partes del sistema híbrido de generación de energía eléctrica.
- Implementar el sistema de generación de energía eléctrica de un sistema de gasificador de biomasa por medio un generador de combustión interna.

- Implementar el sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica.
- Diseñar e integrar el sistema híbrido de generación de energía eléctrica.
- Automatizar la selección de las fuentes de tensión y optimizar el sistema híbrido de generación de energía eléctrica en base al consumo que genere la carga.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Gasificador de Biomasa

2.1.1 Biomasa

2.1.1.1 Definición

La biomasa es un recurso natural y renovable que se obtiene de la materia orgánica proveniente de árboles, plantas, desechos de animales, residuos de la agricultura y aserraderos. La biomasa es la fuente de energía más antigua conocida y utilizada por el hombre, por ejemplo mediante la combustión directa de biomasa para tener un fuente de calor y de cocción de alimentos[1].

En la actualidad la biomasa se utiliza principalmente para:

- Calefacción,
- Cocción de alimentos,
- Producción de vapor y,
- Generación de electricidad.

2.1.1.2 Características de la Biomasa

La biomasa es una fuente renovable de energía ya que la misma almacenada se debe a un proceso de transformación de energía solar a energía química, llamado

fotosíntesis. De esta manera se obtienen compuestos orgánicos que son utilizados por animales y los seres humanos.

La biomasa contiene un bajo porcentaje de carbono y alto porcentaje en oxígeno y compuestos volátiles que almacenan el mayor potencial energético de la biomasa. El poder calorífico indica la cantidad de energía almacenada en la biomasa, en promedio se tiene que el poder calorífico de la biomasa es 3500 Kcal/kg a 4000 Kcal/kg [1].

En el cuadro 1 se indican los valores promedios del poder calorífico de diferentes tipos de biomasa:

Cuadro 1: Poder calorífico de biomasa

Tipo de Biomasa	Poder calorífico bruto (MJ/kg)	Poder calorífico bruto (Kcal/kg)
Madera		
Astilla de madera	20,89	4989,6
Corteza de pino	20,95	5003,9
Desechos industriales de madera	19,00	4538,2
Subproductos agrícolas		
Paja de trigo	18,94	4523,8
Caña	18,06	4313,6
Cascara de coco	18,60	4442,6
Olote de maíz	17,72	4232,4
Paga de arroz	15,61	3728,4
Cascarilla de arroz	15,58	3721,3
Aserrín	19,34	4619,4

Fuente: [1]

El porcentaje de humedad de la biomasa influye para el tipo de aprovechamiento que se le dé a la biomasa, ya que afecta su poder calorífico. De esta manera la biomasa denominada "seca" con un porcentaje de humedad menor al 30 %, es útil para procesos de conversión de la energía almacenada en la biomasa en energía térmica y eléctrica mediante procesos termo químicos donde se obtiene combustibles líquidos o gaseosos (gases pobres)[1], por ejemplo:

- La combustión

- La pirólisis
- Gasificación
- Licuefacción

2.1.1.3 Fuentes y Tipos de biomasa

En el cuadro 2 se resume las fuentes y tipos de biomasa:

Cuadro 2: Tipos de biomasa

Recursos de biomasa	Tipo de residuo
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas. Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas. Restos de plantaciones: ramas, cortezas, raíces.
Residuos agropecuarios	Cascara y pulpa de frutas y vegetales. Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café) Estiércol Residuos de cosechas: tallos y hojas, cascaras, maleza, pastura
Residuos industriales	Pulpa y cascara de frutas y vegetales Residuos de procesamiento de carnes Aguas de lavado y pre cocido de carnes y vegetales Grasas y aceites vegetales
Residuos urbanos	Aguas negras Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales) Basura orgánica (madera)

Fuente:[1]

2.1.1.4 Ventajas Biomasa

- En el proceso de obtención de energía, la biomasa libera su energía almacenada y devuelve al ambiente la misma cantidad de CO₂ que consumió durante su crecimiento, considerándose un ciclo de CO₂ neutro sin afectar al medio ambiente[2, 1].

- Mínimas emisiones de compuestos de nitrógeno y azufre.
- Impulsa el desarrollo de zonas rurales, y promueve la reforestación de áreas deforestadas para el cultivo con destino a uso de biomasa.
- Establece un tratamiento adecuado de residuos forestales.
- En el caso de los bosques, al almacenar los residuos de las talas de arboles ayuda a que en caso de incendios se limite la propagación del mismo.
- Produce menos ceniza que la de carbón mineral y puede usarse como insumo orgánico, para prevenir la erosión en los suelos.

2.1.2 Gasificación

Para poder realizar la conversión de la energía almacenada en la biomasa, es necesario pasar por procesos termo químicos, que producen un producto de mayor poder calorífico y de más alto valor. Así se puede obtener un combustible en forma de gas que se utilizará para generar calor y/o electricidad. Un proceso termo químico muy utilizado es la gasificación.[1]

El objetivo de la gasificación es producir un gas "pobre" similar al gas natural, mediante la quema de biomasa en presencia de oxígeno de manera controlada. Este proceso se realiza en un recipiente cerrado para limitar y reducir el nivel de oxígeno, para tener una cantidad de oxígeno menor a la que requeriría una combustión completa, es decir, una combustión parcial[3].

El proceso de gasificación se realiza a temperaturas de 600°C. El proceso de gasificación se divide en tres etapas que se detallan a continuación:

Previo a estas tres etapas del proceso de gasificación existe una adicional que acondiciona la biomasa para el proceso. En esta etapa se realiza el secado de biomasa y se elimina restos y las sustancias no deseadas.

1. Pirólisis: Es la degradación térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno y otros agentes gasificantes, a elevadas temperaturas, produciendo varios

gases llamados gases de síntesis, líquidos como alquitranes se utilizan para motores de combustión interna, vapores condensables, aceites y residuo carbonoso. Las temperaturas se encuentran entre 200 y 500 °C, obteniendo una mezcla de líquidos, gases y carbón vegetal [4].

2. Combustión: La combustión se realiza por medio de reacciones exotérmicas entre un agente oxidante como es el oxígeno y el gas rico en carbono, formando gases a elevadas temperaturas los cuales pueden ser utilizados en calderos [4].
3. Gasificación: En este proceso ocurren reacciones endotérmicas donde se generan los gases de monóxido de carbono e hidrógeno. Consiste en la quema de biomasa en presencia de oxígeno, en forma controlada, de manera de elaborar un gas combustible llamado “gas pobre” por su bajo contenido calórico. La gasificación ocurre en un recipiente cerrado llamado gasógeno, en el cual se inserta el combustible y una cantidad de aire menor a la que se requería para su combustión completa [5].

Posteriormente a las tres etapas del proceso de gasificación existen etapas complementarias en el proceso para brindar una mejor utilización del gas producido en sistemas de generación de energía eléctrica, las cuales se detallan a continuación:

- Eliminación del alquitrán que se genera en el gasificador.
- Limpieza de impurezas: Compuestos alcalinos, de nitrógeno, carbono o azufre.

2.1.3 Gasificador tipo downdraft

En esta configuración de gasificador, la biomasa se introduce desde la parte superior del gasificador, donde atraviesa por un aumento progresivo de temperatura y el gas que se produce se extrae desde la parte inferior del gasificador. El proceso de gasificación se describe en la figura 1:

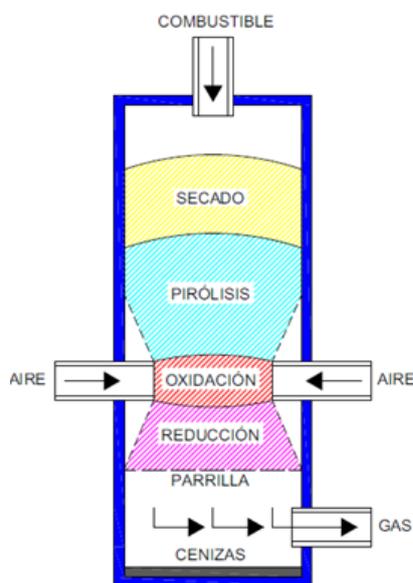


Figura 1: Esquema básico gasificador tipo downdraft

1. La biomasa ingresa en la parte superior donde realiza los proceso de secado y pirólisis.
2. La oxidación o combustión se produce en la parte intermedia del gasificador.
3. La reducción o gasificación se produce en la parte baja del gasificador, donde el gas se expulsa en la parte inferior del gasificador.

Al tener este tipo de configuración se reducen los alquitranes generados durante el proceso de gasificación, generando un gas bajo en alquitrán. En contraste, este tipo de gasificador es de menor eficiencia, pero apropiados para sistemas de generación de baja potencia.

2.1.4 Elementos del gasificador

Los elementos de un gasificador, se consideran al conjunto de partes, elementos organizados y relacionados que interactúan entre sí para lograr un objetivo, el sistema de gasificación está integrado de un grupo de elementos cuya función es la producción de un gas de bajo poder calórico, indispensable para poner en marcha un motor de combustión interna.

El sistema de gasificación está formado ciertos elementos, cada uno de estos son indispensables en el procesos para que garanticen que el resultado sea el deseado.

2.1.4.1 Reactor

Es el encargado de la parte energética para realizar la descomposición térmica de la biomasa de forma auto térmica, mediante la alimentación de los quemadores con fracción de gas producido, teniendo en cuenta las pérdidas de energía ocasionadas por la eficiencia de los mismos. La cantidad de energía necesaria para el calentamiento es igual al cociente entre el productos del flujo de gas desviado para el calentamiento es igual al producto del flujo de gas desviado para el calentamiento por el poder calorífico del gas entre la eficiencia del quemador [6].

2.1.4.1 Alimentación

En los gasificadores el alimentador cumple la función de almacenar y transportas la biomasa, hacia el interior del reactor. Para modificaciones en el diseño o funcionamiento hay que tomar en cuenta, el tipo de biomasa, tasa de alimentación y máximo tamaño de grano. La alimentación es llevada a cabo con un dispositivo, de un sistema de tornillo sin-fin, por su facilidad de operación y mantenimiento. Es aquel encargado para mover el material ubicado en el cuerpo estable, es movido a lo largo de la longitud del cuerpo por medio de la rotación del tornillo [6].

2.1.4.1 Enfriamiento

Es el encargado de adaptar el gas obtenido para aplicaciones del mismo. Al reducir la temperatura obtenemos una condensación de productos no deseados en el gas, como son el caso del agua y alquitranes en caso de existir [7].

2.1.4.1 Intercambiador de calor

Debido a la creciente escasez de agua, tanto para el consumo como para la industria, se ha optado por utilizar más equipos de intercambiador de calor enfriados por aire.

Es sabido que en un intercambiador de calor cuando el fluido externo es un gas (aire, gas natural, gases de combustión, etc.) Se tiene bajos coeficientes de convección. Esto implica que debe utilizar superficies extendidas para compensar este bajo coeficiente.

Este dispositivo cumple la función de reducir la temperatura del gas obtenido del proceso, donde se establece el flujo de gas seco. El cual está compuesto por flujo de gas producido más flujo de gas arrastrante[8].

2.1.4 Generación de energía eléctrica

Una vez que se dispone de un combustible, un gas pobre por medio del gasificador, el siguiente paso hacia la obtención de energía eléctrica es típicamente la utilización de un generador de corriente alterna llamado grupo electrógeno. La tasa de conversión de biogás a electricidad depende de cada generador dependiendo de la capacidad de generación que tiene, pero un valor aproximado ronda los 2 kWh/m³ biogás (para un biogás que contiene 70 % de metano) [9].

El uso de biogás en motores de combustión interna posee una amplia versatilidad por el uso de diferentes combustibles por sus calidades o cualidades: gas natural, biogás, gasoil, biodiesel, etc. El biogás tiene un valor energético de 20 – 25 MJ/m³. El motor tiene acoplado el alternador, este sistema se llama generador, su cogeneración produce una mayor cantidad de energía eléctrica por unidad de combustible consumido, obteniendo un mayor rendimiento eléctrico, entre un 30 % y un 45 % [7].

2.1.4.1 Generador

Un grupo electrógeno o generador es el acoplamiento de una máquina de combustión interna y una máquina eléctrica rotativa mediante un eje mecánico para transformar la energía térmica que se obtiene de un combustible en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Los generadores producen energía eléctrica de corriente alterna, y existen algunos tipos de generadores que también producen corriente directa por medio de rectificadores electrónicos.

La corriente alterna producida por el generador es utilizada para alimentar cargas que comúnmente están diseñadas para trabajar en características eléctricas de 110V a 60hz en Ecuador.

La corriente directa que produce el generador es principalmente utilizada para cargar un banco de baterías, que pueden ser utilizadas para el sistema de arranque eléctrico del motor o para alimentar un tipo de cargas de corriente continua, generalmente la tensión de salida en corriente directa es de 12V.

2.1.4.2 Principio de funcionamiento

La generación de electricidad se basa en los principios del electromagnetismo, se cuenta con dos polos magnéticos dispuestos opuestamente para producir un campo magnético entre ellos, un conductor en forma de espiras, llamado bobina, gira en medio del campo magnético donde se induce una corriente y se produce una tensión inducida.

La tensión inducida en el conductor está determinado por las siguientes características :

- El número de conductores en la bobina.
- La velocidad en la que gira el conductor dentro del campo magnético.
- El número de líneas magnéticas que produce los polos magnéticos.

La frecuencia de generador se determina por la velocidad de giro del motor y el número de polos del generador. Teniendo la siguiente expresión:

$$f(\text{hz}) = \frac{\#polos \times RPM}{120} \quad (1)$$

En el caso de Ecuador la frecuencia utilizada es 60hz; se tiene que para un generador de 2 polos la velocidad a la que debe girar el motor para garantizar dicha frecuencia es de 3600rpm, y para un generador de 4 polos una velocidad de 1800rpm. Que son los dos generadores comúnmente utilizados para la generación de energía eléctrica a partir de biogás.

Al tener una frecuencia de uso establecida y con el fin de preservar la vida útil de los equipos, se debe realizar un control de frecuencia en los generadores. El control lo realiza un elemento llamado gobernador.

A medida que la carga aumenta para el generador el par eléctrico se vuelve mayor al par mecánico frenando progresivamente al motor y por lo tanto la frecuencia de generación decrecimiento, teniendo las consecuencias respectivas a la disminución de frecuencia en equipos eléctricos. Por lo que al aumentar la carga se debe aumentar el par mecánico para igualar al eléctrico y el motor pueda girar a la velocidad nominal para la correcta generación.

2.1.4.3 Partes de un generador

Eléctricamente un generador básicamente esta está conformado por los siguientes elementos y se observa en la figura 2:

- Polos: Son los encargados de generar el campo magnético.
- Rotor: Es la parte móvil que se acopla al motor de combustión interna. Es el elemento que actúa como inductor.
- Estator: Es la parte fija del generador. Es el elemento que actúa como inducido.

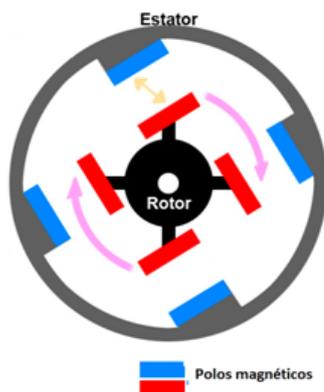


Figura 2: Partes eléctricas de un generador

2.2 Sistema fotovoltaico

Los sistemas fotovoltaicos transforman la energía solar en energía eléctrica, utilizando la radiación solar que emite el sol. Este tipo de energía se considera limpia ya que en su proceso de transformación de la energía no produce efectos contaminantes para el medio ambiente.

Este tipo de generación de energía es utilizado como un recurso donde no se cuente con un sistema de distribución energético, como fuentes alternativas y complementarias de generación de energía, y en la actualidad gracias al desarrollo tecnológico y el mejoramiento del rendimiento varias sistemas que aprovechan la energía solar para su funcionamiento autónomo.

2.2.1 Principio de funcionamiento

Un átomo está conformado por un núcleo, neutrones, protones (cargas positivas), y electrones (cargas negativas) que giran alrededor del núcleo. Un electrón puede dar saltos entre las capas de un átomo, para que esto suceda se necesita una cantidad de energía. Este electrón libre puede saltar a una capa más alta del mismo átomo o liberarse del átomo y pasar a conformar en la estructura atómica de otro átomo.

Al irradiar luz en un material conductor se genera un efecto fotoeléctrico como

se observa en la figura 3, el impacto de fotones produce que los electrones puedan tener la energía suficiente para liberarse del átomo. De esta manera, al liberarse el electrón del átomo queda cargado positivamente, es decir, se genera un "hueco". El movimiento de huecos en el conductor es llamado corriente eléctrica.

Para liberar electrones de la superficie de una placa de metal u otro material sólido, se necesita una cierta cantidad de energía, la cual depende de cada tipo de material. Si la energía de un fotón es mayor a dicha cantidad de energía se logra este fenómeno. La cantidad de electrones liberados depende de la frecuencia en la que los fotones inciden, por lo tanto una mayor intensidad de radiación (mayor número de fotones) a una determinada frecuencia liberarán mayor cantidad de electrones.

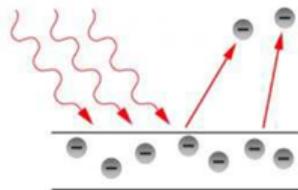


Figura 3: Efecto fotoeléctrico

2.2.1.1 Celdas fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas están fabricadas de un material semiconductor llamado silicio. El cristal de silicio puro es un aislante, conocido como silicón intrínseco.

Por lo que a este material se le introduce impurezas para que esta combinación pueda generar electrones, a este proceso se le llama dopamiento. Al introducir este tipo de impureza, el material formado puede liberar electrones y se llama material tipo n, figura 4. Se realiza el mismo procedimiento introduciendo otro tipo e impureza que genere un receptor de electrones y se llama material tipo p, figura 5. Al unir el material tipo n y tipo p, se forma una diferencia de potencial o campo eléctrico entre la unión materiales[10].

La energía de los fotones es capaz de liberar los electrones y al tener una banda de energía reducida y un campo eléctrico que atrae los electrones a la

zona de intercambio, al impactar los fotones a los electrones producen la energía necesaria para liberarse y poder pasar al material tipo p. De esta manera se crea una corriente de generación gracias a los fotones que se suma la corriente de generación.

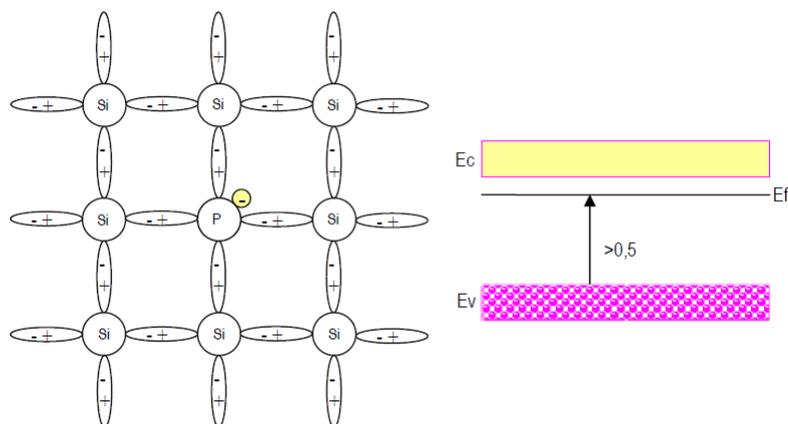


Figura 4: Estructura atómica del silicio dopado con fósforo, semiconductor tipo n

Fuente:[10]

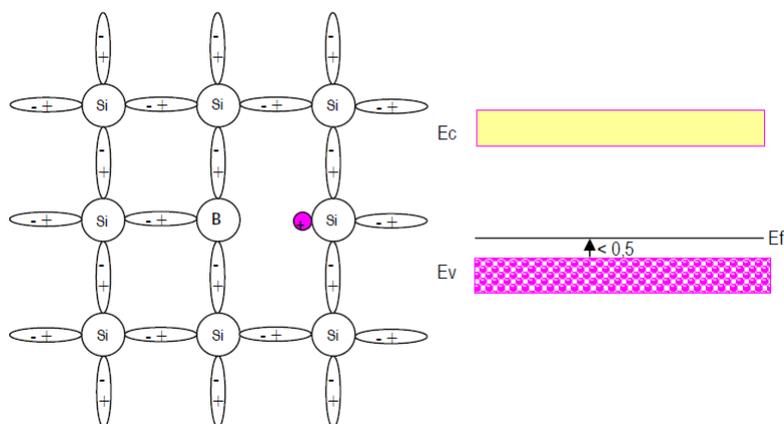


Figura 5: Estructura atómica del silicio dopado con boro, semiconductor tipo p

Fuente:[10]

2.2.2 Partes de un sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico, figura 6, está conformado por las partes detalladas a continuación:

1. Fuente de Energía: La fuente de energía corresponde a la fuente de radiación, el sol.
2. Celdas fotovoltaicas: Las celdas fotovoltaicas son las encargadas de la producción de energía eléctrica a partir de la energía solar.
3. Acumulador: Es el elemento encargado de acumular la energía eléctrica obtenida del sol en un banco de baterías. Para este proceso es necesario contar con un regulador que cumple la función de entregar al banco de baterías valores de tensión y corriente nominales y preservar su vida útil y óptimo funcionamiento.
4. Distribución: Es la etapa final del sistema fotovoltaico donde se conectan un determinado número de cargas de acuerdo a la capacidad que tenga el sistema.

En la etapa de distribución hay que tener en cuenta las características eléctricas de las cargas. Por lo que es necesario adicionar una etapa de acoplamiento de tensiones de acuerdo a la red eléctrica y poder utilizar aparatos eléctricos que comúnmente están diseñados para operar a corriente alterna de 120V a 60hz. Para esto necesario realizar un convertidor de corriente continua a corriente alterna, llamado inversor.

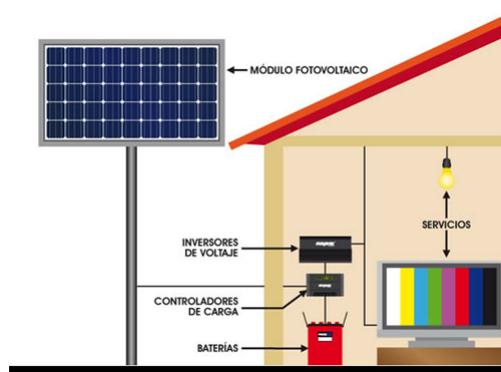


Figura 6: Partes de un sistema fotovoltaico

2.2.3 Caracterización de la energía eléctrica

2.2.3.1 Circuito Equivalente

El circuito equivalente de una celda fotovoltaico se muestra en la figura 7:

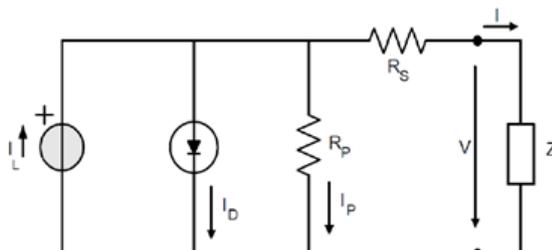


Figura 7: Circuito equivalente de una celda fotovoltaico

El comportamiento del circuito equivalente viene dado por la siguiente expresión simplificada[10]:

$$I = I_L - I_D - \frac{v - I * R_s}{R_p} \quad (2)$$

Donde:

- R_s = Resistencia en serie y representa las pérdidas de los contactos superior e inferior entre la celda y los terminales de corriente. Esta resistencia debe ser lo menor posible.
- R_p = Resistencia en paralelo y representa los defectos estructurales al interior de la celda que producen pérdidas. Esta resistencia debe ser lo más grande posible.
- I_L = Corriente generada por los fotones en la celda solar en Amperios [A] (foto corriente).
- I_D = Corriente del diodo que depende de las características y calidad de la celda y de la radiación solar.
- V = Tensión externa de la celda solar.

2.2.3.2 Curva corriente vs. tensión

El comportamiento de la corriente de una celda fotovoltaico en función de la tensión se observa en la figura 8:

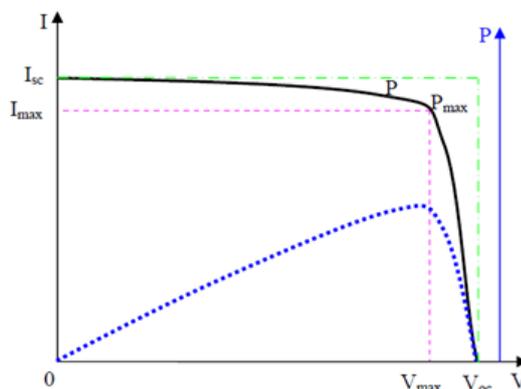


Figura 8: Curva corriente vs tensión de una celda fotovoltaico

Donde indica que la corriente que produce la celda fotovoltaico es casi constante y menor a la corriente de cortocircuito hasta un punto de tensión máxima, a partir de ahí hasta llegar la tensión de circuito abierto la corriente decrece rápidamente. Existe un punto donde se tiene la máxima potencia que viene dado por la corriente máxima y tensión máxima alcanzado por la celda fotovoltaico.

2.2.3.3 Efectos de la radiación y la temperatura

El efecto que produce la radiación en las celdas fotovoltaicas es que la corriente aumenta proporcionalmente a la radiación solar. Por otro lado, el efecto que produce la temperatura en la celdas fotovoltaicas es que la tensión disminuye proporcionalmente a la temperatura[10].

Por lo que para aumentar la potencia de una celda fotovoltaico se requiere mayor cantidad de radiación solar y que la temperatura de la celda no aumente en el transcurso.

Estas curvas se pueden observar en las hojas técnicas de cada fabricante, figura 9, por ejemplo:

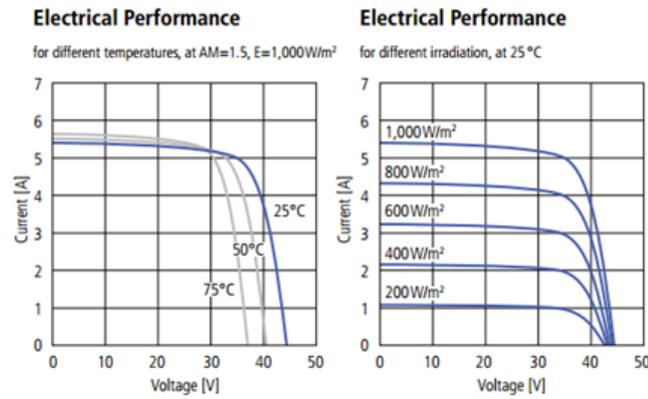


Figura 9: Efectos de la temperatura y la radiación en un celda fotovoltaico

2.2.3.4 Eficiencia de una celda fotovoltaico

La eficiencia de una celda fotovoltaico viene dada por la siguiente expresión:

$$\eta_c = \frac{P_M}{G \times A_C \times N_C} \quad (3)$$

La eficiencia de un módulo fotovoltaico viene dada por la siguiente expresión:

$$\eta_M = \frac{P_M}{G \times A_M} \quad (4)$$

Donde:

η_c = Eficiencia de una celda de un panel fotovoltaico.

P_M = Potencia nominal del panel fotovoltaico en Vatios pico [Wp].

G = Radiación solar en W/m^2 .

A_C = Área de la celda en m^2 .

N_C = Número de celdas en el panel.

η_M = Eficiencia del panel fotovoltaico.

A_M = Área total del módulo en m^2 .

2.2.4 Arreglos de celdas fotovoltaicas

Los valores de tensión típicos de arreglos de celdas fotovoltaicas son de 6V, 12V, 24V, 48V. Para lo cual se dispone de la celdas fotovoltaicas en serie y en paralelo para obtener una salida de tensión.

2.2.4.1 Conexión en serie

Cada celda produce 0,5V, al conectar en serie las tensiones independientes de suman y la corriente del arreglo permanece constante. Este configuración, figura 10, es utilizada para alcanzar una tensión en la salida determinado.

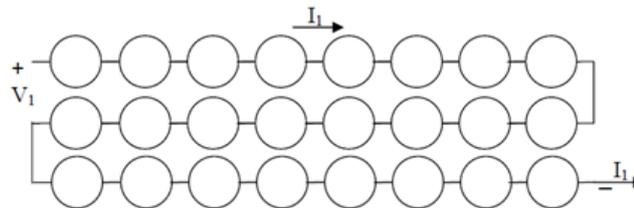


Figura 10: Celdas fotovoltaicas conectadas en serie.

2.2.4.2 Conexión en paralelo

Para tener una mayor corriente se conecta arreglos de celdas fotovoltaicas con una misma tensión de salida en paralelo como se muestra en la figura 11. De esta manera, la tensión del nuevo arreglo se mantiene constante y la corriente aumenta de acuerdo al número de arreglos celdas conectadas en paralelo.

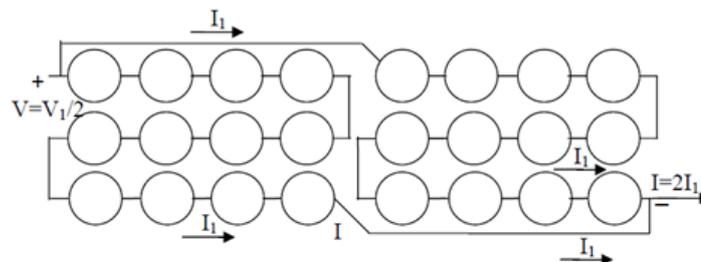


Figura 11: Celdas fotovoltaicas conectadas en paralelo.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LOS SUBSISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

3.1 Generación a partir del gasificador de biomasa

3.1.1 Especificaciones técnicas del gasificador de biomasa

En el cuadro 3 se describen las especificaciones técnicas correspondientes al gasificador de biomasa:

Cuadro 3: Especificaciones técnicas del gasificador de biomasa

Capacidad Eléctrica (kW)	2-10
Flujo de gas(m ² /hr)	5-27
Gas heat flow at max(BTU/hr)	168,993
Consumo de biomasa(kg/día)	160-320

Fuente:[11]

De los datos técnicos del gasificador de biomasa se obtiene las siguientes relaciones:

1kg de biomasa es capaz de generar aproximadamente 0,75kWh

$$1kh \simeq 750Wh$$

1kg de biomasa produce aproximadamente 2m³ de gas.

$$1kh \simeq 2m^3gas$$

3.1.1.1 Cantidad de consumo de biomasa

Para producir 0,75 Kw durante 1 hora, se necesita aproximadamente 1kg de biomasa. El consumo de biomasa en relación al tiempo T(h) que un generador de potencia P(kW) esté funcionando, se puede determinar por la siguiente expresión[11]:

$$Biomasa(kg) = 1,33 * P_{Gen}(kW) * t(h) \quad (5)$$

De esta manera se puede determinar para un tipo de generador que se va a utilizar un determinado número de horas cuantos kilogramos de biomasa se debe disponer con las características apropiadas del estado de biomasa (%humedad menor al 30 %).

3.1.2 Especificaciones técnicas del generador a biogás

En el cuadro 4 se detalla las especificaciones técnicas dadas por el fabricante del generador a biogás:

Cuadro 4: Especificaciones técnicas del generador a biogás

Potencia nominal	800W
Potencia máxima	9000W
Frecuencia	60HZ
Tensión AC	120V
Tensión DC	12V 8.3A
Numero de polos	2
Velocidad	3600rpm

Fuente:[12]

3.1.3 Generador a gasolina vs Generador a biogás

Para determinar la potencia del generador real tanto a gasolina como a biogás, se realiza mediante la suma cargas resistivas de una determinada potencia, como carga resistivas se utilizan bombillas incandescentes de 25, 50 y 100W. Se realizan

mediciones de corriente y tensión por cada carga que se añade teniendo como potencia total del generador la sumatoria de cada una de las cargas.

Durante cada incremento de carga la tensión debe mantenerse constante y la corriente incrementando. La máxima potencia del generador se establece en el punto en el cual al aumentar carga la corriente se mantiene constante y existe una caída de tensión.

3.1.3.1 Circuito eléctrico para determinar la potencia del generador

El circuito eléctrico para determinar la potencia del generador, se describe en la figura 12:

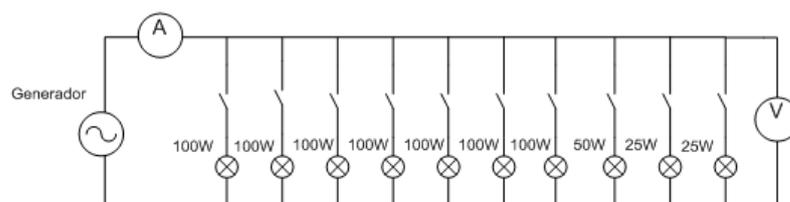


Figura 12: Circuito eléctrico para determinar potencia del generador

3.1.4 Relación combustible-aire

Para el funcionamiento del motor de combustión interna del generador es necesario que cierta cantidad de aire esté presente en una determinada cantidad de combustible. Esta relación de aire-combustible es necesaria para que el generador se encuentre en su punto de operación.

Debido a que las propiedades del combustible varían dependiendo del tipo y calidad de biomasa, no se cuenta con un dato exacto de cómo llegar a obtener dicha relación para el generador. Por lo que la relación aire-combustible se obtiene de manera experimental mediante la manipulación de válvulas de paso tanto en la entrada de biogás como de aire al generador.

En la figura 13 se describe el método empleado para de obtener la relación aire combustible necesaria para el generador.

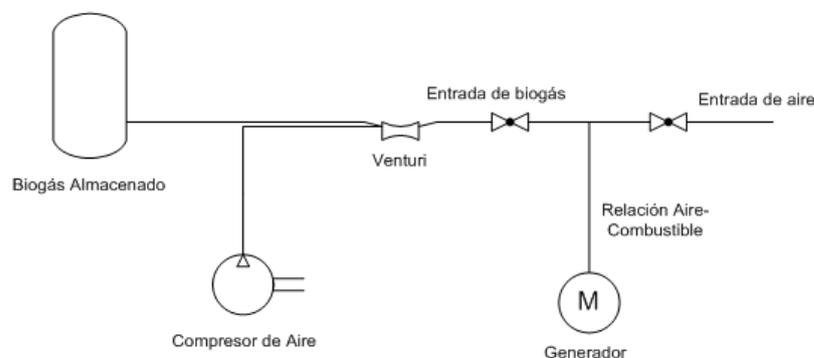


Figura 13: Esquema relación aire-combustible

3.1.5 Convertidor de corriente alterna a corriente continua

3.1.5.1 Diagrama de bloques

En la figura 14 se describe en el diagrama de bloques del conversor de AC/DC o rectificador:

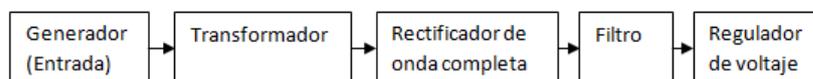


Figura 14: Diagrama de bloques de rectificador de onda completa

Donde:

- La entrada del sistema es la tensión de salida del generador.
- La etapa del transformador se establece la relación de transformación de 120V a 12V para que el sistema de generación a partir de biogás opere junto al sistema de generación fotovoltaico.
- Para la conversión de corriente alterna a corriente continua, se utiliza un rectificador de onda completa por medio de un puente de diodos.
- Se realiza un filtro a la señal obtenida del rectificador para mantener la señal estable y continua.

- La etapa del regulador de tensión es necesaria para eliminar el rizo que existe en la señal y tener una señal continua de tensión exacta.

3.1.5.2 Diagrama eléctrico

En la figura 15 se describe el circuito eléctrico del rectificador[13]:

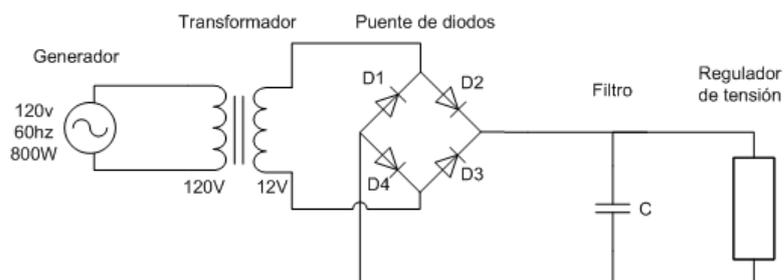


Figura 15: Circuito eléctrico rectificador de onda completa

3.1.5.3 Selección del convertidor de corriente alterna a corriente continua

3.1.5.3.1 Filtro del convertidor

El valor del capacitor del filtro de la señal, se determina a partir de la siguiente expresión:

$$c = \frac{5 * V_{max}}{\Delta V * 2\pi * f_p * RL} \quad (6)$$

Donde:

El valor máximo $V_{m\acute{a}x}$ viene dado por el pico de la señal del rectificador y su valor es de 12V.

$$V_{max} = 12$$

El filtro tendrá una variación de voltaje del 10%.

$$\Delta V = 1,2$$

La frecuencia al ser un rectificador de onda completa, es el doble de la frecuencia de entrada. Por lo tanto:

$$fp = 120$$

Carga con una corriente máxima igual a 40A y un tensión de 12V, por lo tanto

$$R = \frac{V}{I} \quad (7)$$

$$RL = \frac{12}{40} = 0,3\Omega$$

Reemplazando los términos en la ecuación, se determina el valor del capacitor:

$$c = \frac{5 * 12}{1,2 * 2\pi * 120 * 0,3} = 0,2210 F$$

El valor de capacitor comercial a elegir es de 100000uF

3.1.5.3.2 Relación de transformación

Para determinar las corrientes y tensiones del circuito, partimos de la relación de transformación que se observa en la figura 16:

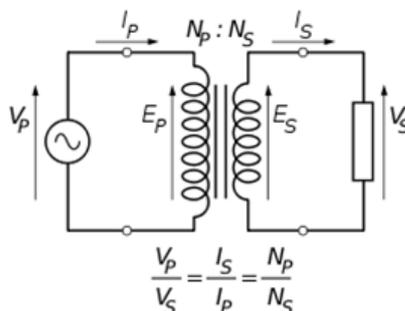


Figura 16: Relación de transformación

Conociendo la corriente máxima que entrega el generador se determina la corriente en el primario:

$$I_p = 4[A]$$

Teniendo la relación de transformación de las tensiones se determina la corriente que circula en el secundario, mediante la siguiente expresión:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (8)$$

$$I_s = \frac{V_p * I_p}{V_s} = \frac{120 * 4}{12} = 40 A$$

Considerando la eficiencia del rectificador del 90 al 95 %:

3.1.5.3.3 Potencia del rectificador

La potencia del rectificador a seleccionar viene dada por la siguiente expresión:

$$P = Tensión * Corriente \quad (9)$$

$$P = 12V * 40A = 480 W$$

Multiplicando por un factor de seguridad del 20 %, se obtiene:

$$P_{final} = P_{Nominal} * 1,2 = 480 * 1,2 = 576 W \quad (10)$$

El rectificador que cumpla con dichas características debe ser de al menos 600W, para poder suplir la cantidad de corriente máxima que el generador entrega.

3.2 Generación a partir del sistema fotovoltaico

3.2.1 Especificaciones técnicas de cada panel fotovoltaico

En el cuadro 5 se describen las especificaciones técnicas correspondientes a cada celda fotovoltaica:

Cuadro 5: Especificaciones técnicas panel fotovoltaico

Tensión nominal	12V	24V
Tensión de máxima potencia	17.4V	34.8V
Potencia nominal	100W	100W
Corriente máxima	5.74A	2.87A
Tensión en circuito abierto	21.6V	43.2V
Corriente de cortocircuito	6.54A	3.27A

Fuente:[14]

El sistema fotovoltaico contiene 3 paneles fotovoltaicos, el tipo de conexión que se realizará es en paralelo para aumentar la corriente hacia la carga y mantener constante la tensión del sistema fotovoltaico. De esta manera teóricamente cada panel aporta aproximadamente con 2.8A, teniendo un total:

$$Corriente_{Total} = Corriente_{panel} * Numero_{paneles} \quad (11)$$

$$Corrientetotal = 2,87 * 3 = 8,61 A$$

La potencia teórica del sistema fotovoltaico, se obtiene de la ecuación 9:

$$Potencia = 24 * 8,61 = 206,64 W$$

3.2.2 Diseño del convertidor DC-DC

El convertidor DC-DC es un convertidor reductor o buck ya que se desea reducir la tensión entregada por los paneles fotovoltaicos a una tensión de carga

de baterías. En la figura 17 se observa el esquema general de un convertidor buck[13].

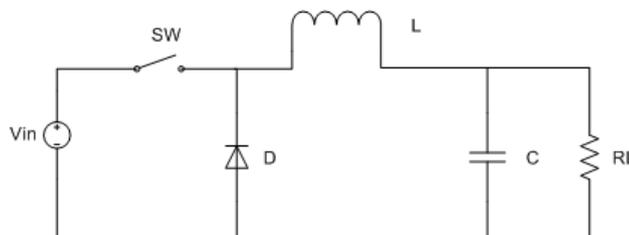


Figura 17: Convertidor buck

3.2.2.1 Modo de conducción continua

En $t=0$ comienza a conducir el interruptor sw, el circuito equivalente se describe en la figura 18. La tensión de salida V_o es menor que V_i la corriente por la bobina L incrementa durante este periodo de tiempo. La corriente que circula por el interruptor es igual a la de la bobina L.

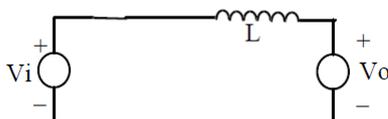


Figura 18: Circuito equivalente convertidor buck en $t=0$

Después de un tiempo Δt se apaga el interruptor sw y se genera una sobretensión que hace conducir al diodo D (diodo de marcha libre) manteniendo así la continuidad de la corriente por la bobina L como se muestra en la figura 19:

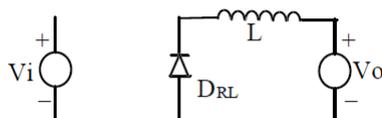


Figura 19: Circuito equivalente convertidor buck en $t=\Delta t$

El valor medio de la tensión V_o es DxV_i y, como la tensión media sobre L debe ser nula cuando el circuito opera en estado estacionario se tiene:

$$V_o = D * V_i \quad (12)$$

Siendo D el ciclo de trabajo de la señal PWM que controla al interruptor.

3.2.2.2 Diseño del convertidor

La tensión de entrada al convertidor DC-DC es el entregado por los paneles fotovoltaicos:

$$V_{in} = 24V$$

La frecuencia de oscilación de la señal de PWM es:

$$f = 25kHz$$

La tensión de carga de baterías va en el rango de 14.4V a 15V, por lo tanto se establece una variación de tensión de 0.1V, y se limita la componente ondulatoria de corriente a 0.1A:

$$V_{out} = 14,7 V$$

$$\Delta V_c = 0,1 V$$

$$\Delta I = 0,1 A$$

Se determina el ciclo de trabajo D por la siguiente expresión[13]:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} * 100\% \quad (13)$$

$$D = \frac{14,7}{24} * 100 = 61,25$$

Para determinar los valores del inductor y del capacitor del convertidor buck, se calculan por las siguientes expresiones:

Corriente de la componente ondulatoria del inductor[13]:

$$\Delta I = \frac{V_{in} * D(1 - D)}{fL} \quad (14)$$

$$L = \frac{24 * 0,6125(1 - 0,6125)}{25 * 10^3 * 0,1} = 2,27 \text{ mH}$$

Tensión de la componente ondulatoria en el capacitor[13]:

$$\Delta V_c = \frac{V_{in} * D(1 - D)}{8LCf^2} \quad (15)$$

$$C = \frac{24 * 0,6125(1 - 0,6125)}{8 * 0,1 * 2,27 * 10^{-3} * (25 * 10^3)^2} = 5 \text{ uF}$$

3.2.2.3 Corriente de Salida

Cada panel fotovoltaico aporta con 2.87A teniendo un total de 8.6A en el sistema fotovoltaico, por lo que la corriente de entrada al convertidor es:

$$I_{in} = 8,6A$$

La Corriente de salida del convertidor, se calcula por la siguiente expresión:

$$I_{out} = \frac{1}{D} * I_{in} \quad (16)$$

$$I_{out} = \frac{1}{0,6125} * 8,61$$

$$I_{out} = 14,06 \text{ A}$$

Típicamente un convertidor buck tiene una eficiencia del 90 al 95 %, por lo que la máxima corriente de salida que puede generar el convertidor es:

$$I_{max} = I_{out} * 95 \% \quad (17)$$

$$I_{max} = 14,06 * 0,95$$

$$I_{max} = 13,3 A$$

3.2.3 Especificaciones técnicas de las baterías

En el cuadro 6 se describen las especificaciones técnicas correspondientes a las baterías:

Cuadro 6: Especificaciones técnicas batería

Celdas por unidad	6
Tensión por unidad	12 V
Capacidad	11 Ah
Corriente de descarga máxima	150A/180A
Resistencia Interna	14mΩ
Tensión de carga flotante	13.5 a 13.8V
Corriente de carga máxima	3.6A

Fuente:[15]

3.2.4 Utilización de paneles fotovoltaicos para cargar banco de baterías

Se cuenta con un total 12 baterías cada una con una capacidad de 11 Ah, la capacidad total del banco de baterías viene dado por la siguiente expresión:

$$Capacidad_{Total} = Numero_{Baterias} * Capacidad_{individual} \quad (18)$$

$$Capacidad_{Total} = 12 * 11 = 132 Ah$$

3.2.4.1 Descarga del banco de baterías

Se establece que el banco de baterías trabaje durante la noche cuando los paneles fotovoltaicos lo hayan cargado durante el día.

De este modo se establece un tiempo de descarga de 10 horas y un consumo promedio de corriente de 1A por batería.

$$Tiempo_{Descarga} = 10 \text{ horas} \quad (19)$$

$$Consumo_{corriente} = 1 A$$

De acuerdo a el cuadro 20 se obtiene la tensión de descarga de la batería.

Constant Current Discharge Characteristics Unit:A (25°C, 77°F)												
F.V/Time	5MIN	10MIN	15MIN	30MIN	60MIN	90MIN	2HR	3HR	5HR	8HR	10HR	20HR
1.60V	45.7	32.1	23.1	13.5	7.42	5.16	3.99	2.84	1.83	1.25	1.03	0.61
1.67V	44.0	31.4	22.0	12.4	7.22	5.11	3.96	2.84	1.83	1.24	1.04	0.64
1.70V	42.8	30.8	22.6	13.2	7.27	5.08	3.94	2.80	1.81	1.23	1.00	0.60
1.75V	40.3	29.4	21.9	13.0	7.14	5.00	3.88	2.76	1.80	1.22	1.00	0.60
1.80V	37.6	27.5	20.7	12.6	6.92	4.87	3.80	2.70	1.77	1.20	0.97	0.59
1.85V	33.8	24.8	19.0	11.7	6.55	4.64	3.63	2.59	1.70	1.14	0.93	0.56

Figura 20: Descarga batería a una corriente constante
Fuente:[15]

$$Voltaje_{Descarga} = 10,2 V$$

Teniendo en cuenta un tiempo de descarga de 10 horas a un consumo continuo de corriente de 1 A por batería. La potencia que se genera se obtiene de la ecuación 9:

$$Potencia = 12V * 1A = 12 W$$

Por lo tanto el banco de baterías en total tiene un tiempo de descarga de 10 horas a un consumo continuo de 12A.

La potencia total del banco de baterías viene dado por la siguiente expresión:

$$Potencia_{BancoBaterias} = Potencia_{Bateria} * Numero_{Baterias} \quad (20)$$

$$Potencia_{BancoBaterias} = 12W * 12 = 144 W$$

3.2.4.2 Carga del banco de baterías

La corriente disponible para cargar el banco de batería viene dada por la corriente de salida del convertidor DC-DC:

La corriente de carga de cada batería viene dada por la siguiente expresión:

$$Corriente_{Carga} = \frac{Corriente_{Total}}{Número_{Baterias}} \quad (21)$$

$$Corriente_{Carga} = \frac{13A}{12} = 1,1 A$$

Cada batería recibe 1,1A para su carga por lo cual no es necesario limitar la corriente de carga ya que es inferior a la corriente de carga máxima de cada batería que es de 3.6A.

El tiempo de carga viene dado por la siguiente expresión:

$$Tiempo_{Carga} = \frac{Capacidad}{Corriente_{Carga}} \quad (22)$$

$$Tiempo_{Carga} = \frac{11Ah}{1,1A} = 10 horas$$

CAPÍTULO 4

INTEGRACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA

4.1 Acoplamiento de fuentes de alimentación

El acoplamiento de las fuentes de alimentación será mediante una conexión en paralelo, como se muestra en la figura 21:

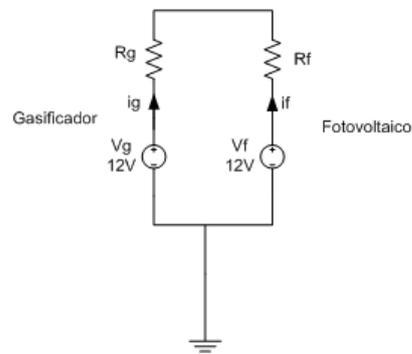


Figura 21: Conexión en paralelo de fuentes de alimentación

La tensión en sus terminales es el mismo, igual a 12V, y las corrientes que generen se suman para dar mayor potencia al sistema híbrido de generación de energía. En la figura 22 se ilustra el circuito equivalente de las fuentes en paralelo.

Por lo tanto la potencia total del sistema híbrido de generación de energía es igual a la suma de las potencias individuales de cada sistema:

$$P_{total} = P_{gasificador} + P_{fotovoltaico} \quad (23)$$

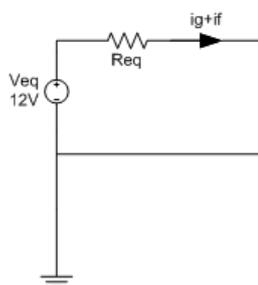


Figura 22: Circuito equivalente fuentes en paralelo

$$P_{total} = 480 + 144 = 624 \text{ W}$$

En el cuadro 7 se observa a los sistemas de generación de energía como fuentes de alimentación con sus respectivas características eléctricas. Tabla características fuentes de alimentación del sistema

Cuadro 7: Características fuentes de alimentación del sistema

	Gasificador de Biomasa	Sistema Fotovoltaico	Sistema híbrido de generación de energía
Tensión nominal	12V	12V	12V
Corriente máxima	40A	12A	52A
Potencia	480W	144W	624W

4.2 Diagrama de bloques

El sistema híbrido de generación de energía se describe en el siguiente diagrama de bloques, figura 23:

A continuación se describe cada bloque del sistema híbrido de generación de energía:

- Gasificador de biomasa: Es el sistema de generación de energía a partir de un gasificador de biomasa.
- Sistema fotovoltaico: Es el sistema de generación de energía mediante la

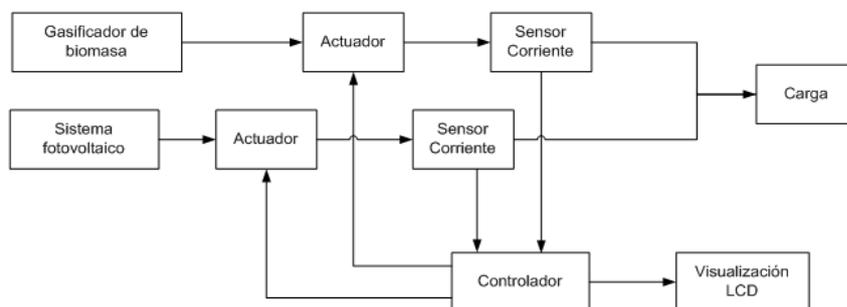


Figura 23: Diagrama bloques sistema híbrido generación de energía carga de un banco de baterías por paneles fotovoltaicos.

- Actuador: Es el que permite o interrumpe el paso de energía desde el sistema fotovoltaico, sistema gasificador de biomasa o ambos hacia la carga.
- Sensor de corriente: Permite medir la corriente de cada sistema para determinar cuánto aporta al sistema.
- Carga: Es/Son el/los elemento(s) y/o dispositivo(s) eléctricos que para su funcionamiento consumen potencia.
- Visualización: Permite visualizar características eléctricas y comportamiento del sistema fotovoltaico, gasificador de biomasa y carga.

4.3 Esquema del circuito de control

En la figura 24 se muestra el esquema del circuito de control que cumple con el sistema híbrido de generación de energía.

Donde:

- Las entradas del microcontrolador como son los sensores de corriente del sistema fotovoltaico y del sistema gasificador de biomasa, se realiza la lectura mediante el modulo ADC, conversor análogo digital, que se encuentran en el puerto A del microcontrolador.

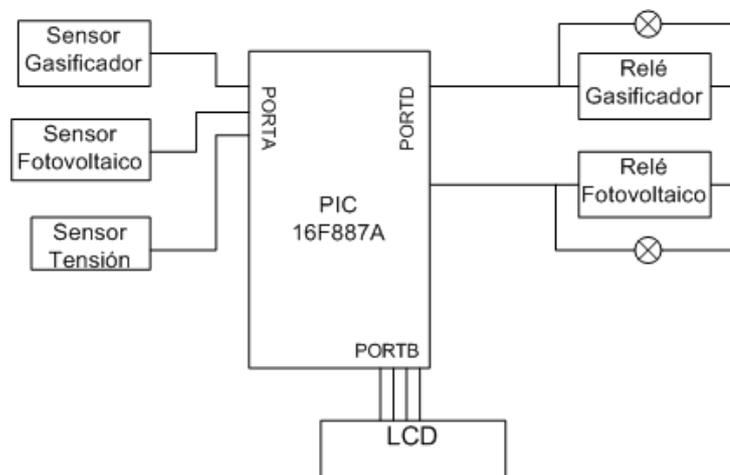


Figura 24: Esquema del circuito de control del sistema híbrido de generación de energía

- Las salidas del microcontrolador de activación de los relé que permitirán el paso o interrupción de corriente según un algoritmo de optimización, se encuentran en el puerto D
- En el puerto B se encuentra el control para la visualización de parámetros eléctricos por medio de un display LCD.

4.4 Automatización del sistema híbrido de generación de energía

4.4.1 Medición de tensión

La medición de tensión se realizará directamente con el conversor ADC del microcontrolador que cuenta con una resolución de 10 bits [16], y una tensión de referencia de 5V.

La tensión en la carga, banco de baterías, el convertidor DC-DC y el rectificador de onda completa está en el orden de los 10V a 13V. Por lo que la tensión de referencia esta aproximadamente en una relación de 1 a 3 de las tensiones a ser medidos en el sistema.

Tomando la relación de 1 a 3, la tensión máximo que el conversor ADC podría

leer es 15V. Para la medición se realiza un divisor de tensión que mantenga dicha relación para establecer la medición.

En la figura 25 se visualiza el divisor de tensión que mantiene la relación establecida:

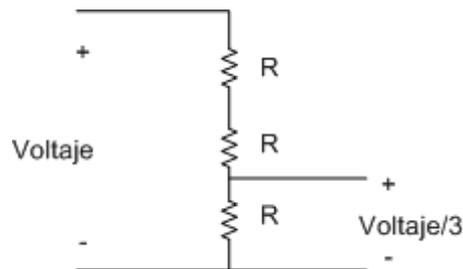


Figura 25: Esquema de medición de tensión

Para que la medición no afecte al sistema, el consumo de corriente debe ser mínimo y se determina que el valor de la resistencia debe estar en el orden de los kohms. El valor elegido es 33kohms, teniendo una resistencia equivalente de 99 kohms. Partiendo de la ecuación 7:

$$I = \frac{12}{99k} = 12 \text{ mA}$$

Dado que la corriente nominal del sistema es 52A, la corriente que consumiría el divisor de tensión no afecta al sistema.

El valor de convertidor máximo a una tensión de referencia es de 1023. El valor medido por el conversor ADC y transformado a unidades de ingeniería, viene dado por la siguiente expresión:

$$Tensión = Valor_{Conversor} * \frac{5}{1023} V \quad (24)$$

Aplicando la relación de 3 a 1 se obtiene el valor final medido

$$Tensión = Valor_{Conversor} * \frac{5}{1023} * 3 V$$

La expresión se reduce a la tensión medida es igual al valor del conversor

ADC por una ganancia:

$$Tensión[V] = Valor_{Conversor} * ganancia \quad (25)$$

$$Tensión[V] = Valor_{Conversor} * \frac{15}{1023}$$

4.4.2 Medición de corriente

4.4.2.1 Sistema Fotovoltaico - Sensor ACS712 - 20A

En el cuadro 8 se detalla los datos técnicos del sensor de corriente dados por el fabricante:

Cuadro 8: Características sensor de corriente del Sistema Fotovoltaico

Tensión	5V
Sensibilidad	100mV/A
Rango de Corriente	$\pm 20A$

Fuente:[17]

El conversor análogo a digital del microcontrolador cuenta con una resolución de 10 bits [16], por lo que la sensibilidad del conversor ADC viene dado por:

$$s = \frac{Vref}{2^{10}} \quad (26)$$

$$s = \frac{5}{1024} = 4,88 \text{ mV}$$

La variación mínima de tensión que detecta el conversor ADC y tensión entregada por el sensor, hace que el sistema tenga una capacidad de detectar el siguiente cambio de corriente:

$$Corriente = \frac{Sensibilidad_{ADC}}{Sensibilidad_{sensor}} \quad (27)$$

$$Corriente = \frac{4,88mV}{100mV/A} = 0,0488 \text{ A}$$

La tensión de referencia del sensor de corriente es de 2,5V, el valor que lea convertidor ADC viene dado por la siguiente expresión:

$$Valor = \frac{Tensión}{Sensibilidad} \quad (28)$$

$$Valor = \frac{2,5V}{4,88mV} = 512$$

La traducción de la lectura de corriente entregada por el sensor a través del conversor ADC a datos de ingeniería viene dado por la siguiente expresión:

$$Corriente = (Valor_{ADC} - Valor_{Referencia}) * GananciaCorriente \quad (29)$$

$$Corriente = (Valor_{ADC} - 512) * 0,0488 A$$

4.4.2.2 Gasificador - Sensor ACS712 - 30A

En el cuadro 9 se detalla los datos técnicos del sensor de corriente dados por el fabricante:

Cuadro 9: Características sensor de corriente del Gasificador

Tensión	5V
Sensibilidad	66mV/A
Rango de Corriente	±30A

Fuente:[17]

El conversor análogo a digital del microcontrolador cuenta con una resolución de 10 bits [16], por lo que la sensibilidad del conversor ADC viene dado por la ecuación 26:

$$s = 4,88 mV$$

La variación mínima de tensión que detecta el conversor ADC y tensión en-

tregada por el sensor, hace que el sistema tenga una capacidad de detectar el siguiente cambio de corriente dado por la ecuación 27:

$$Corriente = \frac{4,88mV}{66mV/A} = 0,0739 A$$

La tensión de referencia del sensor de corriente es de 2,5V, el valor que lea convertidor ADC viene dado por la ecuación 28:

$$Valor = \frac{2,5V}{4,88mV} = 512$$

La traducción de la lectura de corriente entregada por el sensor a través del conversor ADC a datos de ingeniería viene dado por la ecuación 29:

$$Corriente = (Valor_{ADC} - 512) * 0,0739 A$$

4.4.3 Señal PWM para convertidor DC-DC

La frecuencia de oscilación de la señal PWM para el convertidor DC-DC se establece en 25Khz. Por lo que el periodo de la señal de PWM viene dado por la siguiente expresión:

$$Periodo = \frac{1}{Frecuencia} \quad (30)$$

$$T = \frac{1}{25Khz} = 40 * 10^{-6}s$$

Para que el micro controlador trabaje en modo PWM, se configura el registro CCP1 como salida de PWM. Según el datasheet del fabricante, se debe configurar los registros asociados al TIMER2 de la siguiente manera [16]:

$$PWMPeriod = [(PR2) + 1] * 4 * TOSC * (TMR2PrescaleValue) \quad (31)$$

Donde:

- PWM Period: Periodo de oscilación que se desea obtener
- PR2: Registro 8 bits
- TOSC: Periodo de oscilación del micro controlador
- TMR2 Prescale Value: Pre escalador del TIMER2

Remplazando valores se determina los valores de registros para la configuración del módulos TIMER2 [16]:

$$40 * 10^{-6} = [(PR2) + 1] * 4 * \frac{1}{4 * 10^{-6}} * (TMR2PrescaleValue)$$

El valor TMR2 Prescale Value se establece en 1:

$$TMR2PrescaleValue = 1$$

Por lo tanto el registro PR2 es:

$$PR2 = 39$$

El ciclo de trabajo se determina por la siguiente expresión de la ecuación 13:

$$D = \frac{13}{19} * 100 = 68,4$$

4.5 Optimización del consumo de energía

El sistema híbrido de generación de energía parte de las siguientes condiciones:

1. El sistema del gasificador de biomasa siempre se encuentra generando energía.
2. El sistema fotovoltaico tiene dos estados:

- Carga: Es el estado durante el cual el sistema fotovoltaico carga el banco de baterías.
- Descarga: Es el estado durante el cual el banco de baterías realiza su descarga a través de una carga.

4.5.1 Modos de operación

De acuerdo a las condiciones del sistema híbrido de generación de energía se tiene los siguientes modos de operación:

1. El sistema fotovoltaico se encuentra en el estado de carga, por lo tanto el sistema de gasificador de biomasa asume toda la potencia que la carga consume. Es decir, la carga máxima es igual a la potencia del sistema gasificador de biomasa.
2. El sistema fotovoltaico se encuentra en el estado de descarga, teniendo las siguientes opciones:
 - El sistema fotovoltaico asume toda la potencia que la carga consume. Es decir, la carga máxima es igual a la potencia del sistema fotovoltaico.
 - El sistema de gasificador de biomasa asume toda la potencia que la carga consume. Es decir, la carga máxima es igual a la potencia del sistema gasificador de biomasa.
 - Tanto el sistema de gasificador de biomasa como el sistema fotovoltaico asumen la potencia que la carga consume. Es decir, la carga máxima es igual a la potencia del sistema gasificador de biomasa más la potencia del sistema fotovoltaico.

En el cuadro 10 se puede observar la capacidad de cada sistema para suplir cierta cantidad de carga:

De acuerdo a el cuadro se establecen las condiciones de optimización de consumo de energía:

Cuadro 10: Capacidad de generación cada sistema

Sistema Carga	Fotovoltaico	Gasificador	Fotovoltaico + Gasificador
<144W	X	X	X
<480W		X	X
<624W			X

- Cuando el sistema fotovoltaico se encuentre en el estado de carga del banco de baterías, el sistema de gasificador de biomasa será el único que abastece la demanda de la carga.
- Cuando el sistema fotovoltaico se encuentre en el estado de descarga se tienen las siguientes condiciones:
 1. Cuando la carga sea menos a 144W bastará con el sistema fotovoltaico para suplir la demanda de carga, evitando que el consumo de biomasa.
 2. Cuando la carga sea mayor a 144W y menor a 480W, bastará con el gasificador suplir la demanda de carga, evitando que el consumo de las baterías.
 3. Cuando la carga sea mayor a 480W ambos sistemas aportaran para suplir la demanda de la carga.

4.5.2 Diagrama de flujo

En la figura 26 se describe el diagrama de flujo que cumple con las condiciones de optimización de consumo de energía:

4.6 Especificación de materiales

4.6.1 Selección de Actuador

Contactor

Los contactores que se encuentran en el mercado son de 3 polos y activación o excitación a 110Vac o 220Vac como se muestra en la figura 27.

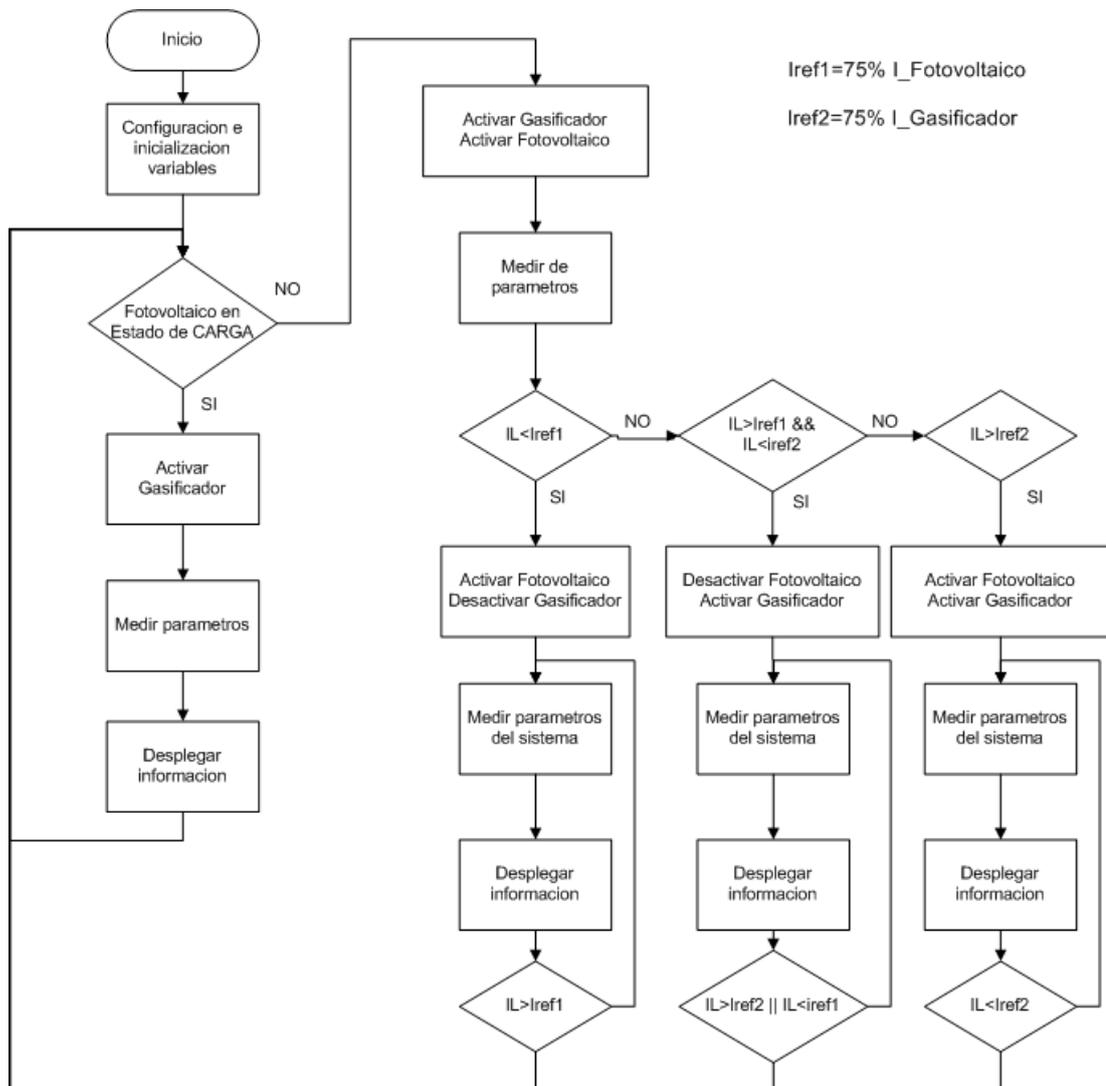


Figura 26: Diagrama de flujo

Para la activación contactor se excita la bobina a una tensión de 110Vac. La señal de activación del controlador es digital por lo que se necesita de un relé adicional para la activación con una tensión de excitación 5Vdc y salida a corriente alterna.

El contactor de cumplir con los parámetros de cada sistema:

- El sistema gasificador de biomasa tiene una tensión de 12V y una corriente máxima de 40A en la carga.
- El sistema fotovoltaico tiene una tensión de 12V y una corriente máxima



Figura 27: Contactor de 3 polos y excitación de bobina 110Vac

de 40A en la carga

Al tener 3 polos en el contactor se distribuirá la corriente en cada uno de los polos, se resume en el cuadro 11:

Cuadro 11: Características contactor S. Gasificador y S. Fotovoltaico

Característica	Fotovoltaico	Gasificador
Tensión excitación	110Vac	110Vac
Numero de polos	3	3
Corriente continua	25 A	40 A
Frecuencia	50-60Hz	50-60Hz
Tensión de aislamiento	690Vac	690Vac

4.6.2 Selección de conductores

El material del conductor que se elige es de cobre con aislamiento tipo THHN. Utilizados para circuitos de fuerza aptos para instalaciones especiales por ductos difíciles y usarse en zonas abrasivas o contaminadas con aceites, grasas, gasolinas, etc. Teniendo en cuenta la figura 28 dada por el fabricante, se establecen el calibre del cable para cada parte del sistema híbrido de generación de energía.

En el cuadro 12 se detalla la cantidad de corriente que opera para parte del sistema híbrido de generación de energía y el calibre del cable necesario, para evitar el calentamiento de cables y que la conductividad adecuada.:

CALIBRE AWG ó MCM	SECCION mm ²	FORMACION No. de hilos por diámetro mm.	ESPESOR AISLAMIENTO mm.	ESPESOR CHAQUETA mm.	DIAMETRO EXTERIOR mm.	PESO TOTAL Kg/Km	CAPAC. DE CORRIENTE para 1 conductor al aire libre Amp.	CAPAC. DE CORRIENTE para 3 conductores en conduit Amp.	TIPO CABLE	ALTERNAT. DE EMBALAJE.
20	0,519	1 x 0,813	0,38	0,10	1,77	7,07	15	10	TFN	A,B
18	0,823	1 x 1,02	0,38	0,10	1,98	10,94	15	10	TFN	A,B
16	1,31	1 x 1,29	0,38	0,10	2,25	16,48	20	15	TFN	A,B
14	2,08	1 x 1,63	0,38	0,10	2,59	23,17	35	25	THHN	A,B
12	3,31	1 x 2,05	0,38	0,10	3,01	34,16	40	30	THHN	A,C
10	5,26	1 x 2,59	0,51	0,10	3,81	55,04	55	40	THHN	A,D
8	8,34	1 x 3,26	0,76	0,13	5,04	91,22	80	55	THHN	A,B
16	1,31	19 x 0,30	0,38	0,10	2,46	17,95	20	15	TFN	A,B
14	2,08	19 x 0,38	0,38	0,10	2,86	23,80	35	25	THHN	A,B
12	3,31	19 x 0,47	0,38	0,10	3,31	35,70	40	30	THHN	A,C
10	5,26	19 x 0,60	0,51	0,10	4,22	56,20	55	40	THHN	A,D
8	8,37	7 x 1,23	0,76	0,13	5,47	93,70	80	55	THHN	A,B,E
6	13,30	7 x 1,55	0,76	0,13	6,43	141,30	105	75	THHN	A,E

Figura 28: Características conductores

Cuadro 12: Selección del calibre conductores

Sistema	Corriente	AWG
Paneles Fotovoltaicos	8.6A	16
Convertidor buck	13A	16
Banco baterías	12A	16
Rectificador	40A	12
Carga	52A	10

4.6.3 Selección de protecciones

4.6.3.1 Fusibles

Para la selección de fusibles del sistema fotovoltaico y del sistema gasificador de biomasa se parte de la siguiente expresión:

$$Corriente_{Fusible} = Corriente_{nominal} * 200 \% \quad (32)$$

Donde:

- Corriente nominal: Es la corriente nominal del sistema fotovoltaico y la corriente nominal del sistema gasificador de biomasa.
- Factor=200%: Es el factor de corriente máxima de cortocircuito para los sistemas de gasificador de biomasa y fotovoltaico.

- Corriente fusible: El valor nominal del fusible del sistema fotovoltaico y gasificador de biomasa.

De la ecuación 32 se tiene:

$$Valor_{FusibleGasificador} = 4 * 200 \% = 8 A$$

$$Valor_{FusibleFotovoltaico} = 12 * 200 \% = 24 A$$

El valor comercial del fusible para el sistema fotovoltaico se elige de 20A.

4.6.3.2 Disyuntor

Para la selección de disyuntores del sistema fotovoltaico y del sistema gasificador de biomasa se parte de la siguiente expresión:

$$Corriente_{Disyuntor} = Corriente_{nominal} * 150 \% \quad (33)$$

Donde:

- Corriente nominal: Es la corriente nominal del sistema fotovoltaico y la corriente nominal del sistema gasificador de biomasa.
- Factor=150 %: Es el factor de corriente máxima de sobrecarga para los sistemas de gasificador de biomasa y fotovoltaico.
- Corriente fusible: El valor nominal del disyuntor del sistema fotovoltaico y gasificador de biomasa.

De la ecuación 33 se tiene:

$$Valor_{DisyuntorGasificador} = 4 * 150 \% = 6 A$$

$$Valor_{FusibleFotovoltaico} = 12 * 150 \% = 18 A$$

El valor comercial del fusible para el sistema fotovoltaico se elige de 20A.

4.7 Construcción tablero eléctrico

1. Se elige un tablero de dimensiones 20x20x30 cm. y con fondo para colocar riel DIN, como muestra la figura 29
2. Se monta riel din sobre el doble fondo del tablero eléctrico.
3. Se realiza en montaje de los elementos y se procede a realizar el cableado de los mismos. En la figura 30 se muestra el montaje y conexión del sistema gasificador de biomasa; en la figura 31 se muestra el montaje y conexión del sistema fotovoltaico e interconexión de ambos sistemas.
4. Se construye un banco de cargas resistivas, para lo cual se utiliza lamparas halogenas de 35W, figura.



Figura 29: Tablero eléctrico del sistema



Figura 30: Montaje fusible, disyuntor y contactor sistema gasificador



Figura 31: Interconexión de S. Fotovoltaico y S. Gasificador

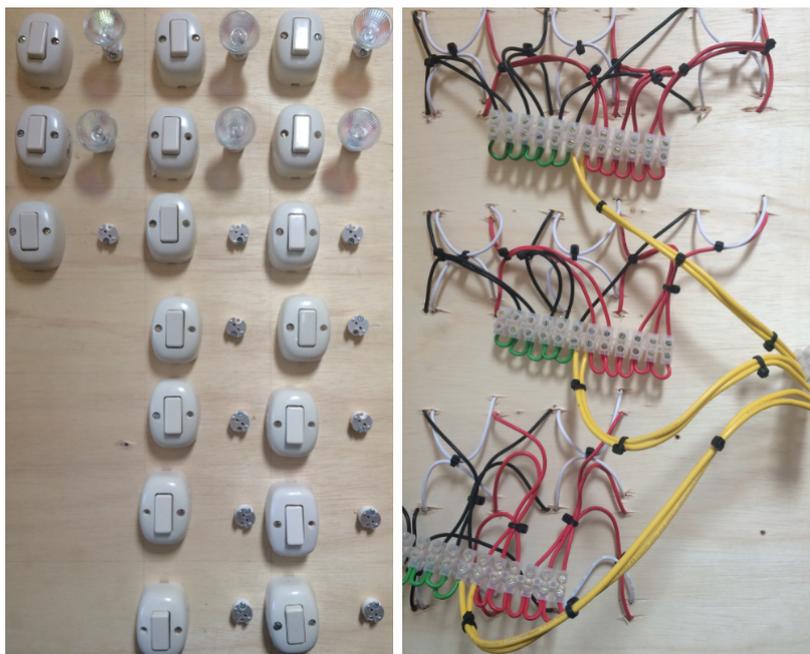


Figura 32: Cargas resistivas 35W

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Sistema de energía gasificador de biomasa

5.1.1 Generador a Gasolina

En el cuadro 13 se visualiza las mediciones de corriente y tensión del generador utilizando gasolina como combustible, con lo cual se determina la potencia máxima del generador.

$$Potencia_{Gasolina} = 625 W$$

Cuadro 13: Mediciones de corriente y tensión del generador a gasolina

Carga (W)	Corriente (A)	Tensión (V)
100	0.7	109.1
200	1.6	105.8
300	2.4	108.7
400	3.3	107.2
500	4.2	108.2
600	5.1	107.8
625	5.3	106.5

5.1.1.1 Gráfica Carga (W) vs. Corriente (A)

En la figura 33 se observa el comportamiento de la corriente con respecto a la carga, siendo directamente proporcional a la carga. La máxima corriente que el generador produce cuando se utiliza gasolina como combustible es:

$$Corriente_{Gasolina} = 5,3 A$$

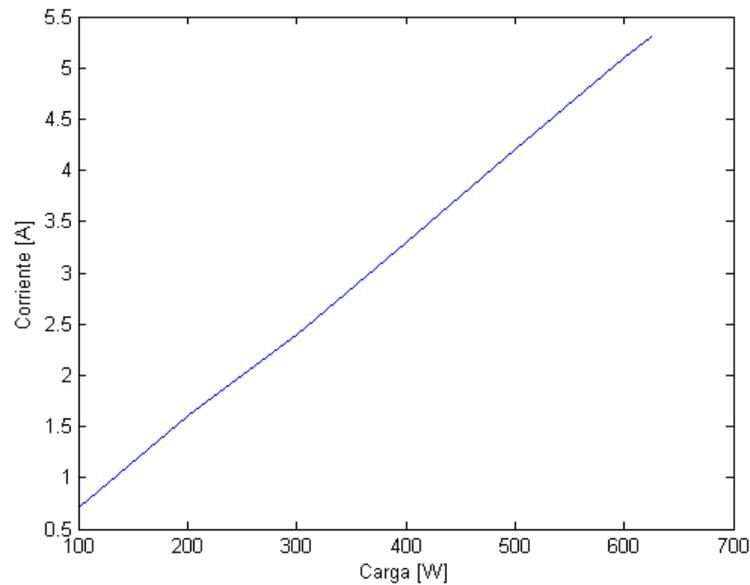


Figura 33: Corriente generador a gasolina

5.1.1.2 Gráfica Carga (W) vs. Tensión (V)

En la figura 34 se observa el comportamiento de la tensión con respecto a la carga, manteniéndose constante a la variación de la carga. La tensión promedio viene dado por la siguiente expresión:

$$V_{Promedio} = \frac{\sum Voltaje}{\#elementos} \quad (34)$$

$$V_{Promedio} = \frac{109,1 + 105,8 + 108,7 + 107,2 + 108,2 + 107,8 + 106,5}{7}$$

$$V_{Promedio} = 107.61 V$$

La desviación estándar de la tensión se calcula con la siguiente expresión;

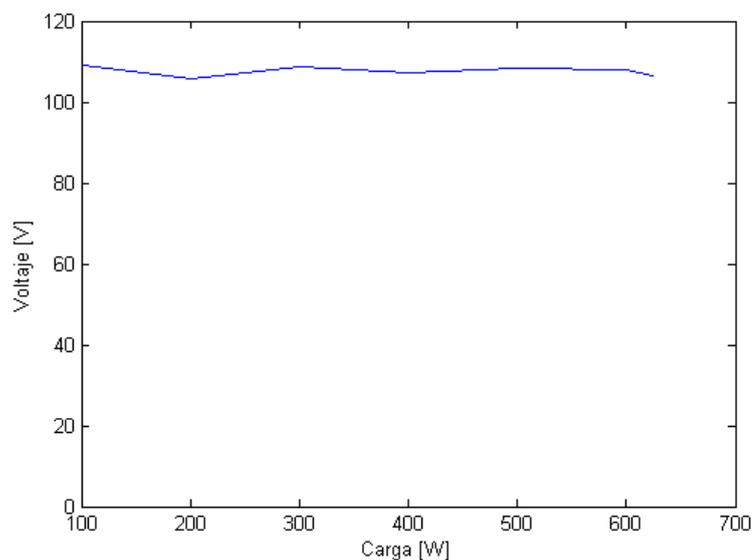


Figura 34: Tensión generador a gasolina

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2}}{n - 1} \quad (35)$$

$$\sigma = 1,19$$

La varianza de la tensión del generador utilizando gasolina como combustible, viene dado por la siguiente expresión:

$$\text{Varianza} : \sigma^2 = 1,41 \quad (36)$$

En la figura 35 se observa la distribución normal de la tensión del generador cuando utiliza como combustible gasolina.

5.1.2 Generador a Biogás

En el cuadro 14 se visualiza las mediciones de corriente y tensión del generador utilizando biogás como combustible, con lo cual se determina la potencia del generador con biogás como combustible:

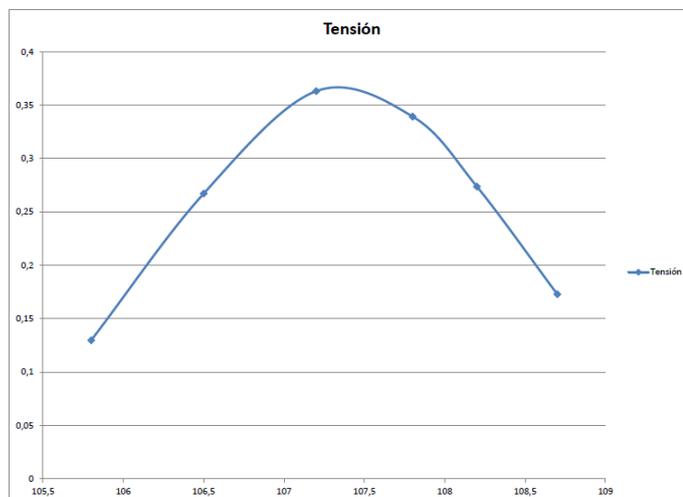


Figura 35: Distribución normal de la tensión del generador utilizando gasolina

$$Potencia_{Biogas} = 500 W$$

Cuadro 14: Mediciones de corriente y tensión del generador a biogás

Carga (W)	Corriente (A)	Tensión (V)
100	0.68	108.5
200	1.44	106.3
300	2.5	108.2
400	3.2	106.9
500	4.24	107.6

5.1.2.1 Gráfica Carga (W) vs. Corriente (A)

En la figura 36 se observa el comportamiento de la corriente con respecto a la carga, siendo directamente proporcional a la carga. La máxima corriente que el generador produce cuando se utiliza biogás como combustible es:

$$Corriente_{Biogas} = 4,24 A$$

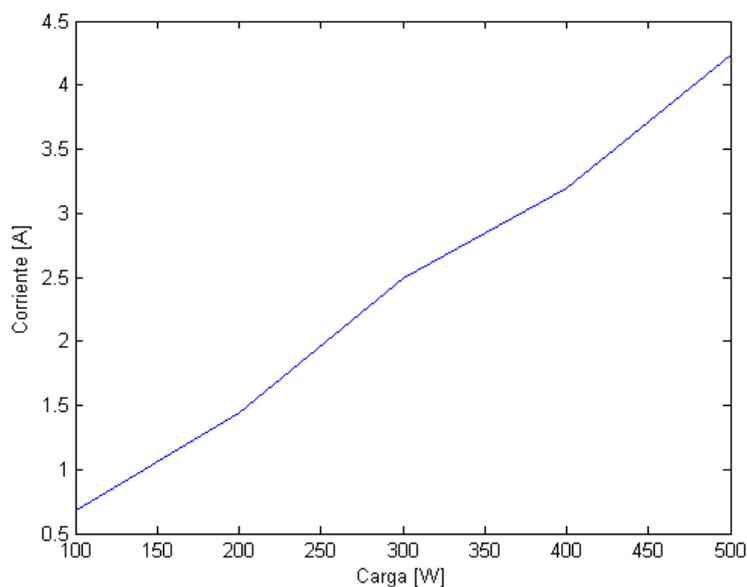


Figura 36: Corriente generador a biogás

5.1.2.2 Gráfica Carga (W) vs. Tensión (V)

En la figura 37 se observa el comportamiento de la tensión con respecto a la carga, manteniéndose constante a la variación de la carga. La tensión promedio viene dado por la ecuación 34:

$$V_{Promedio} = 107.5 V$$

De la ecuación 35 se obtiene la desviación estándar de la tensión cuando el generador utiliza biogás como combustible:

$$\sigma = 0,91$$

De la ecuación 36 se obtiene la varianza de la tensión:

$$Varianza : \sigma^2 = 0,83$$

En la figura 38 se observa la distribución normal de la tensión del generador cuando utiliza como combustible gasolina.

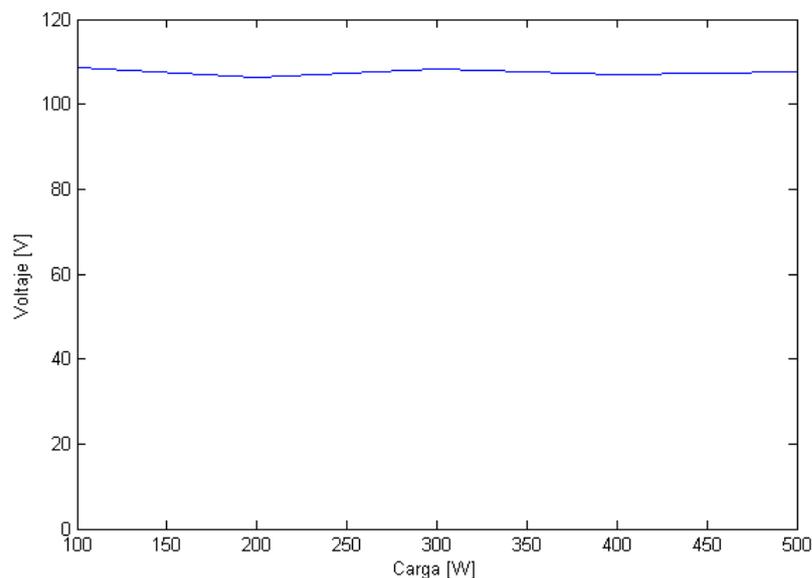


Figura 37: Tensión generador a biogás

5.1.2.2 Rendimiento generador a biogás vs. gasolina

El rendimiento del generador utilizando biogás como combustible en lugar de gasolina, viene dada por la siguiente expresión:

$$n = \frac{Potencia_{Biogas}}{Potencia_{Gasolina}} \quad (37)$$

$$n = \frac{500}{625} = 0,8$$

El rendimiento del generador con combustible biogás es del 80%.

5.1.3 Rectificador

5.1.3.1 Parámetros de entrada

En el cuadro 15 describe las mediciones de corriente de entrada al rectificador a un incremento de carga de 35W. Para determinar si la corriente entrada abastece en su totalidad la máxima carga del sistema.

En la figura 39 se describe el comportamiento de la corriente de entrada del

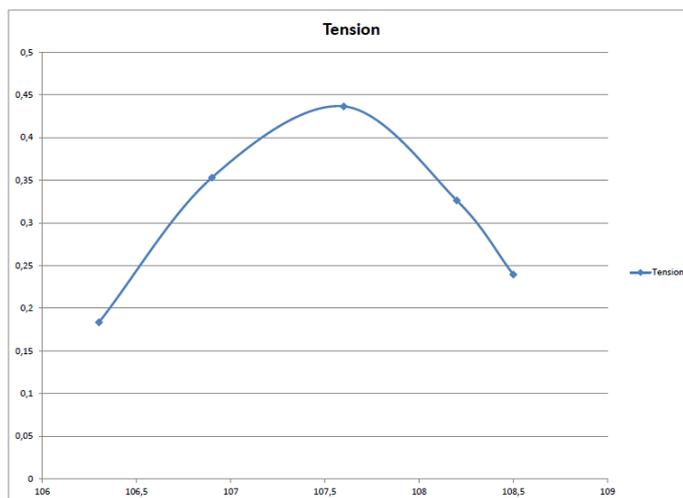


Figura 38: Distribución normal de la tensión del generador utilizando biogás rectificador a variaciones de carga, siendo directamente proporcional a la carga. La corriente máxima de entrada del rectificador es:

$$Corriente_{Entrada} = 4,08 A$$

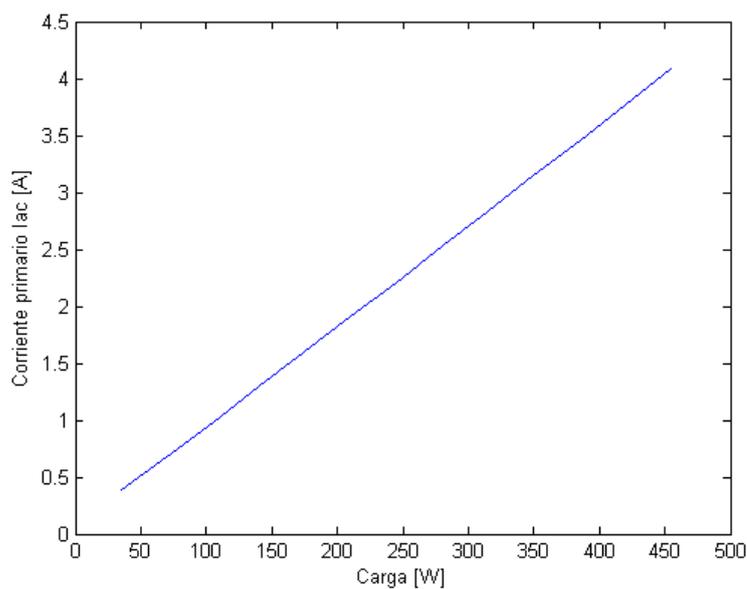


Figura 39: Corriente de entrada del rectificador

La corriente de entrada para suplir la corriente máxima del gasificador en

Cuadro 15: Corriente de entrada del rectificador

Carga (W)	Corriente Entrada Iac (A)
35	0.39
70	0.68
105	0.98
140	1.29
175	1.6
210	1.91
245	2.2
280	2.53
315	2.84
350	3.15
385	3.46
420	3.77
455	4.08

la carga es igual o menor a la corriente máxima de salida del generador cuando se utiliza biogás como combustible, lo cual indica que el sistema de gasificador puede suplir con la demanda de carga hacia el rectificador.

5.1.3.2 Parámetros de salida

En el cuadro 16 se visualiza las mediciones de corriente de salida y tensión del rectificador, con lo cual se determina la potencia del rectificador.

$$Potencia_{Rectificador} = 455 W$$

En la figura 40 se visualiza el comportamiento de la corriente a incrementos de carga, siendo directamente proporcional a la carga. Teniendo como corriente máxima:

$$Corriente_{Rectificador} = 37,94 A$$

En la figura 41 se observa el comportamiento de la tensión con respecto a la carga, manteniéndose constante a la variación de la carga. La tensión promedio viene dado por la ecuación 34:

Cuadro 16: Mediciones de corriente y tensión del rectificador

Carga (W)	Corriente Rectificador Idc (A)	Tensión (V)
35	3.11	11.74
70	6.07	11.68
105	8.96	11.63
140	11.88	11.59
175	14.78	11.55
210	17.67	11.5
245	20.48	11.45
280	23.46	11.41
315	26.36	11.36
350	29.25	11.31
385	32.15	11.27
420	35.05	11.22
455	37.94	11.17

$$V_{Promedio} = 11.45 V$$

De la ecuación 35 se obtiene la desviación estándar de la tensión del rectificador:

$$\sigma=0,18$$

De la ecuación 36 se obtiene la varianza de la tensión:

$$Varianza : \sigma^2=0,03$$

En la figura 42 se observa la distribución normal de la tensión del rectificador.

5.1.3.2 Eficiencia del rectificador

En el cuadro 17 se visualiza la potencia de entrada y de salida del rectificador, para determinar la eficiencia del rectificador se tiene la siguiente expresión:

$$Eficiencia = \frac{Potencia_{salida}}{Potencia_{entrada}} \quad (38)$$

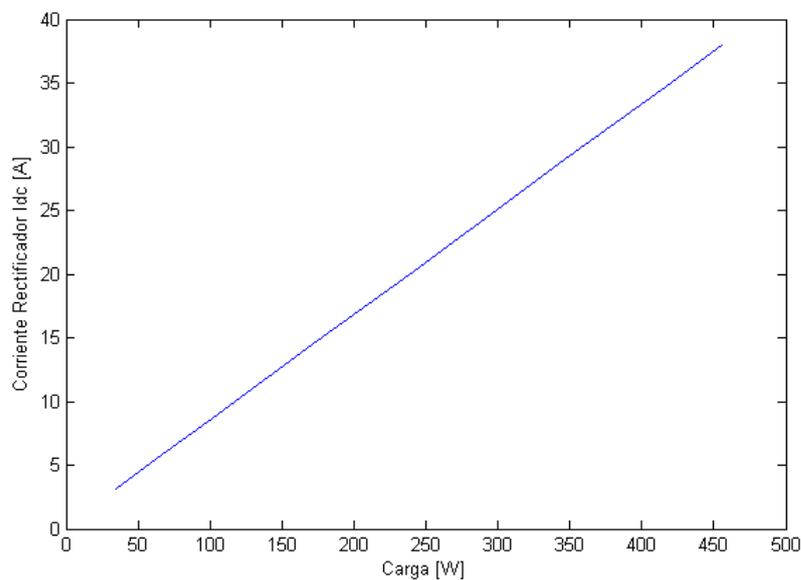


Figura 40: Corriente de salida del rectificador

En promedio la eficiencia del rectificador es del 91 %.

5.2 Sistema de energía fotovoltaico

5.2.1 Panel Fotovoltaico

En el cuadro 18 se observa las medidas de corriente y tensión del arreglo de paneles fotovoltaicos a incrementos de carga, con lo cual se puede determinar la potencia del arreglo de paneles fotovoltaicos.

$$Potencia_{Paneles} = 175 W$$

La potencia obtenida no es constante debido a las variaciones climatológicas, intensidad de radiación, ángulo de inclinación, etc. Por lo que la potencia que entrega los paneles fotovoltaicos pueden llegar a ser menores en cierto tiempo.

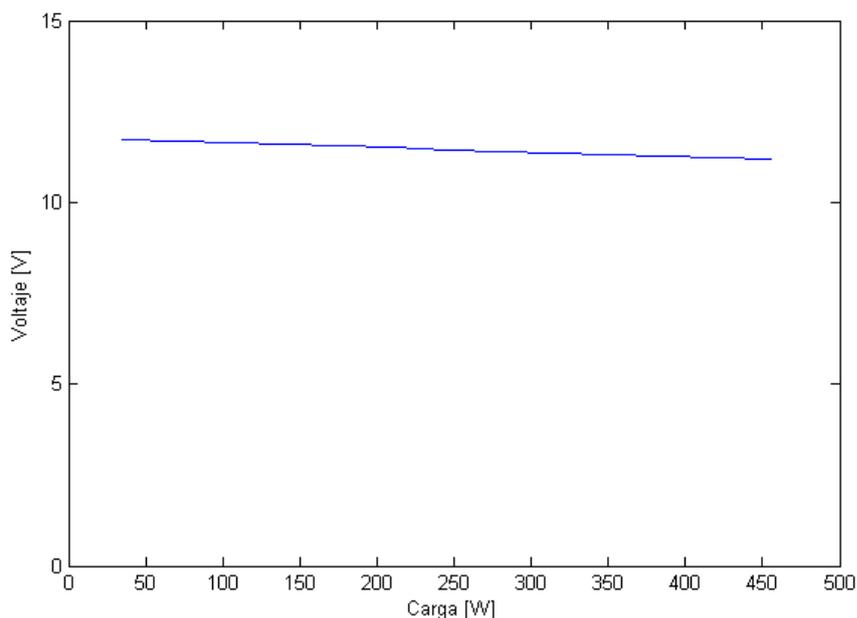


Figura 41: Tensión del rectificador

5.2.1.1 Gráfica Carga (W) vs. Corriente (A)

En la figura 43 se describe el comportamiento de la corriente del arreglo de paneles fotovoltaicos, siendo proporcional al incremento de carga, teniendo una corriente máxima:

$$Corriente_{Paneles} = 14,96 A$$

5.2.1.2 Gráfica Carga (W) vs. Tensión(V)

En la figura 44 se observa el comportamiento de la tensión con respecto a la carga, manteniéndose constante a la variación de la carga. La tensión promedio viene dado por la ecuación 34:

$$V_{Promedio} = 10.40 V$$

Existe una caída de tensión en los paneles mientras aumenta la carga y el comportamiento se debe a que el sistema para poder suplir la potencia que demanda

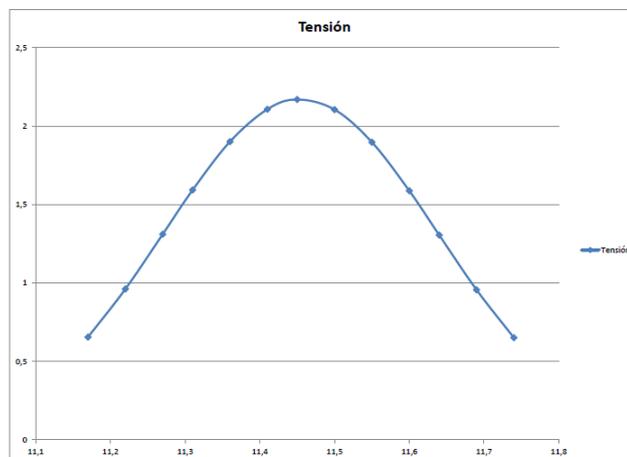


Figura 42: Distribución normal de la tensión del rectificador

la carga disminuye la tensión de la carga.

De la ecuación 35 se obtiene la desviación estándar de la tensión del rectificador:

$$\sigma=0,79$$

De la ecuación 36 se obtiene la varianza de la tensión:

$$\text{Varianza} : \sigma^2=0,63$$

En la figura 45 se observa la distribución normal de la tensión del rectificador.

5.2.2 Baterías

En el cuadro 19 se visualiza las mediciones de corriente y tensión del banco de baterías a un incremento de carga de 35W.

La potencia máxima de las baterías es superior a la mostrada, debido a que el sistema fue diseñado para tener un tiempo de descarga de 10 horas.

Las mediciones se realizaron cuando las baterías se encontraban cargadas, en el transcurso del tiempo y por su descarga los parámetros varían dependiendo del nivel de carga en el que se encuentren las baterías.

Cuadro 17: Eficiencia del rectificador

Carga (W)	Potencia Entrada (W)	Potencia Salida (W)	Eficiencia (%)
35	44.85	36.51	81
70	78.20	70.90	91
105	112.70	104.20	92
140	148.35	137.73	93
175	184.00	170.70	93
210	219.65	203.25	93
245	253.00	234.51	93
280	290.95	267.62	92
315	326.60	299.41	92
350	362.25	330.94	91
385	397.90	362.19	91
420	433.55	393.18	91
455	469.20	423.89	90

Cuadro 18: Mediciones de corriente y tensión del arreglo de paneles fotovoltaicos.

Carga (W)	Corriente (A)	Tensión (V)
35	3,02	11,4
70	5,9	10,9
105	8,92	10,4
140	11,94	9,9
175	14,96	9,4

5.2.2.1 Gráfica Carga (W) vs. Corriente (A)

En la figura 46 se describe el comportamiento de la corriente del banco de baterías, siendo proporcional al incremento de carga.

5.2.2.2 Gráfica Carga (W) vs. Tensión (V)

En la figura 47 se observa el comportamiento de la tensión con respecto a la carga, manteniéndose constante a la variación de la carga. La tensión promedio viene dado por la ecuación 34:

$$V_{Promedio} = 12.10 V$$

De la ecuación 35 se obtiene la desviación estándar de la tensión del rectificador:

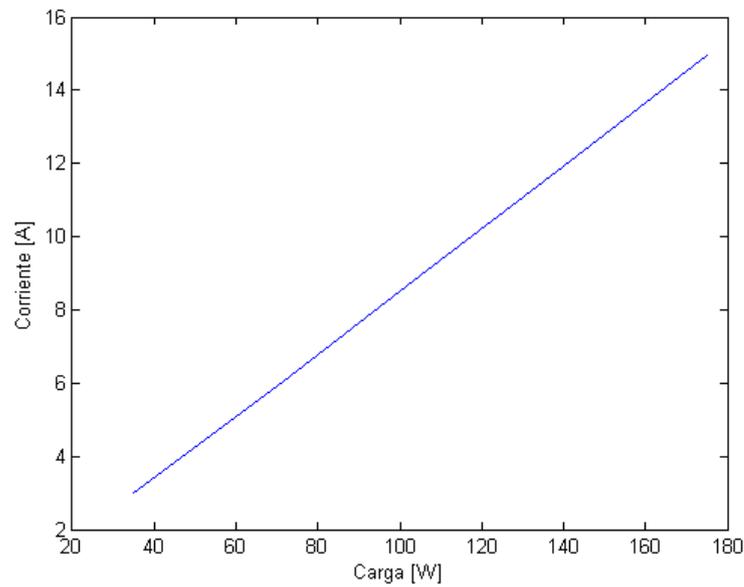


Figura 43: Corriente arreglo de paneles fotovoltaicos

Cuadro 19: Mediciones de corriente y tensión del banco de baterías

Carga (W)	Corriente (A)	Tensión (V)
35	3,20	12,27
70	6,21	12,14
105	9,19	12,03
140	12,11	11,94

$$\sigma=0,14$$

De la ecuación 36 se obtiene la varianza de la tensión:

$$\text{Varianza} : \sigma^2=0,02$$

En la figura 48 se observa la distribución normal de la tensión del rectificador.

5.3 Sistema híbrido de generación de energía baja carga

En el cuadro 20 se visualiza las mediciones del sistema híbrido de generación de energía cuando opera a baja carga.

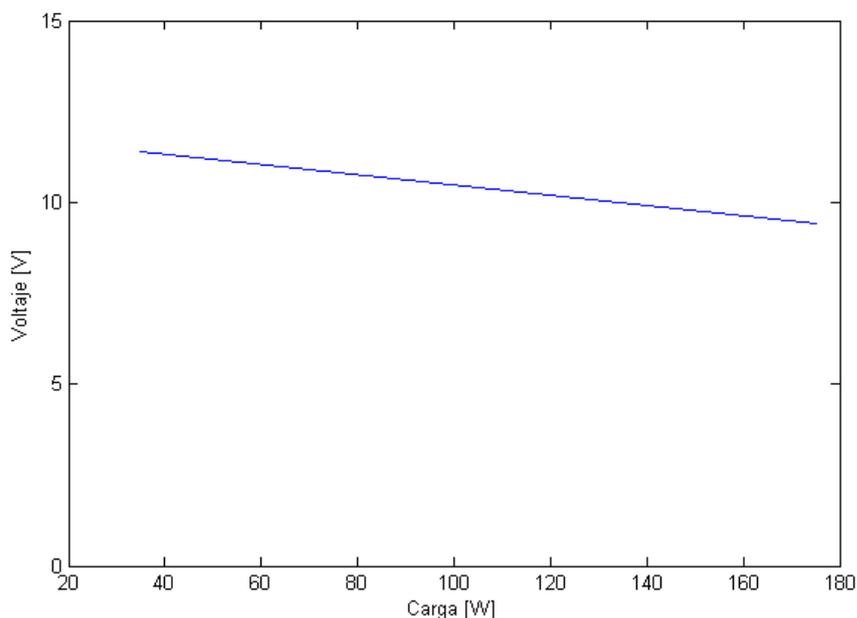


Figura 44: Tensión arreglo de paneles fotovoltaicos

Cuadro 20: Mediciones de corriente y tensión del sistema híbrido de generación de energía

Carga (W)	Corriente Gasificador (A)	Corriente Fotovoltaico (A)	Tensión (V)
35	0	3,20	12,27
70	0	6,21	12,14
105	0	9,19	12,03

El comportamiento del sistema indica que mientras opere únicamente con el sistema fotovoltaico, no circula una corriente en el gasificador ya que se encuentra en circuito abierto.

5.4 Sistema híbrido de generación de energía media carga

En el cuadro 21 se visualiza las mediciones del sistema híbrido de generación de energía cuando opera a media carga.

El comportamiento del sistema indica que cuando únicamente opere con el sistema gasificador de biomasa, no circula corriente en las baterías. Pese a este comportamiento las baterías continúan con su descarga natural en el tiempo.

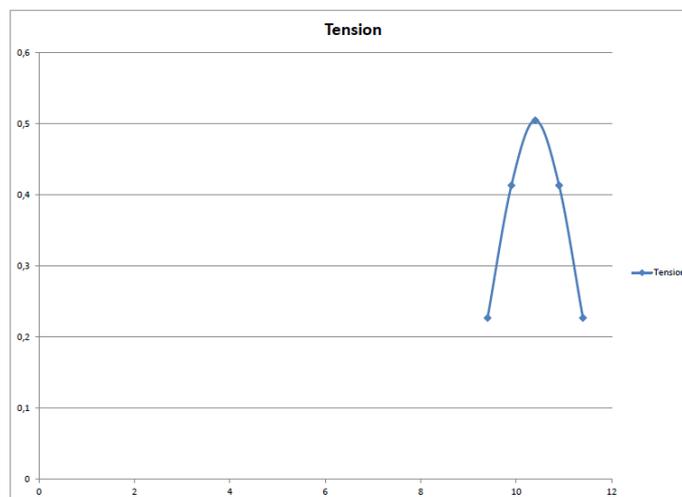


Figura 45: Distribución normal de la tensión del arreglo de paneles fotovoltaicos

Cuadro 21: Mediciones de corriente y tensión del sistema híbrido de generación de energía

Carga (W)	Corriente Gasificador (A)	Corriente Fotovoltaico (A)	Tensión (V)
140	11,88	0	11,60
175	14,78	0	11,55
210	17,67	0	11,5
245	20,48	0	11,45
280	23,46	0	11,41
315	26,36	0	11,36
350	29,25	0	11,31

5.5 Sistema híbrido de generación de energía plena carga

En el cuadro 22 se visualiza las mediciones del sistema híbrido de generación de energía cuando opera a plena carga.

El comportamiento del sistema indica que tanto el sistema del gasificador de biomasa como el sistema fotovoltaico aportan con una cantidad de corriente para poder suplir la demanda de la carga. Al incrementar carga incrementa la corriente en cada uno de los sistemas, y llega un punto en cual ambos sistemas se mantienen constantes. Si se llegara a aumentar mas carga al sistema corre el riesgo de tener caídas de tensión, caídas de corriente o que se active las protecciones de cada sistema con el fin de resguardar los sistemas.

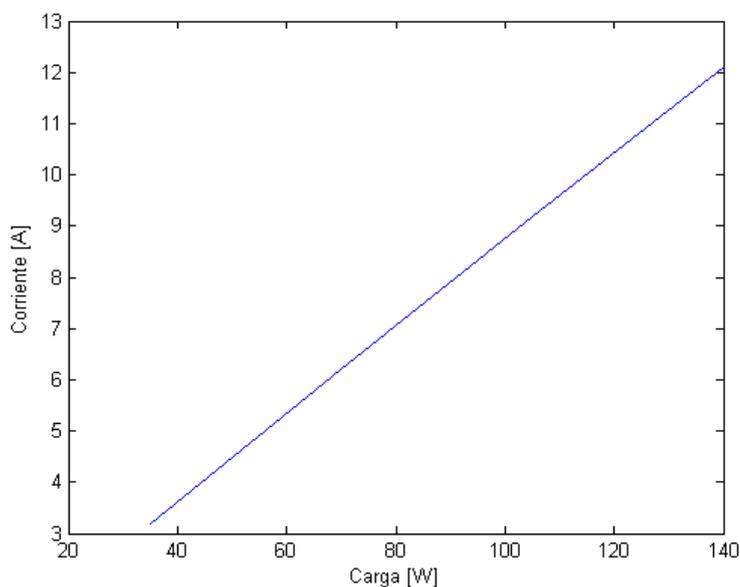


Figura 46: Corriente del banco de baterías

5.6 Sistema híbrido de generación de energía

En la figura 49 se visualiza el comportamiento de cada sistema individual mas el sistema híbrido. Donde se logra tener una estabilidad en la corriente de la carga, y las corrientes de los sistemas gasificador de biomasa y fotovoltaico aportan individualmente o van sumándose con el fin de mantener un comportamiento adecuado de la carga.

La tensión promedio viene dado por la ecuación 34:

$$V_{Promedio} = 11.45 V$$

De la ecuación 35 se obtiene la desviación estándar de la tensión del rectificador:

$$\sigma = 0,14$$

De la ecuación 36 se obtiene la varianza de la tensión:

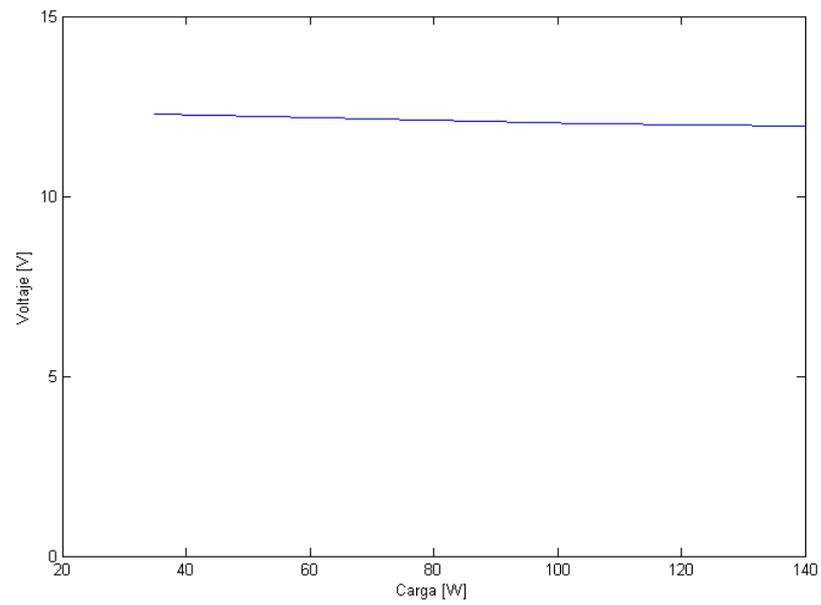


Figura 47: Tensión del banco de baterías

$$\text{Varianza} : \sigma^2=0,02$$

En la figura 50 se observa la distribución normal de la tensión del rectificador.

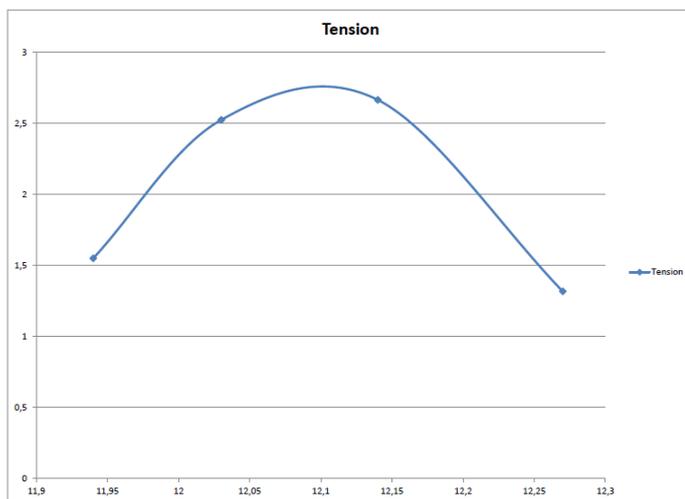


Figura 48: Distribución normal de la tensión del banco de baterías

Cuadro 22: Mediciones de corriente y tensión del sistema híbrido de generación de energía

Carga (W)	Corriente Gasificador (A)	Corriente Fotovoltaico (A)	Tensión (V)
385	23,83	7,57	11,24
420	26,83	7,77	11,21
455	29,83	7,42	11,17
490	31,63	8,13	11,11
525	34,93	8,08	11,08
560	37,94	8,17	11,03
595	37,94	10,91	11,24

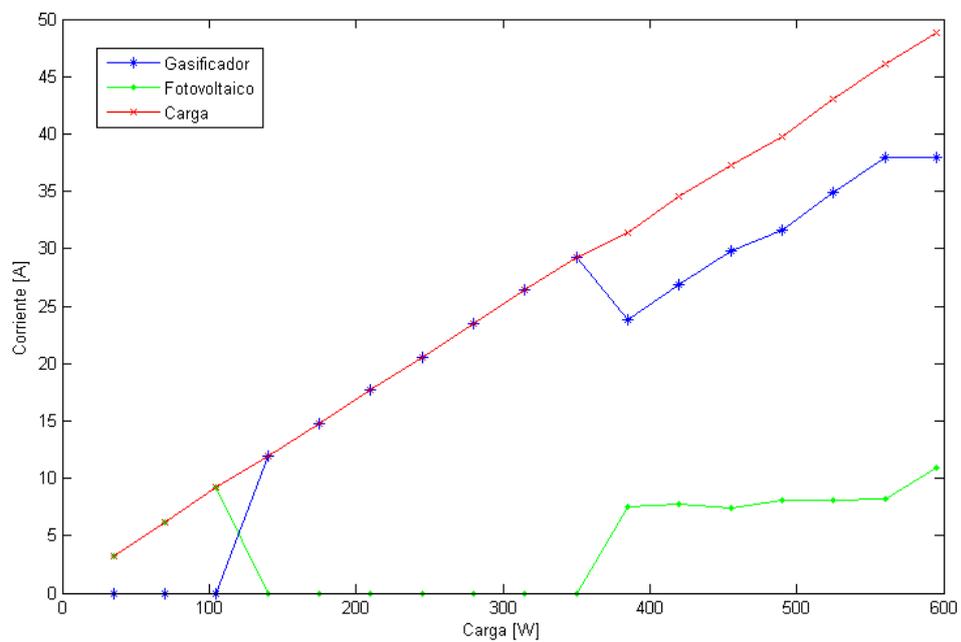


Figura 49: Comportamiento sistemas individuales y sistema híbrido de energía

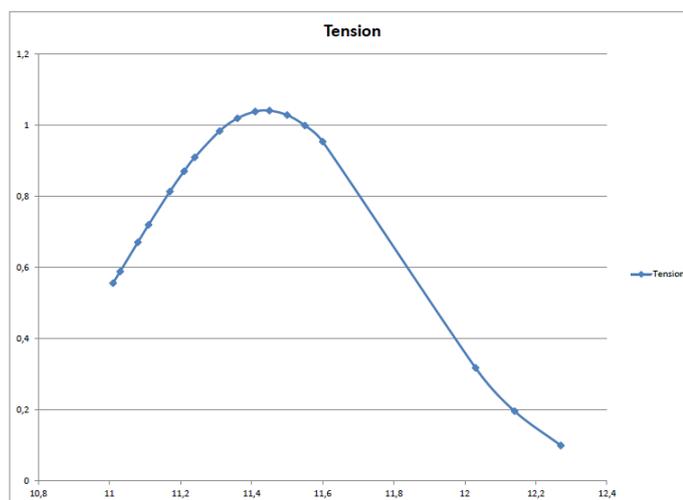


Figura 50: Distribución normal de la tensión del sistema híbrido de generación de energía

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Debido a la falta de experiencia en el campo de utilizar biogás como combustible en motores de combustión interna, se determinó la relación aire/combustible de manera experimental.
- El rendimiento del generador cuando se utiliza biogás como combustible es del 80 % respecto al generador utilizando gasolina como combustible. Este parámetro de rendimiento varía según el poder calorífico de la biomasa y su porcentaje de humedad.
- En el sistema fotovoltaico existente, se diseñó e implementó un convertidor dc-dc como control de carga baterías para almacenar energía y no depender de condiciones climáticas para disponer de energía. Además brinda al sistema mayor estabilidad respecto a los paneles fotovoltaicos.
- Para el acoplamiento de las fuentes de tensión se realizó en corriente continua DC por ser mas sencillo en su implementación debido a que el acoplamiento en corriente alterna AC se debe tener en cuenta que las fuentes tengan la misma amplitud y estar en fase ambas fuentes.
- Se optimizó el consumo de energía mediante un algoritmo de optimización del sistema híbrido de generación de energía con la finalidad de no sobrecargar un sistema y no agotar su fuente de energía, en el caso del sistema

gasificador la biomasa y en el caso del sistema fotovoltaico la energía almacenada en las baterías.

6.2 Recomendaciones

- Diseñar un sistema de extracción de biogás utilizando una bomba de succión de gas al vacío y sistema de inyección de aire mediante un soplador. De esta manera se podría realizar la relación de aire combustible adecuada a cualquier sistema de generación de energía en base a un biogás.
- Implementar una válvula reguladora de caudal y una válvula de alivio de presión con salida a un quemador del gas para evitar intoxicaciones por inhalación de gas y producir calor que puede ser aprovechado en sitios donde exista climas de baja temperatura.
- Contar con mayor cantidad de paneles fotovoltaicos y de mayor potencia para reducir el tiempo de carga de las baterías.
- Contar con un banco de baterías de mayor capacidad para suplir una mayor demanda energética.

Bibliografía

- [1] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. *Manuales sobre energía renovable: Biomasa*, 2002.
- [2] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *Energía de la biomasa*, 2007.
- [3] Subsecretaría de Energía Eléctrica Coordinación de Energías Renovables, Dirección Nacional de Promoción. *Energías Renovables - Energía Biomasa*, 2008.
- [4] Bayer. *Gasificación de Biomasa*. 2009.
- [5] Dirección Nacional de Promoción & Subsecretaría de Energía Eléctrica. *Coordinación de Energías Renovables*. 2008.
- [6] Nogués F. *Energía de la Biomasa*. 2010.
- [7] Castells X, García E, and De Santos D. *La Gasificación*. 2012.
- [8] Castro M. *Transporte de Momentum Y Calor. Teoría Y Aplicaciones a la Ingeniería de Proceso*. 2005.
- [9] Hernández F. *Producción de biogás con suero de queso: Tratamiento y generación de energía renovable a partir de lactosuero*. 2015.
- [10] Sanchez S. *Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones*. 2003.
- [11] All Power Labs. *Introducing the GEK Gasifier Systems*, 2012.

- [12] Lutool. *900W Gasoline Generators*. URL http://lutool.en.alibaba.com/product/618256373-214087019/900W_Gasoline_Generators.html.
- [13] Muhammand H and Rashid. *Electrónica De Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. 2008.
- [14] Isofoton. *I100*. URL <http://www.netbid.com/img/isofoton/isofoton.html#company>.
- [15] CSB BATTERY. *GPL 12120*, 2005. URL <http://www.csb-battery.com/upfiles/dow01404181923.pdf>.
- [16] Microchip. *Pic 16F877A*. URL <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582C.pdf>.
- [17] Allegro MicroSystems. *ACS712*. URL <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712.aspx>.
- [18] Kundur P. *Power System Stability And Control*. 1994.
- [19] Werner, Hans-Arno, and Jurgen R. *Electrónica De Potencia*. 1999.

ANEXO A

PROGRAMA DE CONTROL - CÓDIGO
C

ANEXO B

HOJAS TÉCNICAS - SENSOR ACS712

ANEXO C

HOJAS TÉCNICAS - BATERÍA CSB

ANEXO D

HOJAS TÉCNICAS - PANEL FOTOVOLTAICO