



Facultad de Ingeniería Eléctrica

Carrera Automática

Trabajo de Diploma

Título: Diseño de un sistema de control automático para el suministro de biocombustible a un grupo Electrónico.

Autor: Yulisandre Sosa Rodríguez

Tutor: Msc. Julio Fong Barrio

Santiago de Cuba
Junio del 2009
"Año de 50 Aniversario de la Revolución"

"La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica."

Aristóteles

Agradezco a todas las personas que de una forma u otra aportaron a la realización de este trabajo, en especial

A mi papá, Luís Emilio que en los últimos 23 años ha luchado para que yo llegara hasta aquí, con su perseverancia, empeño y dedicación.

A mi esposa, Lisbeth por su apoyo y comprensión.

Al resto de mi familia por la fe depositada en mi y su apoyo incondicional.

A mi tutor Julio Fong Barrio, por su entrega y dedicación que siempre estuvo dispuesto a brindar conocimiento aun estando operado.

A mis profesores por su aporte en mi formación como profesional. En especial al profesor José Antonio Pullés Boudet.

A mis compañero y amigos, en especial Javy, Yordanqui, Vlady, Yoiler y a todos los demás que han permitido que estos 5 años no fueran tan difíciles y sobre todo por ser amigos.

A todos muchas gracias.

Dedico este trabajo a mi padre Luis Emilio Sosa Aguilera, porque todo lo que he logrado en la vida se lo debo a él, a mi esposa, a mi mamá y familia en general por su apoyo y amor.

A mi profesor Julio Fong Barrio, a mis compañeros y amigos

Resumen

En este trabajo se propone el diseño básico del esquema de un regulador de velocidad para un grupo electrógeno alimentado con biocombustible procedente de una planta de generación de biogás. Este grupo electrógeno garantiza el suministro de energía eléctrica a la comunidad rural Magueyal del Municipio San Luís, provincia de Santiago de Cuba. La actividad fundamental de la comunidad es la pecuaria debido a que está ubicada en una zona donde la topografía del terreno es muy abrupta, lo que impide el desarrollo de las redes infraestructurales.

El objetivo del sistema que se propone es garantizar la calidad de la energía eléctrica que se genera manteniendo constante la velocidad del alternador frente a variaciones en la carga. Primeramente se hace una descripción del funcionamiento del motor acoplado al generador de corriente alterna (grupo electrógeno), teniendo en cuenta cuales son los parámetros fundamentales para el control de la velocidad.

Abstract

In this work we propose the basic design of the outline of a speed regulator for a generator powered by biofuel from a biogas generation plant. This generator supplies the electricity to the rural community Magueyal Municipality of San Luis, Santiago de Cuba province. The core activity of the community is livestock because it is located in an area where the topography is very steep, thus preventing the development of infrastructure networks.

The aim of the scheme proposed is to ensure the quality of the electrical energy is generated keeping the speed of the alternator against variations in load. First is a description of the operation of the engine coupled to a generator of alternating current (electrical), taking into account what are the key parameters to control speed.

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. Caracterizar el proceso de producción de energía eléctrica a partir de biomasa.....	3
1.1 Biomasa.....	3
1.1.1 Fuentes de biomasa.....	4
1.2 Procesos de conversión de la biomasa.....	6
1.3 Obtención del biogás a partir de biomasa para generación de electricidad.....	9
1.4 Características de la planta de generación de Magueyal.....	10
1.4.1 Biodigestores.....	11
1.4.2 Conducción del biogás.....	12
1.4.3 Filtro para la captación del sulfuro de hidrógeno en el biogás.....	12
1.4.4 Motor – generador.....	13
1.5 Descripción a grandes rasgos del proceso de obtención de energía eléctrica mediante los grupos electrógenos.....	14
1.6 Proceso de obtención de energía eléctrica a partir de la biomasa.....	15
1.7 Etapa de prueba y los resultados obtenidos en la planta con el uso del biogás.....	16
1.8 Regulación de la frecuencia.....	17
1.9 Análisis de las ventajas y desventajas del uso de biocombustible en la generación de energía eléctrica.....	19
Conclusiones.....	19
CAPÍTULO II. Diseño de un sistema de control de frecuencia a través del suministro de biogás.....	21
2.1 Definición de sistemas de control automático.....	21
2.2 Propuesta del sistema de control automático.....	22
2.3 Descripción del sistema de regulación de frecuencia.....	22
2.3.1 Fuente de alimentación.....	23
2.3.2 Transductor de frecuencia a voltaje.....	24
2.3.3 Tipos de Controladores.....	34
2.3.4 Convertidor de voltaje a corriente.....	39
2.3.5 Regulación del suministro de biogás.....	41
2.4 Resultados experimentales.....	42
2.5 Valoración económica.....	57
Conclusiones.....	60
CONCLUSIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS.....	65

INTRODUCCIÓN

Si se tiene en cuenta el alto costo que ha alcanzado el petróleo en el mercado internacional y si a esto se le suma la crisis económica en la que está sumido el mundo, el costo de la generación de la energía eléctrica resulta elevado. Por concepto de generación de energía eléctrica en nuestro país se gastan cientos de millones de dólares al año, presupuesto muy elevado para un país tercermundista como es Cuba. Por esta razón se ha hecho necesario buscar soluciones para eliminar o aminorar la dependencia de este recurso natural no renovable, dejando abiertos nuevos horizontes hacia la generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables.

En nuestro país se inició desde hace algún tiempo la batalla por el ahorro energético, lo que se ha convertido en una Revolución Energética sin precedente en Cuba. La instalación de los grupos electrógenos, la utilización más racional del gas acompañante del petróleo, el proceso de rehabilitación de las redes eléctrica en todo el territorio nacional, la sustitución de equipos eléctricos obsoletos por equipos más eficientes son algunas de las diversas medidas que en el país se han estado tomando para materializar la Revolución Energética. Hasta el momento se han instalado 205 grupos electrógenos que generan más de 250 000 Kw de potencia, y que en caso de averías de no representaría un problema para la distribución de la energía eléctrica en el Sistema Energético Nacional, gracias a que estos equipos tienen una distribución geográfica adecuada, lo que evita que se produzca alguna crisis y que se afecte a la población, en caso de eventos meteorológicos o de otras naturalezas. Estos grupos electrógenos tienen una disponibilidad mayor de un 90 por ciento, muy por encima del 60 por ciento de las plantas termoeléctricas con que cuenta nuestro sistema energético [18]. Luego de estas medidas, se han implementado distintas formas de generación de electricidad tratando siempre de que para ello se usen o se tengan en cuenta los recursos energéticos renovables para así eliminar la dependencia del petróleo, ejemplos de estos recursos es la energía eólica, solar, hidráulica y biocombustible [9]. Uno de los biocombustibles de interés es generado a partir del estiércol de animales u otras biomásas productos de los desechos que se generan en la agricultura o en procesos industriales de alimentos. El costo de producción de este recurso es ínfimo en comparación con el costo que tiene el petróleo en el mercado internacional, además permite reducir el impacto ambiental.

Este trabajo se ha desarrollado para ser instalado en el grupo electrógeno de la comunidad rural Magueyal del Consejo Popular Chamarreta–Perdenal del Municipio San Luís constituida por 198 habitantes, de estos 83 hombres, 76 mujeres y 38 niños, de los adultos 18 son personas mayores de 60 años, distribuidos en 75 viviendas de estas 64 están electrificadas, cuenta además con una escuela primaria y un consultorio médico de la familia. Su actividad fundamental es la ganadería pecuaria ubicada en un lugar donde la topografía del terreno es muy abrupta, lo que ha impedido que se desarrollaran las redes infraestructurales.

Este grupo electrógeno debido a modificaciones y transformaciones mecánicas el mismo es capaz de trabajar con biogás, un recurso renovable. Aunque la idea es muy prometedora es necesario la presencia de un personal el 100% del tiempo pendiente de la velocidad de rotación del generador para que no varíe el voltaje y la

frecuencia que se le suministra a la población, por cuanto esta velocidad depende de la carga conectada, siendo la misma muy variable. Es necesario acotar que la velocidad nominal del motor acoplado al generador es de 1800rpm, para garantizar la tensión de generación de 230V y 60Hz. **Para mantener el motor trabajando a su velocidad nominal se ha decidido controlar la frecuencia de generación, este parámetro del sistema constituye la variable controlada y como variable manipulada el suministro de biogás al motor del grupo generador.**

En este trabajo se propone el diseño de un sistema de control automático para mantener la frecuencia de generación en un rango deseado, es decir el control de la velocidad del motor, lo cual se logra variando el suministro de combustible mediante la regulación de la presión de este.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto se plantea el diseño de investigación que se expone a continuación.

Problema de la investigación: Limitaciones en el control de la velocidad de rotación de un motor a través de la regulación del suministro de biocombustible.

Objeto de la investigación: El actual control de velocidad de un motor en un grupo electrógeno alimentado con biocombustible.

Objetivo de la investigación: El diseño de un prototipo para el control de frecuencia y montaje en protoboard de algunos bloques.

Campo de acción: El control de la frecuencia en un grupo electrógeno alimentado con biocombustible.

Hipótesis: Si se desarrolla un regulador capaz de controlar el suministro de biocombustible al grupo electrógeno se resolvería la calidad de la energía generada, la eficiencia del sistema y se simplificaría el trabajo de los operadores de la planta.

Tareas de investigación:

1. Caracterizar el proceso de generación de energía eléctrica a partir de biomasa.
2. Analizar la importancia de la regulación de frecuencia.
3. Analizar el control a través de la presión de biogás (combustible) de los motores de cuatro tiempos empleados en la generación de corriente eléctrica.
4. Diseño de un sistema de control de frecuencia a través del suministro de biogás
5. Comprobación experimental de los bloques montados en protoboard.
6. Corroborar la propuesta mediante la valoración de expertos.

CAPÍTULO I. Caracterizar el proceso de producción de energía eléctrica a partir de biomasa.

Introducción.

En la búsqueda de una solución para eliminar el alto consumo o reducir la dependencia del petróleo se han explotado nuevas formas de generación de electricidad, para abastecer la alta demanda de la población. En la actualidad el 80% de la energía mundial, se produce a partir de los recursos no renovables, aunque es digno de resaltar, que en casi todos los países, sobre todo los del tercer mundo se está llevando a cabo una fuerte lucha para que esta cifra vaya disminuyendo paulatinamente. Por otra parte, el 20% restante se obtiene a partir de recursos renovables, tales como el viento, el sol, el caudal de agua de un río o una presa y por último, pero no menos importante el aprovechamiento de los desechos que se obtienen de la ganadería, la agricultura y del hombre, llamados biomasa [9]. ¿Como se obtiene energía eléctrica a partir de estos desechos? Para dar respuesta a esta interrogante en el capítulo I se hace una breve reseña de la procedencia, obtención y explotación de los biocombustibles y específicamente el biogás a partir de las materias primas antes mencionadas, además se expone algunas de las características fundamentales del grupo de generación con el que se trabaja.

1.1 Biomasa.

¿Qué es la biomasa?

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía, o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego [5].

Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas pues en ellos se producen residuos (rastros) que normalmente son dejados en el campo y se consume sólo un bajo porcentaje de ellos con fines energéticos. En la agroindustria, los procesos de secado de granos generan subproductos que son usados para generación de calor en sistemas de combustión directa; tal es el caso del bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de café y de arroz. Por otro lado, los centros urbanos generan grandes cantidades de basura, compuestas en gran parte por materia orgánica que puede ser convertida en energía después de ser procesada adecuadamente.

Actualmente, los procesos modernos de conversión solamente suplen el 3% del consumo de energía primaria en países industrializados. Sin embargo, gran parte de la población rural en los países subdesarrollados que representa cerca del 50% de la población mundial, aún depende de la biomasa tradicional, principalmente de leña como fuente de energía primaria. Esta suple

aproximadamente el 35% del consumo de energía primaria en países subdesarrollados y alcanza un 14% del total de la energía consumida a nivel mundial [4] .

Se considera que la biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del Sol. A través del proceso de fotosíntesis, la clorofila de las plantas captura su energía, y convierte el dióxido de carbono (CO₂) del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman regresan a su forma de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen. Entonces se produce en forma sostenida o sea, en el mismo nivel en que se consume por tanto esa batería durará indefinidamente.

Los recursos biomásicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como desechos agrícolas y forestales, plantas acuáticas, desechos animales y basura urbana. Su disponibilidad varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etc. por eso, los correspondientes aspectos de infraestructura, manejo y recolección del material, deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso en el que se deseen explotar.

1.1.1 Fuentes de biomasa.

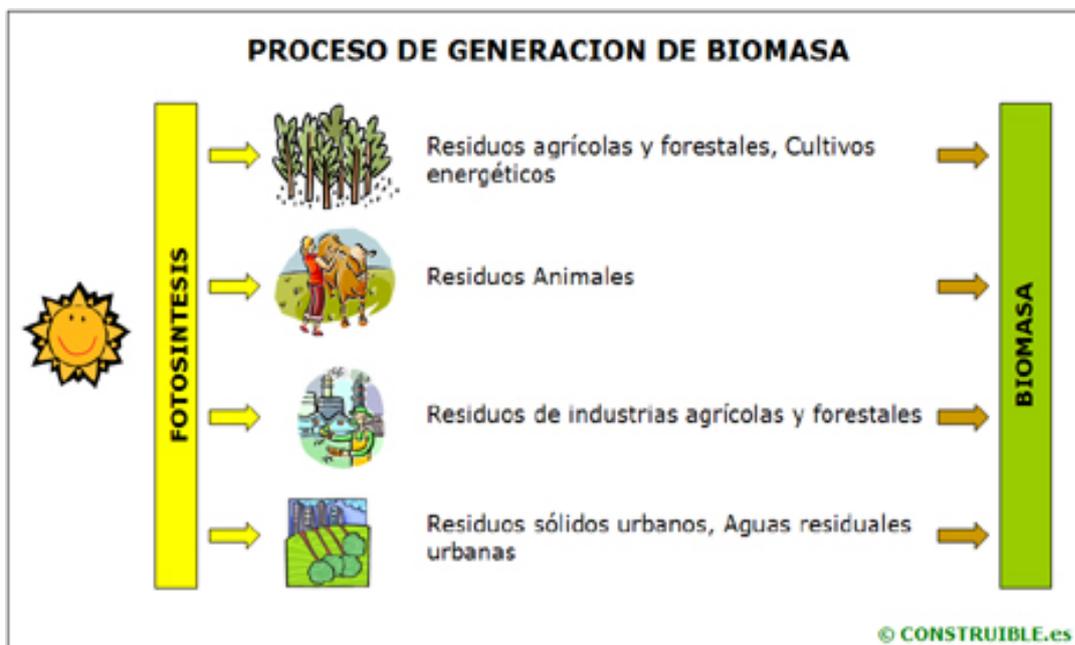


Figura 1.1 Fuentes de obtención de biomasa.

Las fuentes de biomasa que pueden ser usadas para la producción de energía cubren un amplio rango de materiales y fuentes tales como residuos de la industria forestal y la agricultura, los desechos urbanos y las plantaciones energéticas. Estas biomasas se usan generalmente para procesos que involucran la generación de energía a gran escala, enfocados hacia la sustitución de combustibles fósiles.

Residuos forestales.

Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que su potencial energético es mucho mayor, y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín.

La mayoría de los desechos de aserrío son aprovechados para generación de calor en sistemas de combustión directa; en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor. Los desechos de campo, en algunos casos, son usados como fuente de energía por comunidades aledañas, pero la mayor parte no es aprovechada por el alto costo del transporte.

Desechos agrícolas.

La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): se estima que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en desechos de proceso, entre 20% y 40%. Al igual que en la industria forestal, muchos residuos de la agroindustria son dejados en el campo. Aunque es necesario, reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía. Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el café y la caña de azúcar.

Por otro lado, las granjas producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficio de su valor nutritivo. Esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

Desechos industriales.

La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos.

Desechos urbanos.

Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La mayoría de los países centroamericanos carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas; sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación.

Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético, que puede ser utilizado para la generación de energía “limpia”.

En el corto y mediano plazo, la planificación urbana deberá incluir sistemas de tratamiento de desechos, que disminuyan eficazmente las emanaciones nocivas de los desechos al ambiente, dándoles un valor de retorno por medio del aprovechamiento de su contenido energético, pues aproximadamente el 80% de toda la basura orgánica urbana puede ser convertida en energía [3].

1.2 Procesos de conversión de la biomasa.

A continuación se presentan los procesos de conversión de biomasa más relevantes, los mismos se pueden clasificar en tres categorías:

- Procesos de combustión directa.
- Procesos termo-químicos.
- Procesos bio-químicos.

Procesos de combustión directa.

Esta es la forma más antigua y más común, hasta hoy, para extraer la energía de la biomasa. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad. Las tecnologías de combustión directa van desde sistemas simples, como estufas, hornos y calderas, hasta otros más avanzados como combustión de lecho fluidizado.

Procesos termo-químicos.

Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un valor calorífico mayor, los cuales hacen más conveniente su utilización y transporte.

Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. Dependiendo de la tecnología, el producto final es un combustible sólido, gaseoso, o líquido.

Procesos bio-químicos.

Estos procesos utilizan las características bio-químicas de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbiales para producir combustibles gaseosos y líquidos. Son más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termo-químicos. Los más importantes son:

Digestión anaeróbica: la digestión de biomasa humedecida por bacterias en un ambiente sin oxígeno (anaeróbico) produce un gas combustible llamado biogás. En el proceso, se coloca la biomasa (generalmente desechos de animales) en un contenedor cerrado (el digestor) y allí se deja fermentar; después de unos días, dependiendo de la temperatura del ambiente, se produce un gas, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La materia remanente dentro del digestor, es un buen fertilizante orgánico, que puede ser utilizado en la agricultura. También se pueden utilizar aguas negras y mieles como materia prima, proceso que sirve para tratar el agua y evitar el efecto contaminante.

Combustibles alcohólicos: de la biomasa se pueden producir combustibles líquidos como etanol y metanol. El primero se produce por medio de la fermentación de azúcares y, el segundo por la destilación destructiva de madera. Esta tecnología se ha utilizado durante siglos para la producción de licores y, más recientemente, para generar sustitutos de combustibles fósiles para transporte. Estos combustibles se pueden utilizar en forma pura o mezclados con otros, para transporte o para la propulsión.

Biodiesel: a diferencia del etanol que es un alcohol, el biodiesel se compone de ácidos grasos y ésteres alcalinos, obtenidos de aceites vegetales, grasa animal y grasas recicladas. A partir de un proceso llamado “transesterificación”, los aceites derivados orgánicamente se combinan con alcohol (etanol o metanol) y se alteran químicamente para formar ésteres grasos como el etil o metilo éster. Estos pueden ser mezclados con diesel o usados directamente como combustibles en motores comunes. El biodiesel es utilizado, típicamente, como aditivo del diesel en proporción del 20%, aunque otras cantidades también sirven, dependiendo del costo del combustible base y de los beneficios esperados. Su gran ventaja es reducir considerablemente las emisiones, el humo negro y el olor.

Gas de rellenos sanitarios: se puede producir un gas combustible de la fermentación de los desechos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios. Este es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La fermentación de los desechos y la producción de gas es un proceso natural y común en los rellenos sanitarios; sin embargo, generalmente este gas no es aprovechado. Además de producir energía, su exploración y utilización reduce la contaminación y el riesgo de explosiones en estos lugares y disminuye la cantidad de gases de efecto invernadero.

En la Tabla 1.1 se muestra una distribución de los procesos de conversión aplicables, de acuerdo con las características y el tipo de biomasa, así como los posibles usos finales de la energía convertida:

Tabla 1.1 Procesos aplicables a las biomásas.

Tipo de biomasa	Características físicas	Procesos de conversión aplicables	Producto final	Usos
Materiales orgánicos de alto contenido de humedad.	Estiércoles. Residuos de alimentos. Efluentes industriales. Residuos urbanos.	Digestión anaeróbica y fermentación alcohólica.	Biogas. Metanol. Etanol. Bio diesel.	Motores de combustión. Turbinas de gas. Hornos y calderas. Estufas domésticas.
Materiales lignocelulósicos (cultivos energéticos, residuos forestales de cosechas y urbanos).	Polvo Astillas Pellets Briquetas Leños Carbón vegetal	Densificación Combustión directa Pirólisis Gasificación	Calor, Gas pobre Hidrógeno Biodiesel	Estufas domésticas Hornos y calderas Motores de combustión Turbinas de gas

Actualmente, la combustión directa es el proceso más aplicado para usos energéticos de la biomasa. Procesos más avanzados como la gasificación y la digestión anaeróbica, han sido desarrollados como alternativas más eficientes y convenientes; sin embargo, hasta la fecha, la aplicación de estos últimos no son tan comunes, ya que tienen un costo más alto con respecto a los otros, pero a su vez, son una vía de ahorro con respecto al uso de los hidrocarburos.

Aplicando los diferentes procesos de conversión, la biomasa se puede transformar en diferentes formas de energía como se muestra en la Figura 1.2.

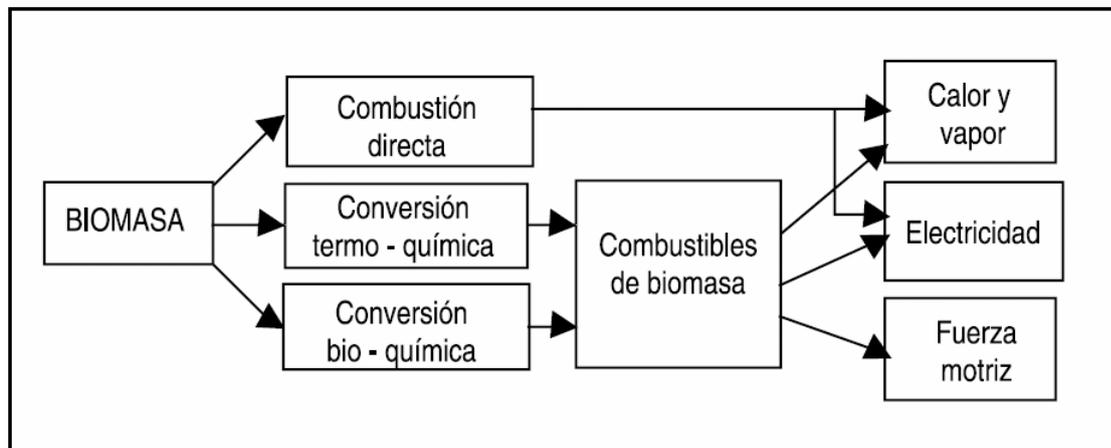


Figura 1.2. Procesos de conversión y formas de energía

Para la humanidad es de interés desarrollar los procesos de generación de energía mediante la utilización de las biomasa de desechos tanto industriales como sanitarios, por cuanto permite la utilización de fuentes de energía renovable y la reducción de la contaminación ambiental. Sin embargo resulta perjudicial a la humanidad y al ambiente la utilización de madera en la combustión directa o de productos alimenticios para la producción de combustibles alcohólicos o biodiesel [8].

1.3 Obtención del biogás a partir de biomasa para generación de electricidad.

Biogás: Con este término se designa a la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica (biomasa) realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias [5], [3], [4], [12].

Este proceso de fermentación microbiana con ausencia de oxígeno genera gases como el metano y el dióxido de carbono. Se utiliza principalmente para la fermentación de la biomasa húmeda del tipo de residuos ganaderos o aguas residuales urbanas, siendo el producto combustible final obtenido, el biogás.

El biogás se produce en un recipiente cerrado o tanque denominado biodigestor el cual puede ser construido con diversos materiales, como ladrillo y cemento, metal o plástico. El biodigestor, de forma cilíndrica o esférica posee un ducto de entrada a través del cual se suministra la materia orgánica (estiércol animal o humano, las aguas negras de las ciudades, residuos de las industrias) en forma conjunta con agua, y un ducto de salida en el cual el material ya digerido por acción bacteriana abandona el biodigestor. Los materiales que ingresan y abandonan el biodigestor se denominan afluente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás. En la figura 1.3 se muestran reservorios de biogás de plásticos (polipropileno).



Figura 1.3. Reservorios para el almacenamiento del biogás.

Composición del biogás.

Los principales componentes del biogás son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂). Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada, teniendo en cuenta las variaciones anteriormente expuestas se presentan, a continuación en la tabla 1.2:

Tabla 1.2. Composición del biogás.

Metano, CH ₄	40 - 70% volumen
Dióxido de carbono, CO ₂	30 - 60
Sulfuro de hidrógeno, H ₂ S	0 - 3
Hidrógeno, H ₂	0 - 1

El metano, principal componente del biogás, es el gas que le confiere las características combustibles al mismo. El valor energético del biogás por lo tanto, estará determinado por la concentración de metano - alrededor de 20 – 25 MJ/m³, comparado con 33 – 38MJ/m³ para el gas natural.

A pequeña y mediana escala, el biogás ha sido utilizado en la mayor parte de los casos para cocinar en combustión directa en estufas simples. Sin embargo, también puede ser utilizado para iluminación, para calefacción y como reemplazo de la gasolina o el acpm (combustible diesel) en motores de combustión interna. Esta última aplicación es la más importante para el trabajo que se está desarrollando.

El biocombustible puede ser utilizado como combustible para motores diesel y a gasolina, a partir de los cuales se puede producir energía eléctrica por medio de un generador. En el caso de los motores diesel, el biogás puede reemplazar hasta el 80% del acpm, debido a la baja capacidad de ignición del biogás, que no permite reemplazar la totalidad del diesel en este tipo de motores, los que carecen de bujía para la combustión. Aunque en los motores a gasolina el biogás puede reemplazar la totalidad de la misma, en general en los proyectos a nivel agropecuario se le ha dado preferencia a los motores diesel considerando que se trata de un motor más resistente y que se encuentra con mayor frecuencia en el medio rural.

1.4 Características de la planta de generación de Magueyal.

Durante el segundo semestre del 2006, el Centro de Estudios de Eficiencia Energética dio inicio a un proyecto para la utilización del biogás como reemplazo del combustible diesel en el motor del grupo de generación, que garantiza el suministro de energía eléctrica a la comunidad rural Magueyal del Municipio San Luís.

Para la obtención y aprovechamiento de este biogás se construyeron algunas instalaciones necesarias para el proceso, las que serán descritas a continuación.

1.4.1 Biodigestores.

La estructura de los digestores es de hormigón con cúpula fija, cóncava en su parte superior. La capacidad para almacenar el cieno es de 126 m³ y el almacenaje del gas en los reactores es 49 m³, los dos digestores están interconectados, que en caso de estancamiento pueden ser vaciados sin dificultad. Su estructura es fuerte, hermética y les da la garantía de no presentar fisuras como consecuencia de los movimientos tectónicos. Además, se efectuaron pruebas hidráulicas y neumáticas. El movimiento de la masa de cieno es a través del propio biogás, pues en cada columna insertada en el hormigón hay tubos que por medio de ellos se introducen gas hasta 1.5 atmósfera de presión, que mueve la masa de cieno contenido en ambos digestores. En la figura 1.4 se muestran la estructura y dimensiones que tienen los biodigestores.

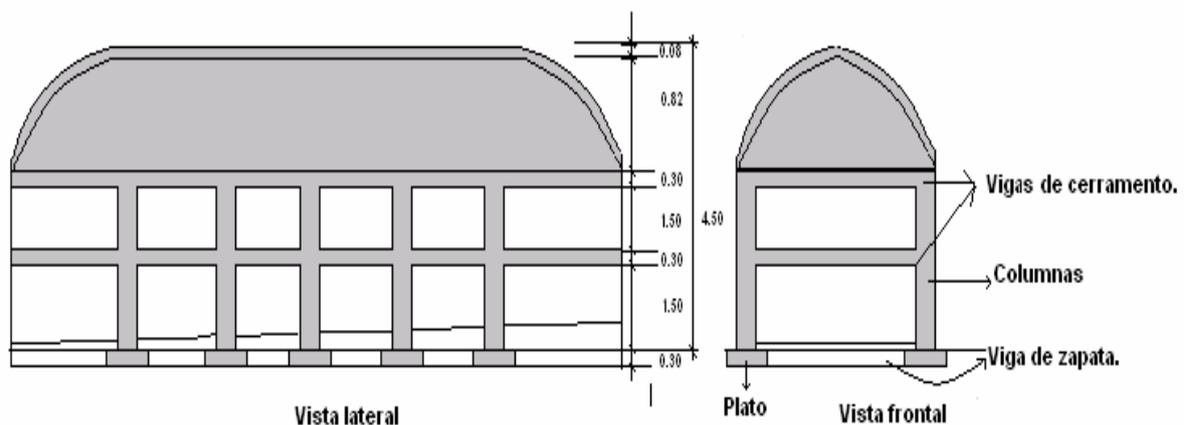


Figura 1.4 Estructura y dimensiones de los biodigestores.

Digestor No. 1.-

- Volumen total: 83.24 m³
- Volumen de la cámara de fermentación: 59.78 m³
- Volumen de almacenamiento de biogás: 23.56 m³

Digestor No. 2

- Volumen total: 91.26 m³
- Volumen de la cámara de fermentación: 65.73 m³
- Volumen de almacenamiento de biogás: 25.53 m³



Figura 1.5 Foto de los digestores y el gasómetro de Magueyal.

La planta cuenta con un gasómetro independiente de 29 m^3 (Figura 1.5) de capacidad que admite 20 atmósferas de presión y otra bala pequeña de 1 m^3 , que admite 8 atmósferas. Un compresor actuará para extraer el gas producido en los reactores y trasladarlo al gasómetro.

Luego la necesidad de biogás para la planta que nos ocupa de acuerdo a las horas de trabajo son las siguientes:

Para 8 horas de trabajo----- 57.6 m^3

Para 12 horas de trabajo----- 86.4 m^3

1.4.2 Conducción del biogás.

Cada biodigestor esta equipado con un orificio para la salida del biogás. Ambas salidas se unen por medio de tubería de $\frac{3}{4}''$ y a partir de este punto el biogás es filtrado, comprimido y almacenado en el gasómetro para luego ser convertido en energía.

1.4.3 Filtro para la captación del sulfuro de hidrógeno en el biogás.

En el biogás se encuentran cantidades variables de sulfuro de hidrógeno (H_2S), también denominado ácido sulfhídrico. El H_2S al reaccionar con agua, se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4) sustancia altamente corrosiva que puede ocasionar graves daños en el motor. Con el fin de eliminar o disminuir el porcentaje de H_2S en el biogás se emplean, sistemas de filtro con sustancias como cal viva o apagada, limadura de hierro o ciertos tipos de tierras conocidas como hematites parda o

limonita, por ser ricas en sustancias ferrosas. El filtro se instaló, en la línea de conducción biodigestor-planta. Para el filtrado se rellenaron pequeños gasómetros (Figura 1.6) en 2/3 partes con limadura de hierro y el tercio restante con esponjilla de hierro utilizada para la limpieza doméstica de utensilios de cocina. El biogás ingresa por la parte inferior del filtro y lo abandona por su parte superior. El H₂S es atrapado por el material ferroso formándose sulfuro de hierro [5], [13].



Figura 1.6. Filtros del biogás en la instalación de Magueyal.

1.4.4 Motor – generador.

A partir del reservorio, el biogás es conducido por tubería hacia el motor. Se realizaron los ajustes necesarios para que el biogás, ingrese al interior del filtro de aire, de tal manera que el motor aspire el biogás necesario conjuntamente con el aire que debe entrar a este para la combustión.

El grupo de generación que suministra la electricidad a la comunidad tiene las siguientes características:

Motor:

- motor: MWM- DITER
- Tipo: D 327-2
- Ciclo de trabajo: 4 tiempos
- Sistema de combustión: Inyección directa.
- Lubricación: Circulación forzada de aceite.
- Refrigeración: Por aire
- Número de cilindros: 2
- Diámetro del cilindro: 100 mm.

- Carrera del pistón: 120mm.
- Cilindrada: 1,885 litros.
- R.p.m.: 1800
- CV: 19.32
- Consumo de combustible. gr / CVh =196+5% ó 4.50 l / h
- Contenido de aceite del carter cigüeñal: 4.5 + 1
- Juego de válvulas, motor frió: 0.2 mm
- Presión de aceite en velocidad nominal-mínimo:2Kg/cm²
- Ajuste del interruptor de advertencia de presión de aceite:0.5 – 0.8 Kg/cm²
- Presión de aceite a ralenti: mínimo 0.5 Kg/cm²
- Generación: 14.4 Kw.

Generador:

- Marca: Stanford
- Modelo: UC – 270
- Potencia nominal: 14.4 Kw
- Número de fases: 3 (Trifásico)
- Voltaje de salida: Conexión a 380 VCA
- Velocidad de rotación: 1800 r.p.m.
- Número de polos: 4

1.5 Descripción a grandes rasgos del proceso de obtención de energía eléctrica mediante los grupos electrógenos.

Un grupo electrógeno es un equipo técnico destinado a la generación de energía eléctrica y que generalmente trabaja en modo aislado; el mismo está compuesto por un motor de cuatro tiempos al cual se le acopla un generador que produce a partir de la variación de los campos magnéticos la energía eléctrica. La energía eléctrica generada es consumida directamente en los hogares cercanos y por los consumidores que se encuentran distantes mediante transformadores de potencia.



Figura 1.7. Dispositivo de alimentación (Izquierda) y grupo electrógeno (Derecha).

Inicialmente este grupo electrógeno no podía ser automatizado, debido a las características físicas que posee el dispositivo de suministro de biogás diseñado en el Centro de Estudios de Eficiencia Energética, mostrado en la figura 1.7 para la alimentación del motor. Esto está dado por la imposibilidad de poder conectar el regulador a dicho dispositivo y por consiguiente la imposibilidad de cerrar el lazo de control. **Por lo tanto este dispositivo debe ser perfeccionado para proponer una primera versión automatizada del control de frecuencia en la generación de electricidad.**

1.6 Proceso de obtención de energía eléctrica a partir de la biomasa.

El proceso tecnológico de obtención de energía eléctrica en la instalación de Magueyal se muestra en la figura 1.8. [5]

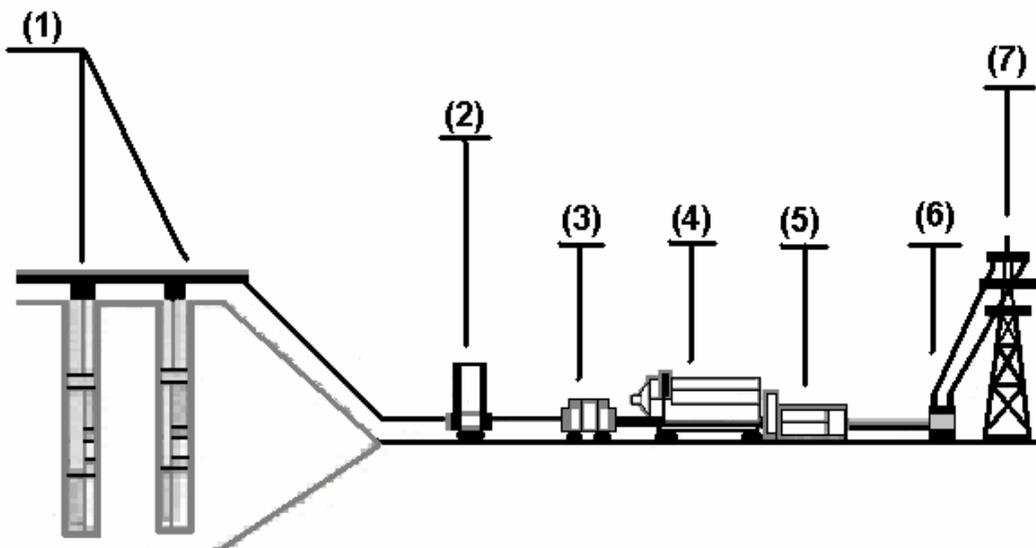


Figura 1.8. Esquema del proceso de obtención de energía eléctrica.

La instalación está constituida por los bloques que se muestran a continuación.

- (1) Biodigestores y reservorio. El primer paso es obtener el biogás, a partir de las biomásas almacenadas en los digestores que se muestra en la figura, luego el biogás es almacenado en el reservorio situado encima de los biodigestores para su posterior consumo.
- (2) Filtro. En esta etapa se procede a filtrar el biogás, como ya se ha explicado antes, para eliminar algunas sustancias que pueden dañar el equipo.
- (3) Compresor. La compresión del biogás es una de las etapas más importantes del proceso, porque la presión con la que se mueve el biogás por las tuberías, no cumple con las necesidades del motor para trabajar al régimen que se desea. El biogás tiene mucho menos calorías que el diesel por lo que se necesita una masa mayor de biogás para poder igualar este parámetro y esto sólo sucede si se comprime el gas.

- (4) Motor. El motor toma el biogás mezclado con aire conjuntamente a una pequeña cantidad de diesel los que mediante la combustión son transformados de energía química en los pistones a energía mecánica a la salida del mismo.
- (5) Generador. En esta etapa es donde se obtiene la energía eléctrica a partir de la energía mecánica.
- (6) y (7) Transformadores y Red eléctrica. Para la transmisión de la energía eléctrica hasta los consumidores que se encuentran distantes de la planta se usan los transformadores de potencia.

1.7 Etapa de prueba y los resultados obtenidos en la planta con el uso del biogás.

Este grupo electrógeno comenzó a trabajar con biogás, el 23 de julio del 2006 y se tomaron los datos hasta el 23 de Diciembre.

- Días trabajados: 156
- Horas de servicio electricidad: 1185.6
- Promedio diario de horas de electricidad: 7.6
- Consumo horario de diesel: 1,41
- Diesel consumido en la etapa: 1671.69 litros/h
- Diesel que se hubiese consumido con 4 horas de trabajo diario sin biogás: 3120 litros /horas
- Ahorro de diesel: 1448.31 litros
- Horas de entrega de electricidad en 156 días a 4 horas diarias: 624
- Horas adicionales aportadas de suministro eléctrico con biogás: 561.6
- Consumo de diesel para 7.6 horas de trabajo durante 156 días sin biogás: 5928 litros.
- Ahorro: 4256.31

Debido a los resultados tan alentadores que se han obtenido en este proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biogás, aún con un grupo generación de 22 años de explotación y teniendo en cuenta los beneficios ambientales y la disminución de la dependencia de un recurso primeramente no renovable y segundo muy caro de procedencia extranjera, ya que en nuestro país el petróleo no es de la mejor calidad. Se decidió aprobar un presupuesto mayor para este proyecto con el objetivo de remodelar el equipamiento existente en la que se incluye la automatización del suministro del biogás.

Esto trajo acarreado la sustitución del viejo grupo electrógeno para buscar una potencia de generación mayor, el cambio de compresor, la construcción de otro filtro para elevar el por ciento de metano en el gas y un nuevo digester, dichas construcciones están todavía en la fase de planeamiento. La fabricación de un

nuevo digester y la potencia de generación mayor están vinculadas a la ambiciosa meta de poder suministrar a la comunidad energía eléctrica las 24 horas del día. En la figura 1.9 se muestra el nuevo grupo de generación, que tiene una potencia de generación de 20 KW, con el cual, se propone en este trabajo una primera versión automatizada del control de frecuencia mediante el suministro de biogás a través de un aditamento que permite el acoplamiento del sistema de regulación automática, el cual se muestra en la figura 1.10.



Figura 1.9 Grupo electrógeno actual



Figura 1.10 alimentador de biogás actual

Este dispositivo fue construido por el profesor investigador Dr. Luís García Faure de la facultad de Ingeniería Mecánica (FIM), ahorrándole al proyecto un saldo de 9000 dólares que es el costo que tiene este dispositivo en el mercado internacional.

En la actualidad la Dirección de Comunales del Municipio de San Luís le entrega a la instalación 1.67 litros de combustible diesel y el Grupo Electrógeno consume sólo 1.41 litros por hora, produciéndose un ahorro de la cantidad entregada.

1.8 Regulación de la frecuencia.

La frecuencia, en un sistema eléctrico de corriente alterna, está directamente relacionada con la velocidad de giro, es decir, con el número de revoluciones por minuto del rotor del alternador [10]. Esto es:

$$n = 60 \frac{f}{p} \text{ [rpm]}$$

Donde:

n = velocidad en rpm del generador.

f = frecuencia en Hz.

p = número de pares de polos.

Las variaciones de velocidad se traducen en variaciones de la frecuencia y de la tensión a la salida del generador. Por esta razón es importante la regulación automática de estos parámetros, mediante un sistema con respuesta rápida, confiable y de bajo costo.

En los grandes sistemas eléctricos, dado que la frecuencia es común a toda la red, los generadores conectados a ella girarán de manera sincrónica a la misma velocidad angular eléctrica. La frecuencia nominal de la tensión de la red en nuestro país es de 60Hz.

En condiciones normales de funcionamiento, la capacidad de generación conectada a una red eléctrica es superior al consumo. Para ello, se mantiene una reserva de energía rodante, es decir, una capacidad no utilizada que puede compensar las variaciones bruscas de carga y mantener la frecuencia dentro de un margen de tolerancia establecido.

Pueden darse los dos casos siguientes:

1. La carga es superior a la generación. En este caso, la frecuencia disminuye. Su velocidad de caída dependerá:
 - De la reserva de energía rodante.
 - De la constante de inercia de los generadores conectados a la red.

En tales condiciones, si la disminución de la frecuencia se sitúa por encima del margen de tolerancia y el operador del sistema de regulación no es capaz de responder de forma suficientemente rápida para detener la caída de la misma, puede llegar a producirse un colapso en el sistema.

Asimismo, un incremento brusco de la carga hará que el alternador pierda algo de velocidad. En tal caso, el operador del sistema de regulación al detectar esas variaciones de velocidad y suministra energía mecánica adicional, esto se logra abriendo la válvula de entrada de biocombustible. Así, se alcanza un nuevo equilibrio entre carga y generación.

2. La carga es inferior a la generación. En este caso, la frecuencia aumenta. El equilibrio se establece mediante un proceso análogo al anterior, actuando sobre los sistemas de regulación de los alternadores para disminuir su capacidad de generación. El equilibrio se alcanza de forma más sencilla que en el caso anterior. La relación entre la variación de carga y la variación de frecuencia depende del número y capacidad de los generadores conectados a la red. Es más desfavorable en sistemas aislados, que en grandes redes interconectadas, como es el caso en el que se trabaja. En los grupos electrógenos el efecto es muy importante no sólo por hallarse aislados de la red, sino además por el bajo valor de potencia instalada.

Efectos producidos por las variaciones de la frecuencia.

En los márgenes normales de tolerancia, el principal efecto de las variaciones de frecuencia es el cambio en la velocidad de las máquinas rotativas.

En tales condiciones pueden producirse los siguientes fenómenos:

- Los motores transmiten más o menos potencia.
- Cuando disminuye la velocidad del generador, disminuye a su vez la capacidad de refrigeración del mismo (menor flujo de aire a través de los bobinados y partes).
- Las pérdidas en el hierro varían en forma proporcional al valor de la frecuencia.

También tiene efecto sobre otros equipos:

- Los filtros de armónicos sufren un efecto distorsionador.
- Los equipos electrónicos que utilizan la frecuencia como referencia de tiempo se ven alterados.
- El motor del sistema de generación se ve sometido a fuertes vibraciones que suponen un severo esfuerzo de fatiga.

1.9 Análisis de las ventajas y desventajas del uso de biocombustible en la generación de energía eléctrica.

Desventajas:

Por su naturaleza, la biomasa tiene una baja densidad relativa de energía; es decir, se requiere de grandes volúmenes para producir potencia en comparación con los combustibles fósiles, por lo que la transportación y manejo encarecen el proceso y aumenta el costo de producción por KW. La clave para dar solución a este problema, es ubicar el proceso de conversión cerca de las fuentes de producción de biomasa, como aserraderos, centrales azucareros y granjas, cochiqueras, vaquerías. Donde los desechos de aserrío, el bagazo de caña y las excretas de animales puedan ser utilizados [7].

En caso de que la combustión sea incompleta se produce materia orgánica, monóxido de carbono (CO) y otros gases. La producción y el procesamiento de la biomasa, pueden requerir de grandes insumos, como combustible para vehículos y fertilizantes, lo que da como resultado, un balance energético reducido en el proceso de conversión. Es necesario minimizar, el uso de estos insumos y maximizar los procesos de recuperación de energía.

Aún no existe una plataforma económica y política generalizada para facilitar el desarrollo de las tecnologías de biomasa. Los precios de la energía, no compensan los beneficios ambientales de la biomasa o de otros recursos energéticos renovables. El potencial calórico de la biomasa es muy dependiente de las variaciones, en el contenido de humedad, clima y la densidad de la materia prima.

Por ello es necesario, que los grupos electrógenos sean construidos en las afueras de las ciudades y pueblos para evitar la contaminación de gases y de ruidos.

Ventajas:

- El contenido en azufre de los gases de su combustión es escaso.
- No liberan partículas en su combustión
- La producción de cenizas es reducida.
- Contribuyen a la conservación del ciclo del CO₂.
- Puesto a que el metano que desprenden las biomásas es usado en la combustión se elimina así una de las sustancias que están provocando el efecto invernadero.
- En el proceso de obtención de biogás, las biomásas empleadas para ello se pueden emplear como un magnifico fertilizante que no daña el suelo y no desprende sustancias no deseadas.

Conclusiones.

En el presente capítulo se ha demostrado que la utilización del biogás en motores diesel para generación de electricidad trae acarreado importantes beneficios económicos y ambientales este último de importancia vital. Aunque los resultados económicos no se pueden generalizar, pues cambiarán de acuerdo a las circunstancias de cada lugar y las características de la biomasa. Esto se evidencia en la sustitución de hasta un 80% del diesel. Se caracteriza la planta de generación para establecer las condiciones existentes para una posterior propuesta de un sistema de regulación de frecuencia que mejore la señal de tensión que se le suministra a la población, así como las condiciones de trabajo del operador.

CAPÍTULO II. Diseño de un sistema de control de frecuencia a través del suministro de biogás.

Introducción.

Con el estudio realizado en el capítulo anterior se puede observar que el proceso de generación de energía eléctrica en el grupo generador situado en la localidad ya mencionada no cuenta con un sistema de control que mantenga el valor de la frecuencia a la salida del alternador en un valor determinado. Puesto que el control de frecuencia que se realiza en el GE, actualmente es manual (a lazo abierto), pues existe un frecuencímetro que mide de forma constante la frecuencia, y en caso de variación este indica si es un ascenso o un descenso en la frecuencia, luego el operador actúa de forma manual sobre una válvula para contrarrestar la variación anterior y llevar la frecuencia a su valor nominal.

En este capítulo se tiene como objetivo proponer un sistema de control automático que mantenga la frecuencia en un valor constante, mejorando de esta forma la calidad de la energía generada y las condiciones de trabajo del operador.

2.1 Definición de sistemas de control automático.

Para poder hablar de sistemas de control, primeramente es necesario conocer algunos conceptos. Por otra parte conocer también los elementos que integran estos sistemas, ya que existen variedades de sistemas de control pero no todos son útiles para este trabajo. El sistema implementado en estos momentos en la planta generadora es a lazo abierto.

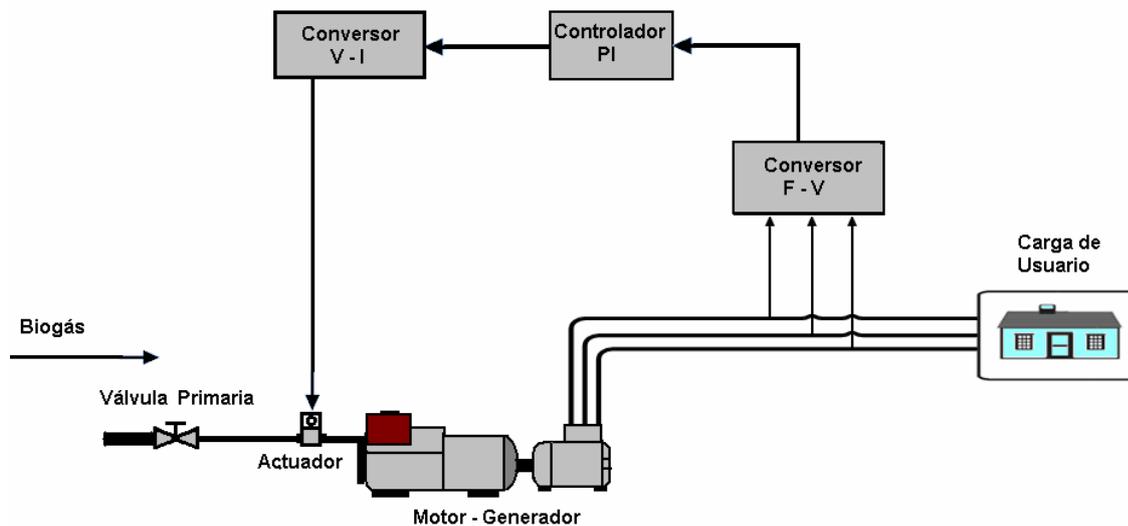
Sistemas de control de lazo abierto: estos son sistemas en los que la salida no tiene efecto sobre la acción de control, es decir, en un sistema de control de lazo abierto la salida ni se realimenta para comparación con la entrada. Este sistema es el que actualmente está trabajando en la planta de generación objeto de análisis.

Sistema de control de lazo cerrado: es aquel que la señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control. Es decir, los sistemas de control de lazo cerrado son sistemas realimentados. La señal del error actuante, que es la diferencia entre la señal de entrada y la de realimentación entra al detector o control para reducir el error y llevar la salida del sistema al valor deseado.

Viendo que el sistema de control de lazo cerrado es la solución al problema existente en el grupo de generación podemos plantear entonces que:

El sistema de regulación automática que se propone es un sistema realimentado en el que la salida deseada varía lentamente en el tiempo, y donde su tarea fundamental consiste en mantener la salida en el valor deseado a pesar de las perturbaciones presentes [2].

2.2 Propuesta del sistema de control automático.



Figur

a 2.1. Esquema en bloque del sistema de control propuesto.

El sistema de control que se propone (Figura 2.1) tiene como objetivo mantener la frecuencia en un valor constante para ello se toman muestras de la frecuencia del voltaje a la salida del generador. Esta muestra es tomada por un transformador reductor para obtener a la salida de este el voltaje que se requiere por los bloques electrónicos dispuestos en la placa. El primer bloque del circuito electrónico es el convertidor de frecuencia en voltaje. La tensión de salida del transductor de frecuencia se compara con una tensión de referencia y el resultado de la comparación se aplica al circuito controlador PI implementado en el trabajo. Luego esta señal es convertida a corriente por el convertidor de voltaje a corriente XTR110, ahora se tiene una corriente que es proporcional a la frecuencia de entrada esta corriente es enviada al actuador que regula la alimentación de biogás al motor.

2.3 Descripción del sistema de regulación de frecuencia.

El sistema de control de frecuencia está compuesto por un circuito eléctrico (Figura 2.2) que por su magnitud se divide en bloques para su mejor comprensión.

- Bloque 1: Transformadores y fuentes de alimentación.
- Bloque 2: Conversor de frecuencia a voltaje.
- Bloque 3: Controlador PI.
- Bloque 4: Convertidor de voltaje a corriente.
- Bloque 5: Regulación del suministro de biogás.

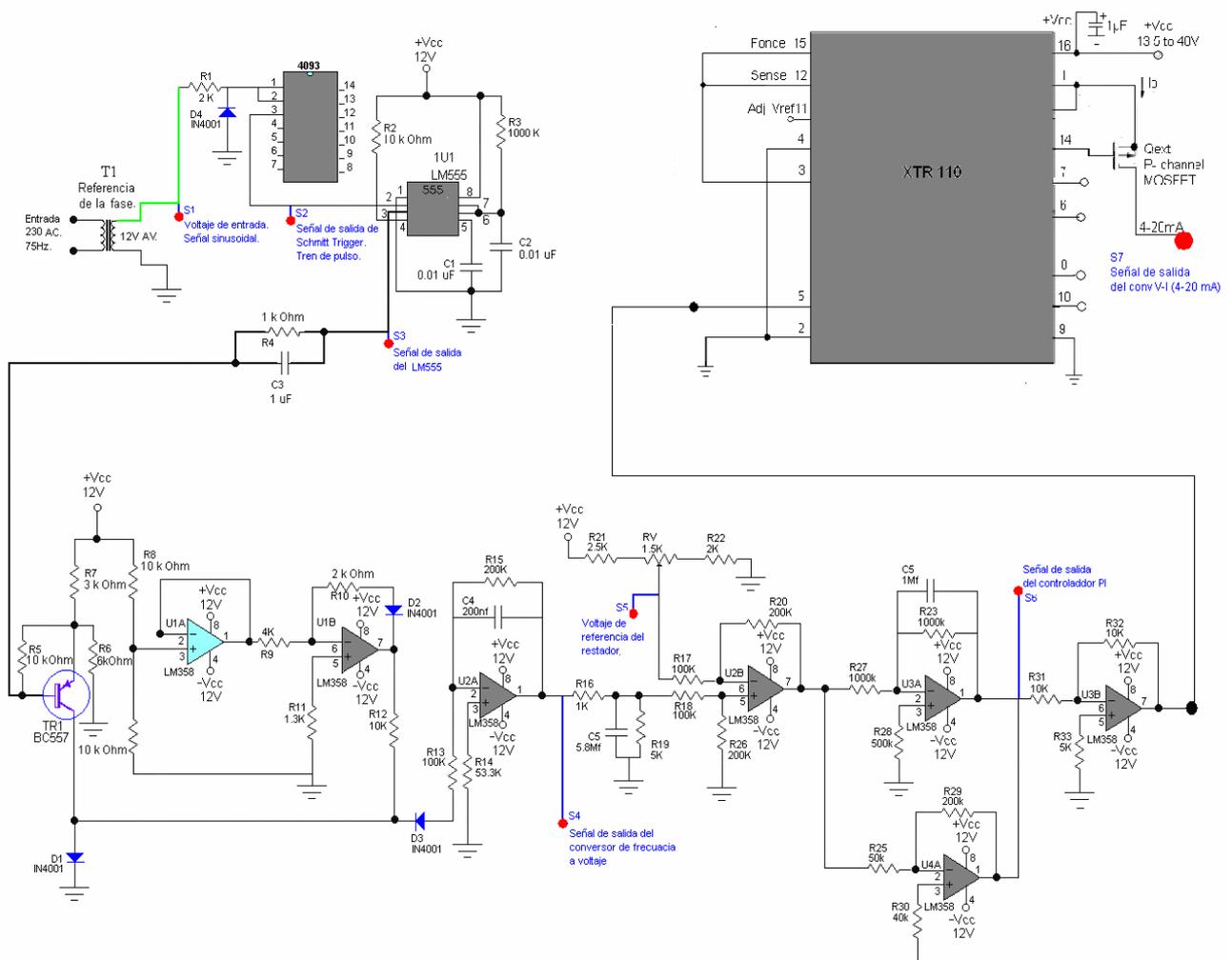


Figura 2.2. Esquema eléctrico del sistema de control.

2.3.1 Fuente de alimentación.

La fuente de alimentación está constituida por dos transformadores de 230V/12V encargado de la adaptación de los niveles de voltaje requeridos por los circuitos electrónicos implementados, esta tiene dos puentes rectificadores, los condensadores C1, C2..... y C8, para el filtrado de la tensión rectificada y el rechazo a ruidos, cuenta también con los circuitos integrados LM7812 y LM7912 que son estabilizadores de tensión a 12V y -12V.

Esta fuente está conectada a la salida del grupo de generación por una parte y por la otra a la alimentación del circuito. A continuación (Figura 2.3) se muestra el circuito electrónico de la fuente de alimentación de los bloques anteriormente mencionados.

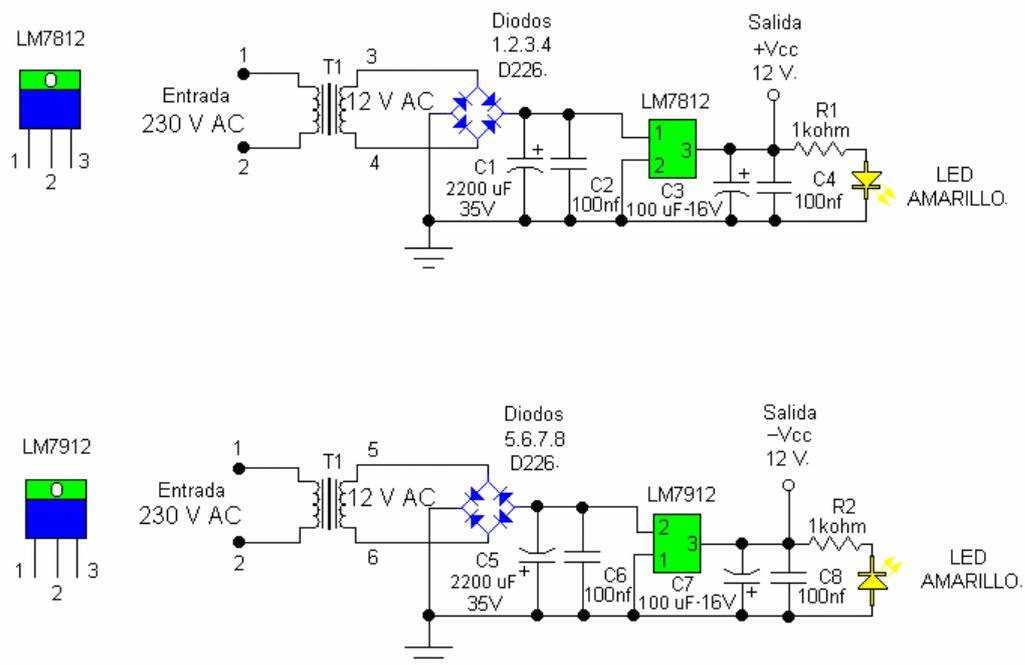


Figura 2.3. Esquema eléctrico de la fuente de alimentación.

2.3.2 Transductor de frecuencia a voltaje.

El conversor de frecuencias a voltaje tiene la función de generar a la salida de este un voltaje que sea proporcional a la frecuencia de la tensión generada por el alternador. Para su mejor descripción se ha dividido en 2 etapas:

- Primera etapa: Oscilador monoestable.
- Segunda etapa: Conversor de frecuencia a voltaje.

Oscilador monoestable.

El objetivo de esta etapa es el acondicionamiento de la señal portadora de la información o sea la frecuencia, mediante la conversión de la señal sinusoidal en una señal rectangular [11] [21]. Esta etapa está constituida básicamente por dos circuitos integrados (CI), una compuerta NAND 4093 y un temporizador NE555 configurado como monoestable.

Principio de funcionamiento del CI 4093.

Un Schmitt Trigger cambia su estado de salida cuando la tensión en su entrada sobrepasa un determinado nivel; la salida no vuelve a cambiar cuando la entrada baja de ese voltaje, sino que el nivel de tensión para el cambio es otro distinto, más bajo que el primero. A este efecto se conoce como ciclo de histéresis.

El CI 4093 se comporta de forma lógica como una compuerta NAND, pero el circuito que la constituye, además recorta la señal y la encuadra, de manera que su salida es realmente cuadrada.

Arquitectura y disposición de pines.

En la construcción del transductor se utiliza los circuitos integrados (CI 4093) de funciones lógicas, que incluye cuatro compuertas NAND de dos entradas cada uno, como se puede observar en la figura 2.5 a continuación:

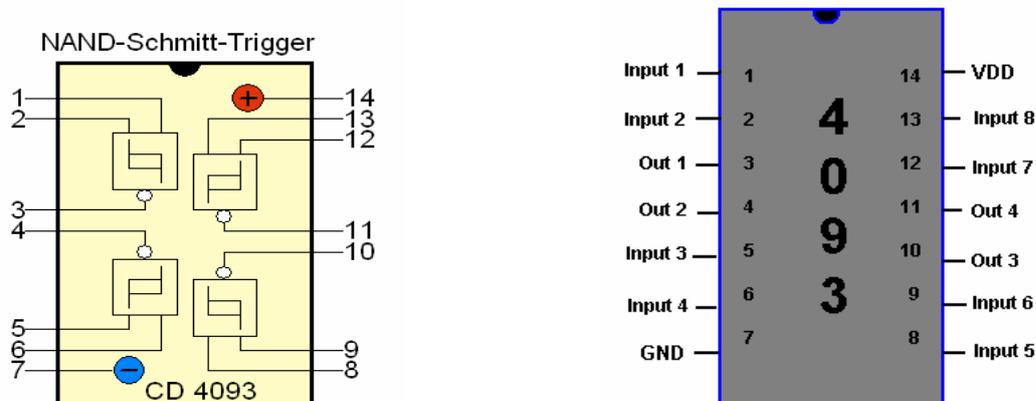


Figura 2.5. Esquema interno y configuración de pines del 4093.

Función que realiza en el sistema.

Como se ha mencionado antes el comparador regenerativo 4093 cuenta con 4 compuertas NAND pero en el trabajo solo se utiliza una de ellas. Este circuito integrado fue la elección para usarse en este caso porque soporta un voltaje de entrada de hasta 15 V, valor que es de una importancia vital porque esta en el rango de voltaje que entrega el transformador situado a la entrada del convertidor de frecuencia a voltaje.

Lo que se persigue con el uso de este componente es que al aplicársele una señal sinusoidal con una frecuencia determinada procedente del generador este reciba dicha señal y la transforme en una onda cuadrada de igual frecuencia. Es decir, que tanto la señal entrada como de salida tendrán el mismo número de ciclos por segundo pero con distinta forma de onda. Para lograr lo antes descrito se pone la misma señal a las dos entradas. El tren de pulso a la salida se lleva al temporizador NE555N.

Temporizador NE555N.

Arquitectura y disposición de pines.

Está constituido por una combinación de comparadores lineales, flip-flops (biestables digitales), transistor de descarga y excitador de salida. Las tensiones de referencia de los comparadores se establecen en $2/3 V$ para el primer comparador C1 y en $1/3 V$ para el segundo comparador C2, por medio del divisor de tensión compuesto por 3 resistencias iguales R. El CI 555 está conformado por 23 transistores, 2 diodos, y 16 resistores encapsulados en silicio [21].

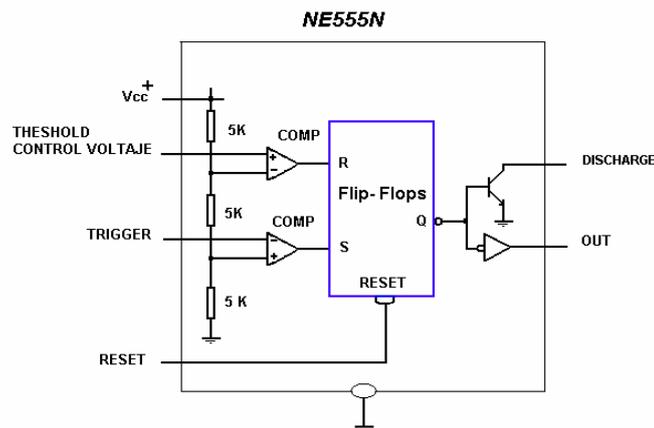


Figura 2.5. Composición interna de un NE555N.

En la figura 2.6 se muestra el número de pines con su correspondiente función [22].

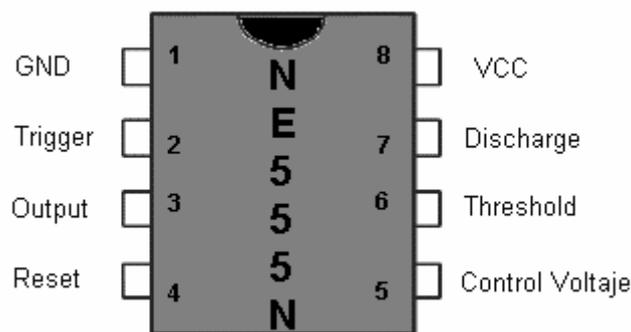


Figura 2.6. Disposición de pines del temporizador.

- Pin 1. Es el polo negativo de la alimentación, generalmente tierra.
- Pin 2. Disparo. Por aquí se establece el inicio del tiempo de retardo, si el 555 es configurado como monoestable. Este proceso de disparo ocurre cuando este pin va por debajo del nivel de $1/3$ del voltaje de alimentación. Este pulso debe ser de corta duración, pues si se mantiene bajo por mucho tiempo la salida se quedará en alto hasta que la entrada de disparo pase a alto otra vez.
- Pin 3. Salida. En este terminal se obtiene el resultado de la operación del temporizador, ya sea conformado como monoestable o astable. Cuando la salida es alta, el voltaje será el voltaje de alimentación (V_{cc}) menos 1.7 V. Esta salida se puede obligar a estar en casi 0 voltios con la ayuda del pin de reset (normalmente la 4).
- Pin 4. Reset. Si se pone a un nivel por debajo de 0.7 V, pone el pin de salida a nivel bajo. Si por algún motivo este pin no se utiliza hay que conectarla a V_{cc} para evitar que el 555 se "resetee".
- Pin 5. Control de voltaje. Cuando el temporizador se utiliza en el modo de controlador de voltaje, el voltaje en este pin puede variar casi desde V_{cc} (en la práctica como $V_{cc} - 1$ V) hasta casi 0 V (aprox. 2 V). Así es posible

modificar los tiempos en que la salida se encuentre en alto o en bajo independiente del diseño (establecido por las resistencias y condensadores conectados externamente al CI 555). El voltaje aplicado al pin de control de voltaje puede variar entre un 45 y un 90 % de V_{cc} en la configuración monoestable. Cuando se utiliza la configuración astable, el voltaje puede variar desde 1.7 V hasta V_{cc} . Modificando el voltaje en esta pastilla en la configuración astable causará la frecuencia original del astable sea modulada en frecuencia (FM). Si este pin no se utiliza, se recomienda ponerle un condensador de $0.01\mu F$ para evitar las interferencias.

- Pin 6. Umbral. Es una entrada a un comparador interno que tiene el CI 555 y se utiliza para poner la salida a nivel bajo.
- Pin 7. Descarga. Utilizado para descargar con efectividad el condensador externo utiliza un temporizador para su funcionamiento.
- Pin 8. V_{+} . También llamado V_{cc} , alimentación, es el pin donde se conecta el voltaje de alimentación que va de 4.5 hasta 16 V (máximo). Hay versiones militares de este integrado que llegan hasta 18 V.

Función que realiza en el trabajo.

El temporizador CI 555 se puede conectar para que funcione de diferentes maneras, entre los más importantes están: como multivibrador astable y como multivibrador monoestable (Figura 2.7). En el trabajo se configura esta pastilla como un monoestable debido a que se quiere que a la salida de este haya un solo estado estable. Con lo anteriormente dicho se persigue que al variar la frecuencia, varíe también el período para luego a través del transistor hacer el voltaje medio a la salida de este bloque sea proporcional a la frecuencia. El tiempo en ON del monoestable se fija a través de la resistencia y el capacitor externo como se puede observar en la formula que se muestra a continuación [11] [22].

$$T = 1.1 \cdot R \cdot C$$

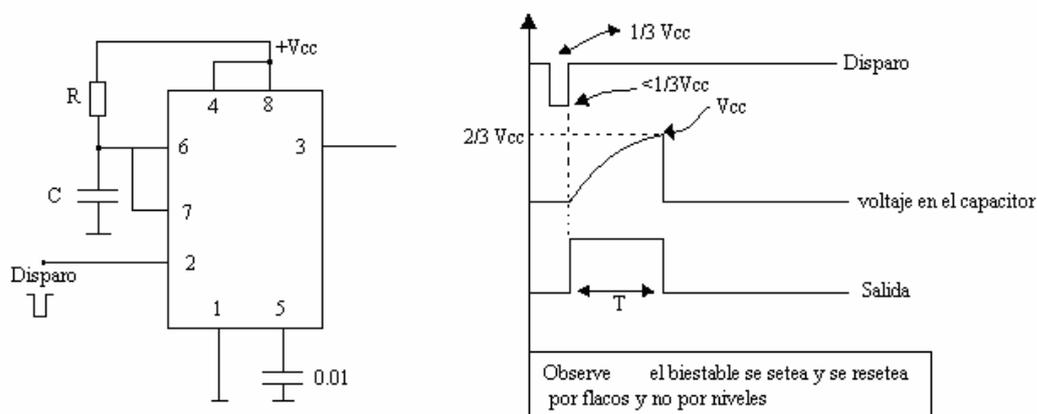


Figura 2.7. Configuración del monoestable y la grafica de trabajo

Cálculo de los parámetros externos del CI 4093 y el Oscilador.

Compuerta 4093

A la entrada de este CI se pone un diodo IN401 que tiene la función de desechar el semiciclo negativo del voltaje de alterna que entra en el CI y un resistor para limitar la corriente facilitando el trabajo de la compuerta. Ambos componentes fueron fijados.

Oscilador Monoestable NE 555.

Cálculo del período.

El valor máximo de la frecuencia que se desea obtener es de 70 Hz aunque en la generación de energía eléctrica en las grandes centrales solo se permite una variación de $\pm 1\%$ de 60 Hz. Teniendo en cuenta que este sistema de generación es aislado es de interés poder medir con un margen mayor. La frecuencia de trabajo es de 60 Hz y la medición se realice entre 50 y 70 Hz. Para calcular el período se escoge el máximo valor de la frecuencia a medir (70 Hz) que esta asociado al mínimo período.

- Para una señal de 50 Hz el período es $T = 20$ ms
- Para una señal de 60 Hz el período es $T = 16.7$ ms
- Para una señal de 70 Hz el período es $T = 14.28$ ms

Se fija el tiempo en estado ON del monoestable con una duración de 13 ms, siendo este el menor período para la frecuencia más alta a convertir.

En la ecuación 1 se puede observar que el tiempo en ON del monoestable a la salida está dado por la resistencia y el capacitor, por tanto se procede a calcular la resistencia.

Teniendo en cuenta que el período (T) esta dado por la siguiente ecuación

$$T = 1.1 * R * C \quad (1)$$

Despejamos a R de la ecuación (1)

$$R_3 = \frac{T}{1.1 * C_2}$$

$$T = 13 \text{ ms}$$

El capacitor C_2 se fija, $C_2 = 0.01 \mu\text{F}$. Para fijar este capacitor hay que tener en cuenta que este debe de estar en el orden de los nano (10^{-9}) o micro (10^{-6}) F

$$R_3 = \frac{13 * 10^{-3}}{1.1 * 0.01 * 10^{-6}} = 1.180 \text{ M}\Omega.$$

Primera etapa del transductor de frecuencia a voltaje.

Para una mejor descripción de esta etapa se procede a poner etiquetas en algunos puntos del circuito (Figura 2.8).

Aquí la señal que llega es del transformador reductor T1 cuya función es aislar al circuito electrónico de la alta tensión de la red y disponer de una tensión apropiada para el funcionamiento del transductor, en este caso el voltaje del secundario es 10

V con la frecuencia que tenga el generador a la salida que se espera que sea 60 Hz (etiqueta S1). Esta señal pasa a través de R_1 y D_4 hasta el generador de onda

cuadrada (4093), en (etiqueta S2) la salida del CI 4093 se obtiene un tren de pulso con el mismo número de ciclos que la señal sinusoidal de la entrada, luego esta llega al circuito del oscilador monoestable (CI NE555N). La señal de salida del CI 4093 se aplica al pin 2 del CI NE555, el proceso de disparo ocurre cuando este pin va por debajo del nivel de $1/3$ del voltaje de alimentación, activándose la configuración como oscilador monoestable. En la etiqueta S3 la salida del monoestable (pin3) aparece un pulso de duración constante, disponible cada vez que la señal de entrada presente $1/3$ del voltaje de alimentación. Dicho pulso tendrá una duración determinada por la resistencia R_3 y por el condensador C_2 . Este pulso de salida del monoestable debe tener una duración menor que el período de la señal de entrada correspondiente a la máxima frecuencia. Esta señal se aplica al transistor TR1 correspondiente a la segunda etapa del transductor de frecuencia a voltaje (Figura 2.16).

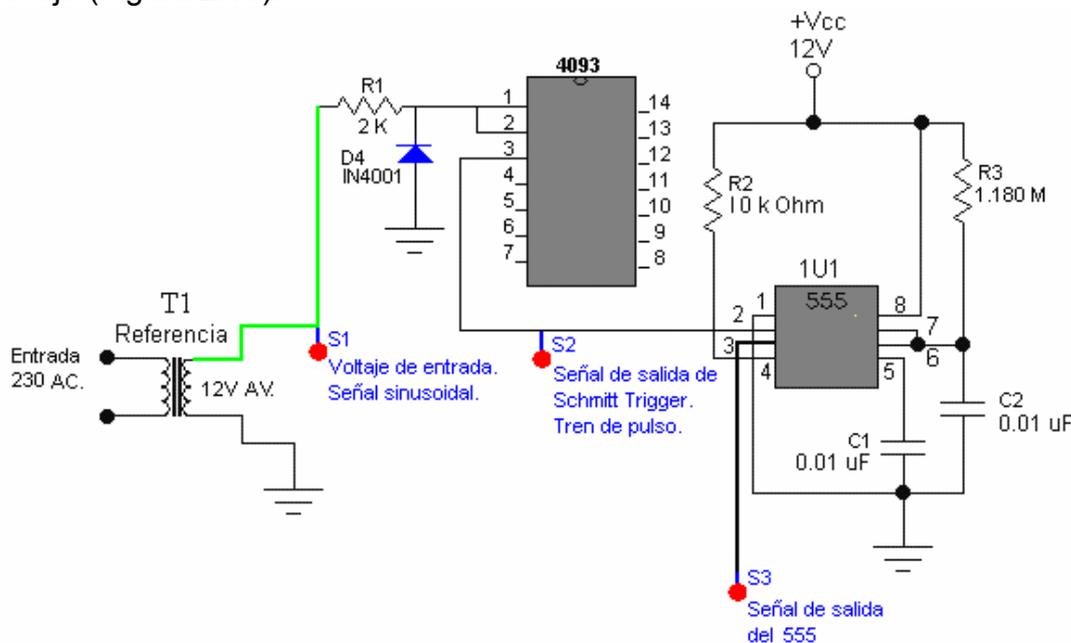


Figura 2.8 Esquema de la primera etapa del transductor de frecuencia a voltaje (Oscilador monoestable).

Segunda etapa. Conversor de frecuencia a voltaje.

En el diseño de esta etapa se utilizan amplificadores operacionales del tipo LM 358 del que se hablará mas adelante, resistencias, capacitores y un transistor PNP del tipo BC 557, para obtener a la salida un voltaje medio proporcional a la frecuencia de la tensión en la entrada.

Amplificador Operacional LM 358.

El LM 358 es un circuito integrado compuesto por dos amplificadores operacionales (Figura 2.9) en su interior, y consta de ocho pines (Figura 2.10) [17].

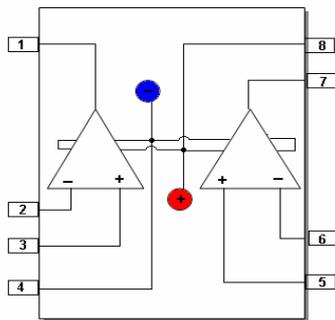


Figura 2.9 Arquitectura del LM 358

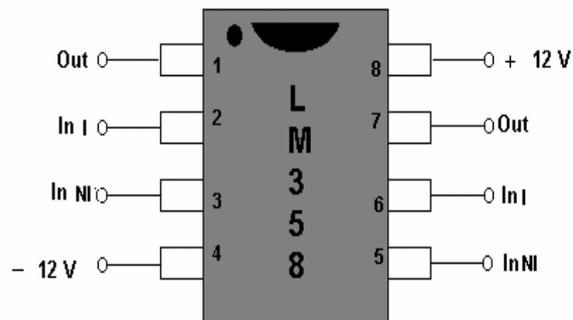


Figura 2.10 Disposición de pines del LM358

El LM 358 consta de 2 salidas, 4 entradas y alimentación positiva y negativa.

- Pin 1: Salida del primer AO.
- Pin 2: Entrada inversora.
- Pin 3: Entrada no inversora.
- Pin 4: Alimentación negativa (V-).
- Pin 5: Entrada no inversora del segundo AO.
- Pin 6: Entrada inversora.
- Pin 7: Salida.
- Pin 8: Alimentación positiva (V+)

A continuación se muestra el funcionamiento de las aplicaciones utilizadas de este amplificador para la construcción del transductor:

Aplicaciones que tiene el LM358 en el circuito.

Amplificador Inversor

La configuración más sencilla es la inversora (Figura 2.11). Dada una señal analógica, el amplificador inversor constituye el modo más simple de amplificar o atenuar la señal.

El amplificador inversor para analizarlo completo, nos apoyaremos en el siguiente gráfico:

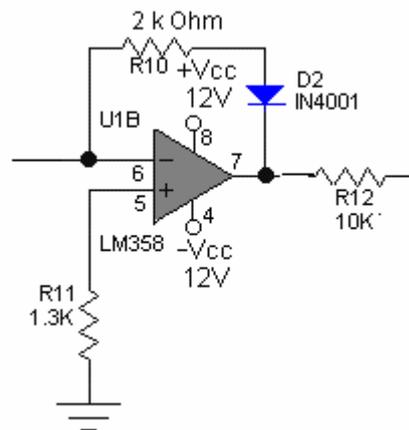


Figura 2.11. Circuito del amplificador inversor

Seguidor de Tensión.

El seguidor de tensión (Figura 2.12) es aquel circuito que proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada, independientemente de la carga que se le acopla. Esta aplicación es importante en la amplificación de señales que teniendo un buen nivel de tensión son de muy baja potencia y por tanto se atenuarían en el caso de conectarlas a amplificadores de mediana o baja impedancia de entrada.

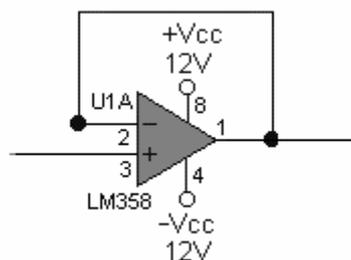


Figura 2.12. Circuito del Seguidor de Tensión

Restador.

El circuito restador (Figura 2.13), esta constituido por un amplificador operacional y varias resistencias y suele usarse para comparar una tensión variable con otra tensión fija que se utiliza como referencia y poner a la salida la diferencia entre estas tensiones. Este circuito esta implementado en el conversor con el objetivo de eliminar el error de Off-Set procedente del filtro pasa bajo.

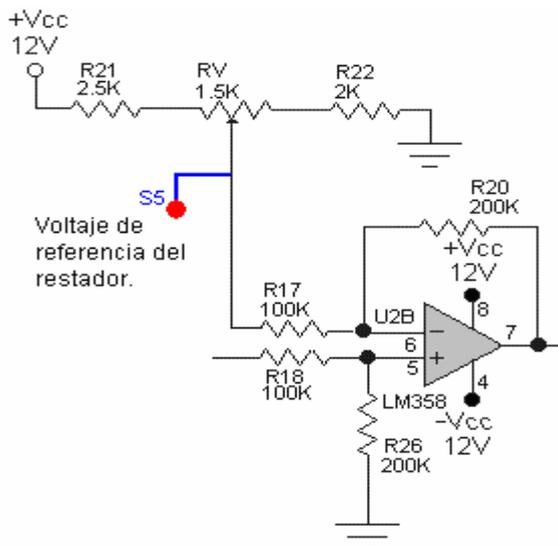


Figura 2.13. Circuito restador

Filtros.

Los filtros son circuitos capaces de atenuar las frecuencias indeseables. Estos filtros pueden ser pasivos, figura 2.14, o activos, figura 2.15 [11].

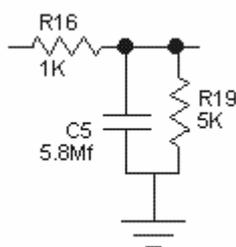


Figura 2.14. Filtro R-C

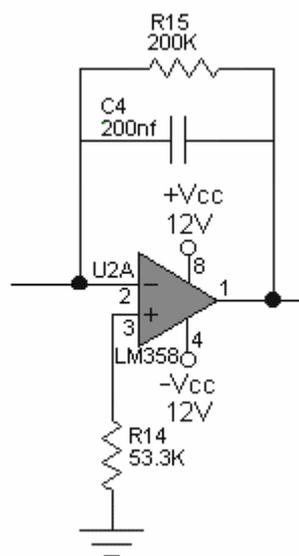


Figura 2.15. Filtro a partir de AO.

Cálculo de los parámetros de esta etapa.

Amplificador inversor (AO U1B).

Se fija la ganancia A_{VI} de esta etapa en $\frac{1}{2}$; se escoge $R_9 = 4k\Omega$ y se calcula R_{10} mediante la expresión siguiente

$A_{vl} = \frac{R_{10}}{R_9}$; se despeja a R_{10} y se obtiene que:

$$R_{10} = A_{vl} * R_9 \quad R_{10} = 2K\Omega$$

Para calcular de R_{11} , se dice que esta va a ser igual al paralelo de R_9 con R_{10} .

$$R_{12} = \frac{R_9 * R_{10}}{R_9 + R_{10}}$$

obteniendo que $R_{10} = 1.3k\Omega$.

Cálculo de los parámetros del amplificador Integrador (AO U2A).

Se fija la ganancia en $A_{vl} = 2$, $R_{15} = 200k\Omega$ y se calculan R_{13} y C_4 mediante las siguientes expresiones:

$A_{vl} = \frac{R_{15}}{R_{13}}$; se despeja a R_{13} obtenemos que:

$$R_{13} = A_{vl} * R_{15} \quad R_{13} = 100K\Omega$$

Para determinar el valor del condensador se escoge una constante T que sea aproximadamente igual al doble del período que tiene la frecuencia deseada (60 Hz) y se sustituyen estos valores en la ecuación siguiente.

$$T = R_{15} * C_4 \quad C_4 = 200nf$$

Luego R_{14} va a ser igual al paralelo de R_{13} con R_{15} .

$$R_{14} = \frac{R_{13} * R_{15}}{R_{13} + R_{15}};$$

obteniendo que $R_{14} = 53.3K\Omega$ [11].

Descripción de la segunda etapa (convertor de F- V).

La señal de salida del CI NE555 como se observa anteriormente es una señal cuadrada que tiene un tiempo en alto prefijado en 13 ms y un tiempo en bajo que varia de acuerdo a la variación de frecuencia en la entrada. A partir de la salida del dicho CI se aplica a la segunda etapa a través de una pequeña red RC, formadas por C_3 y R_4 que está acoplada a la base del transistor TR1 (BC 557 tipo PNP) configurado en emisor común. Cuando la señal de entrada se encuentra en el semiciclo positivo, la señal de salida del NE555 se encuentra a 0V y el transistor TR1 se satura y conduce. Luego el diodo D1 se polariza directamente y conduce poniendo en el colector del transistor una señal de 0,6V y el resto del voltaje se va a tierra por medio del diodo D1, por consiguiente el diodo D3 no conduce. Cuando la señal de entrada cambia al semiciclo negativo, el voltaje a la salida del CI NE555 es positivo, esto pone al transistor TR1 en estado de corte. En el colector del

transistor TR1 predomina una tensión de corriente directa de polaridad negativa proveniente del circuito amplificador operacional U1B (CI LM358) el cual se utiliza para polarizar en sentido de conducción al diodo D3 a través de la resistencia R12. El ánodo del diodo D3 es acoplado al filtro pasa bajo formado por el amplificador operacional U2A (CI LM358), los resistores R13, R14 y R15, y el condensador C4. El amplificador operacional U1A del (CI LM358) es un seguidor de voltaje, se usa con el objetivo de mantener constante el voltaje de entrada que debe llegar al amplificador operacional U1B (CI LM358). A la salida de este filtro se obtiene un voltaje de corriente directa, con cierto rizado, cuyo valor medio es una función de la frecuencia de entrada. En la etiqueta (S4) se encuentra la tensión de salida de este bloque que se le aplica al tercer bloque del regulador de frecuencia, como se muestra en la figura 2.16.

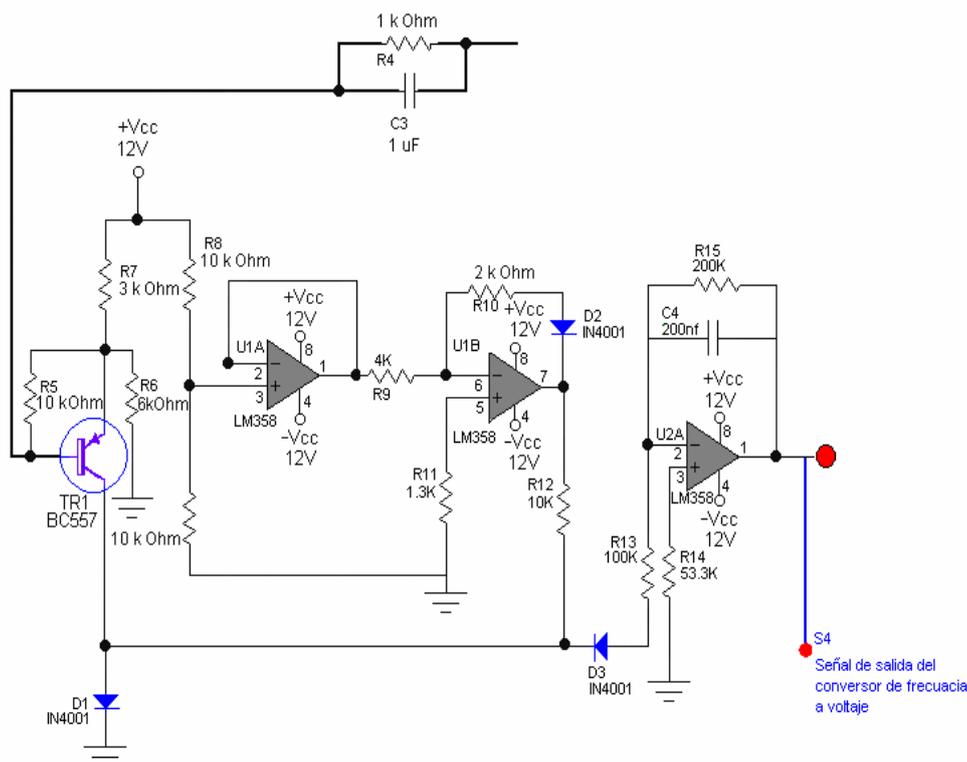


Figura 2.16. Esquema del segundo bloque del transductor de frecuencia a voltaje (Convertor de frecuencia a voltaje).

2.3.3 Tipos de Controladores.

Existen diversos tipos de controladores y entre ellos se encuentran los siguientes:

Controlador P

Este control necesita una señal en entrada no nula (\neq) para poder producir una señal no nula (y) a la salida, por tal razón, no puede anular el error.

La regulación con acción proporcional contesta bien con el objeto solo cuando sea tolerable para la grandeza regulada con un cierto desplace residuo del valor prefijado. Por otra parte, el controlador P es un controlador con acción rápida.

Controlador I

Este tipo de control puede suministrar una señal a la salida no nula con una señal de entrada nula, por tal razón, puede anular el error. El transitorio que lo caracteriza es de tipo periódico amortiguado, no siempre admisible ya que implica la superación del set-point. El controlador I es un controlador con acción lenta.

Controlador D

Este control suministra una señal a la salida nula con señal en entrada constante (nula o no nula) por tal razón, no puede anular el error. Los reguladores basados solo sobre la acción D no presentan interés práctico, pero está acción sirve a integrar las acciones P y I, con función anticipadora que encuentra útil utilización en ciertos tipos de procesos. El controlador D es un controlador con acción muy rápida.

Selección del controlador.

En base a lo hasta ahora analizado, la selección del controlador podrá hacerse por medio de las siguientes consideraciones:

- Cuando no sea tolerable un cierto desplace residuo del valor prefijado y se solicita una elevada velocidad de ejecución de la regulación, el **controlador PID** constituye la solución.
- Cuando sea tolerable para el proceso regulado un cierto desplace residuo del valor prefijado y se solicita una elevada velocidad de ejecución de la regulación, puede utilizarse el **controlador PD**.
- Cuando no sea tolerable para el proceso que se esta controlando un cierto desplace residuo del valor prefijado y no se solicita una elevada velocidad de ejecución de la regulación, el **controlador PI** constituye una buena combinación.

El control **PID** es el más completo de todos los controladores, ahora que, el sistema de control que se propone no necesita de gran velocidad para mantener la frecuencia de generación en un rango deseado. Es por ello que se inclina por el control **PI** que tiene gran exactitud aunque con velocidad media además el costo del **PI** es muy inferior al del controlador **PID**.

El control PI

Cuando el flujo de biogás a la entrada del motor aumente o disminuya, a la salida de este la velocidad también aumenta o disminuye respectivamente y lo mismo pasará con la frecuencia, luego el control **P** limitará la variación del flujo a la entrada debido

a su acción rápida y brusca, y el control I continuará metódicamente actuando sobre el regulador hasta que el flujo este en el valor deseado.

Configuración del controlador.

El controlador PID y las versiones PI y PD puede ser realizado en base a dos configuraciones:

- **la configuración en paralelo:** (figura 2.17), caracterizada por el hecho que las tres acciones P, I y D están colocadas en paralelo entre ellas, y son alimentadas con la misma señal de error ε ;
- **la configuración en serie:** donde la acción proporcional, alimentada con la señal de error ε , está colocada en serie a las otras dos, entre ellas conectadas en paralelo [19] .

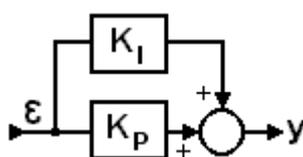
Controlador	Esquema	Ecuación	Notas
PI		$y = K_p \cdot \varepsilon + K_i \cdot \int \varepsilon \cdot dt =$ $= K_p \cdot \left(\varepsilon + \frac{K_i}{K_p} \cdot \int \varepsilon \cdot dt \right) =$ $= K_p \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{T_i} \cdot \int \varepsilon \cdot dt \right)$	$T_i = \frac{K_p}{K_i}$ $T_o = \frac{K_D}{K_p}$

Figura 2.17. Configuración en paralelo del controlador PI

Método de ajuste del controlador.

Método de las oscilaciones mantenidas:

Este método se basa en el comportamiento del sistema a lazo cerrado. Para ampliarlo se opera el sistema en automático utilizando control proporcional solamente, se ajustan las ganancias a un valor pequeño.

Las acciones derivativas e integrales en caso de que existieran se anulan, ajustando el tiempo derivativo a cero y el integral a infinito. La ganancia aumenta paulatinamente hasta que el sistema opere en el límite de estabilidad, es decir, con oscilaciones permanentes de amplitud constante.

Formulas a tener en cuenta para el cálculo en los controladores PI.

$K_c = 0.45 \cdot K_{crit}$

$T_i = P_{crit} / 1.2$

Nota: Este ajuste no se pudo llevar a cabo por no disponer de un elemento de acción final en buen estado y por consiguiente la imposibilidad de poder cerrar el lazo de control para implementar el método antes mencionado. Teniendo en cuenta esto se realizaron algunas mediciones de voltaje a la salida y se tomaron algunos valores para los cuales se calcularon los parámetros del controlador [1] [2].

Cálculo de los parámetros del controlador.

La ganancia del controlador (K_c)

$K_c = 0.45 \cdot K_{crit}$

$K_c = 0.45 \cdot 11.11$

$$K_c = 5$$

El tiempo de integración del controlador (T_i)

$$T_i = P_{crit} / 1.2$$

$$T_i = 0.6 / 1.2$$

$$T_i = 0.5$$

Cálculo de los componentes resistivos, y del capacitivo.

$$T = R_{23} // R_{27} * C_5$$

Se dice que es el paralelo ($R_{23} // R_{27}$) debido a que la constante de tiempo del controlador es muy grande.

$$0.5s = R_{23} // R_{27} * 1\mu F$$

$$R_{23} // R_{27} = 500 K$$

Aplicando la regla de tres se puede llegar a conocer cual es el valor de las resistencias que en paralelo tiene un valor de 500 K. Para poder aplicar esta regla es necesario que se fije una de las resistencias es por ello que se le da el valor de

$$R_{23} = 1M\Omega$$

$$R_{23} // R_{27} = 500 K\Omega$$

$$1000 * R_{27} / 1000 + R_{27} = 500 K\Omega$$

Trabajando en la ecuación anterior se obtiene que:

$$R_{27} = 1000 k \Omega$$

$$R_{23} = 1000 k \Omega$$

$$C_5 = 1\mu F$$

Por otra parte, para calcular los parámetros de la acción proporcional, primeramente se fija la ganancia del AO, luego se procede a calcular las resistencias fijando una de ellas como se muestra a continuación:

Ganancia (A_p)

$$A_p = 4$$

$$A_p = R_{29} / R_{25}$$

Como se explica anteriormente se fija la resistencia R_{29} para calcular R_{25}

$$R_{29} = 200 k\Omega$$

Por tanto,

$$R_{25} = R_{29} / A_p$$

$$R_{25} = 200 / 4$$

$$R_{25} = 50 K$$

Luego R_{30} es el paralelo entre R_{29} y R_{25} ,

$$R_{30} = R_{29} // R_{25}$$

$$R_{30} = (200 * 50) / (200 + 50)$$

$$R_{30} = 40 k\Omega$$

A la salida del controlador se puede observar que hay un AO que tiene como objetivo acondicionar la señal que sale del controlador para su posterior conversión a corriente.

Descripción del proceso de control.

La señal de salida de la segunda etapa del bloque del transductor de frecuencia a voltaje (etiqueta S4) es entregada a un tercer bloque en el que se encarga del control de la frecuencia traducido en voltaje. En este bloque se cuenta con varios AO, componentes resistivos y capacitivos. Inicialmente cuando la señal de tensión

entra a este bloque pasa por la resistencia R16, R19 y el capacitor C5 que constituyen una pequeña red RC ubicada a la entrada con el objetivo de disminuir la componente de alterna que tiene el voltaje que sale de la etapa anterior, luego de pasar por aquí se obtiene una señal menos rizada (voltaje de directa), esta red es muy importante porque si el voltaje a la salida de la etapa anterior varía es muy difícil poder eliminar el error de Off –Set mediante el circuito restador. El amplificador restador formado por U2B, tiene como función fundamental la comparación de las señales procedentes del transductor y de la fuente de voltaje, y poner en su salida la diferencia que existe entre las señales de entrada, como ya se sabe el voltaje resultante de la etapa anterior es proporcional a la señal de frecuencia que sale del grupo de generación. Esta comparación se establece debido a que se necesita que al controlador llegue una señal de 2.5 V cuando a la entrada se encuentre una frecuencia de 60 Hz para que dicho controlador se mueva en el rango de 0-5 V y trabaje sin que se pierda información. La tensión de referencia que brinda la fuente es de 1.570 V para que a la salida de este puedan existir los 2.5 V deseados. Debido a que el voltaje de la fuente es fijo un aumento o disminución de la frecuencia provoca un aumento o disminución del voltaje a la salida del convertidor y a su vez a la salida del circuito restador, la tensión de referencia se ajusta con el potenciómetro RV. Luego un aumento o disminución del voltaje en la entrada del controlador sería rápidamente tratada hasta ser llevada nuevamente a su estado inicial de 2.5 V (60 Hz), debido a que el controlador tiene una fuente de referencia (Figura 2.18) y siempre este tratará de tener a la salida el voltaje que tiene en la referencia. El último AO fue colocado con el objetivo de acondicionar la señal de salida del controlador.

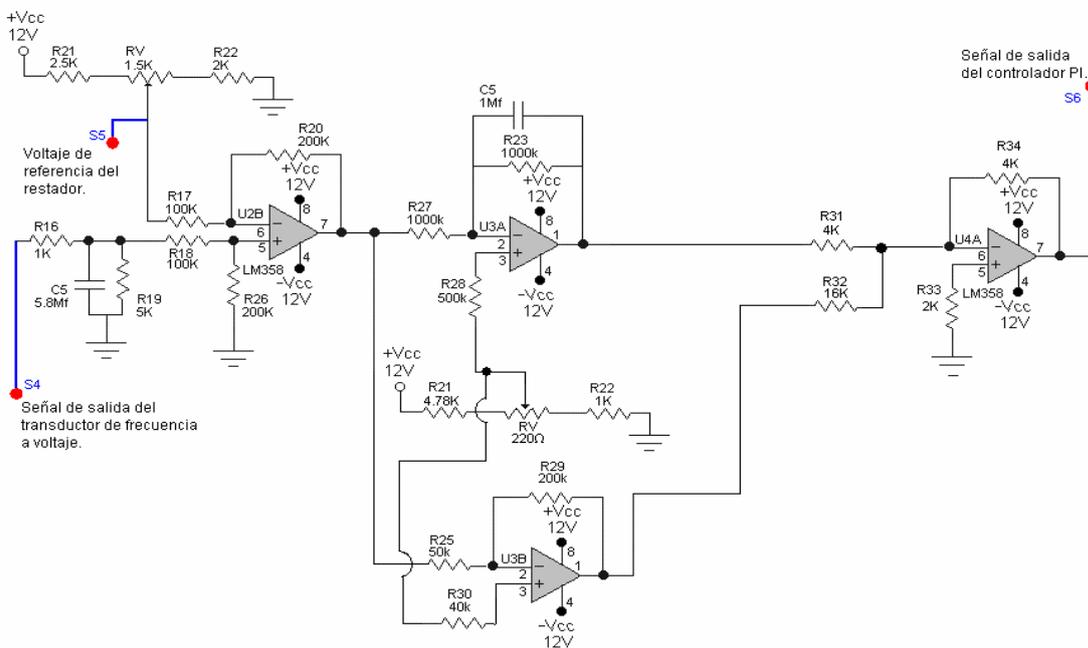


Figura 2.18. Esquema del tercer bloque (Controlador PI)

2.3.4 Convertidor de voltaje a corriente.

La conversión de voltaje a corriente se realiza mediante un CI XTR 110 que cuenta con distintos rangos de entrada y de salida. El XTR110 está disponible en 16-pines DIP plástico (Figura 2.19), cerámica DIP y SOL-16 de montaje en superficie. A continuación se abordará de sus características, disposición de pines configuración que tiene en el trabajo

Características.

El XTR 110 se diseña para la transmisión de señales analógicas que tiene muchas aplicaciones en los procesos que necesitan ser controlados en las distintas industrias por lo general es usado en controles de temperatura que requieren de gran precisión.

- Posee entrada y salida que pueden ser seleccionadas de acuerdo al uso que le será dado.
Rangos de entradas:
0 – +5 V, 0 – +10 V
Rangos de salida:
0 – 20 mA, 5 – 25 mA, 4 – 20 mA y otros (pueden ser configurado para obtener corrientes más altas)
- Presenta una alinealidad máxima del 0,005% en 14 BIT
- Oferta una única operación es decir convertir de voltaje a corriente.
- Y por último tiene una amplia gama de tensión de alimentación que puede variar desde 13.5 hasta 40 V

Configuración de pines de XTR110.

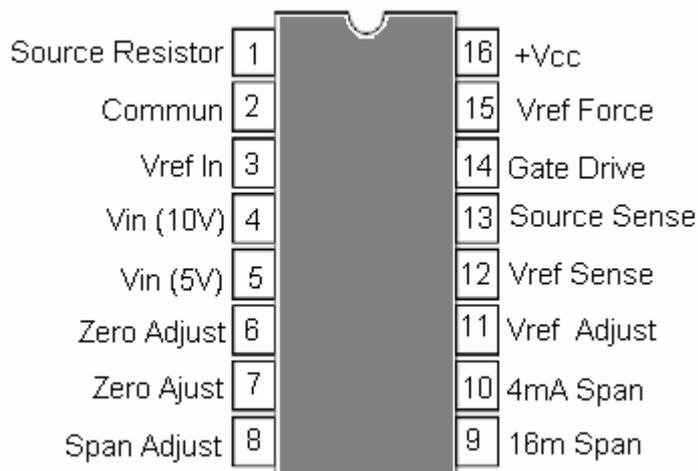


Figura 2.19. Configuración de pines del XTR110.

Configuración empleada en la propuesta.

La figura 2.20 muestra las conexiones necesarias para trabajar con un rango de 0 a 5V en la entrada y 4 a 20 mA a la salida que es el que se necesita en el trabajo aunque este CI tiene otros voltaje de entrada y salida, gamas de corriente que requieren los cambios en las conexiones de los pines 3, 4, 5, 9 y 10, como se muestra en la tabla 2.1. Para el uso del transistor externo se recomienda que este

sea del tipo MOSFET con configuración de canal P [1] [21].

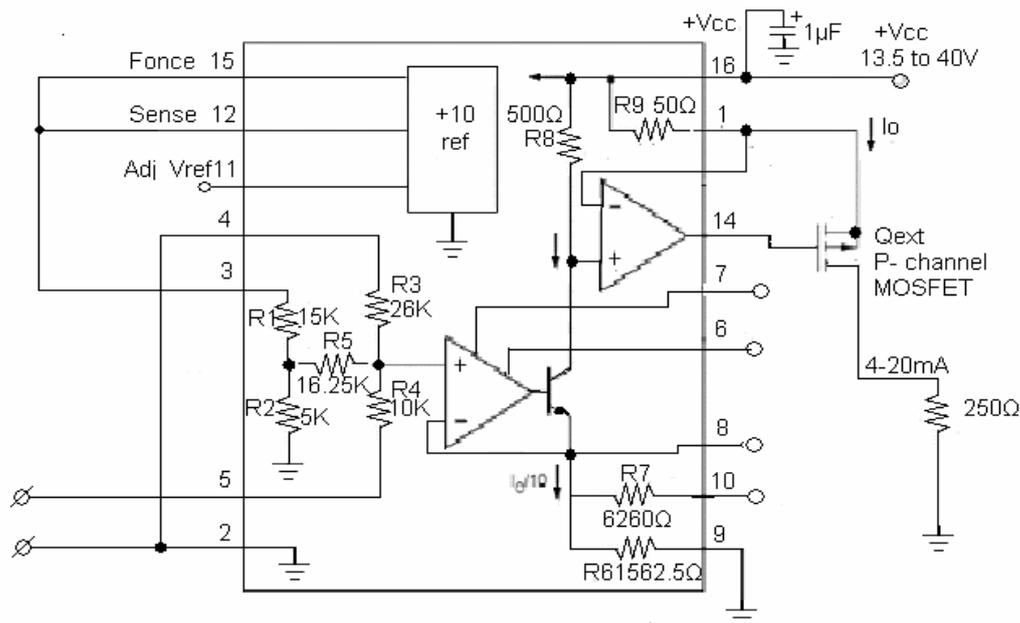


Figura 2.20. Configuración del XTR110 para un rango de entrada de 0-5V.

Tabla 2.1. Configuración de pines para los distintos rangos.

Rangos de entrada (V)	Rangos De salida (mA)	Pin 3	Pin 4	Pin 5	Pin 9	Pin 10
0-10	0-20	Tierra	Entrada	Tierra	Tierra	Tierra
2-10	4-20	Tierra	Entrada	Tierra	Tierra	Tierra
0-10	4-20	+10ref	Entrada	Tierra	Tierra	Abierto
0-10	5-25	+10ref	Entrada	Tierra	Tierra	Tierra
0-5	0-20	Tierra	Tierra	Entrada	Tierra	Tierra
1-5	4-20	Tierra	Tierra	Entrada	Tierra	Tierra
0-5	4-20	+10ref	Tierra	Entrada	Tierra	Abierto
0-5	5-25	+10ref	Tierra	Entrada	Tierra	Tierra

2.3.5 Regulación del suministro de biogás.

La regulación de la presión del flujo de biogás que se suministra al motor se propone el regulador IT2010, marca SMC de fabricación española. Este regulador cumple con los parámetros de suministro que demanda el motor para su correcto funcionamiento, detalle muy importante a la hora de implementar el sistema de control para no saturar el motor con una sobrealimentación.

La señal de entrada de este regulador es de 4–20mA es por ello que en el bloque anterior se convierte de voltaje a corriente en un rango similar. El mismo una entrada o toma de alimentación y la salida con una presión proporcional a la corriente de entrada. Más adelante se abordará el funcionamiento del mismo.

Características del regulador.

El regulador IT2010 tiene un rango de salida de 0.05bar hasta 1.0bar, con una presión de alimentación de 1.4bar hasta 2.0bar y una entrada de 4-20mA. Por otra parte brinda la posibilidad de monitorear la señal; es resistente al choque y la vibración, posee una alinealidad de $\pm 1\%$ o mejor, una histéresis 0.5% o mejor.

Principio de funcionamiento.

Para describir el funcionamiento de regulador de presión de flujo nos remitimos primero a su diagrama en bloque (figura 2.21) y luego al funcionamiento como tal.

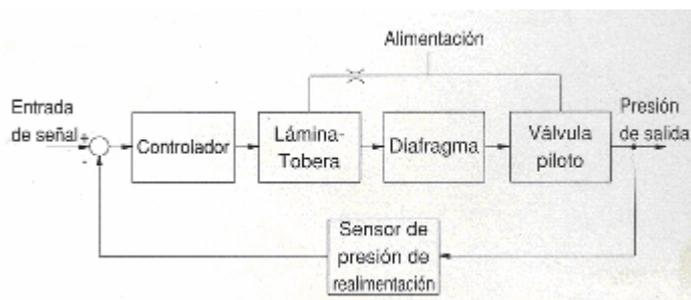


Figura 2.21. Diagrama en bloque del regulador.

Al crear una señal eléctrica [] de entrada **8** al piezoeléctrico de la lengüeta **1** produce una flexión en la misma y hace que se cierre la tobera **2** como consecuencia la contra presión en la cámara de la tobera **3** actúa sobre el diafragma **4** y empuja a la válvula de escape **5** hacia abajo haciendo que la válvula principal **6** se abra y deje pasar el aire hacia la salida. Esta presión de salida es detectada por el sensor de presión **8** que la convierte en una señal eléctrica que realimenta el circuito de control **9**. El controlador realiza un balance entre la señal de mando y la de realimentación consiguiendo que la presión de salida permanezca proporcional a la señal de mando **9**. (ver figura 2.22) [19].

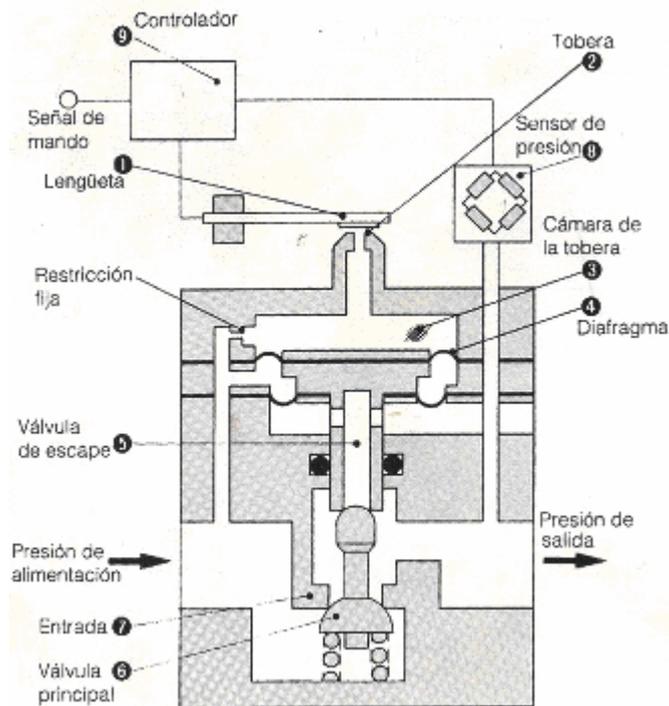


Figura 2.22. Esquema interno del regulador.

2.4 Resultados experimentales.

Prueba del funcionamiento del sistema control de frecuencia a nivel de laboratorio.

Dada la necesidad de controlar los parámetros de la generación de energía eléctrica en el grupo de generación estudiado, y dado también que este grupo trabaja de forma aislada (no están conectadas al sistema de la red eléctrica nacional) lo que permite un mayor rango de error a la hora de controlar dichas variables, se realizó la construcción de un sistema que permita mantener la frecuencia en rango establecido mediante el diseño de un circuito electrónico. Como el motor está propenso a variaciones de velocidad por el aumento o disminución de la carga, variación que se traduce en inestabilidad de la frecuencia a la salida del generador y por tanto una mala calidad de la señal que se le está suministrando a la población.

Prueba del funcionamiento del sistema control de frecuencia a nivel de laboratorio.

Se montó en protoboard un circuito que es capaz de poner a la salida un voltaje equivalente a la señal de frecuencia que hay en la entrada para su posterior control, un circuito restador con el objetivo de acondicionar la señal de salida de la etapa

anterior (eliminar el error de Off- Set), el controlador PI y un conversor de voltaje a corriente para ser entregada al elemento de acción final. El circuito fue montado en el Laboratorio de Mediciones Eléctricas de la Fac. de Ing. eléctrica de la Universidad de Oriente donde se le hicieron distintas pruebas y mediciones para comprobar su correcto funcionamiento.

En este circuito se analizaron las respuestas de este sistema de regulación implementado ante las distintas variaciones de la frecuencia, en este caso las variaciones esta entre 50 y 70 Hz pero con la intención de que esta frecuencia se mantenga en 60Hz. Para logra esta meta antes mencionada fue necesario el uso de algunos equipos tales como:

- Fuente de alimentación. La misma fue configurada como fuente doble alimentar los CI que requieren de ella para su funcionamiento.
- Generador de tren de pulso. Es el encargado de entrar la señal de voltaje y frecuencia variable (manualmente)
- Multímetro digital. Es uno de los instrumentos de medición empleados para tener referencias de los voltajes que existen en un determinado lugar del circuito.
- Osciloscopio. Este instrumento de medición fue empleado para poder visualizar las formas de ondas que se obtienen en el circuito.
- Y la protoboard. Este equipamiento constituye la forma más sencilla de prueba para un circuito.

La figura 2.23, muestra el equipamiento antes mencionado en la mesa de trabajo ya en funcionamiento.



Figura 2.23. En la figura, la mesa de trabajo con todo el equipamiento empleado. A continuación se muestra los resultados obtenidos en el laboratorio:

En la figura 2.24 se tiene el circuito eléctrico del sistema de regulación de frecuencia montado en la protoboard.

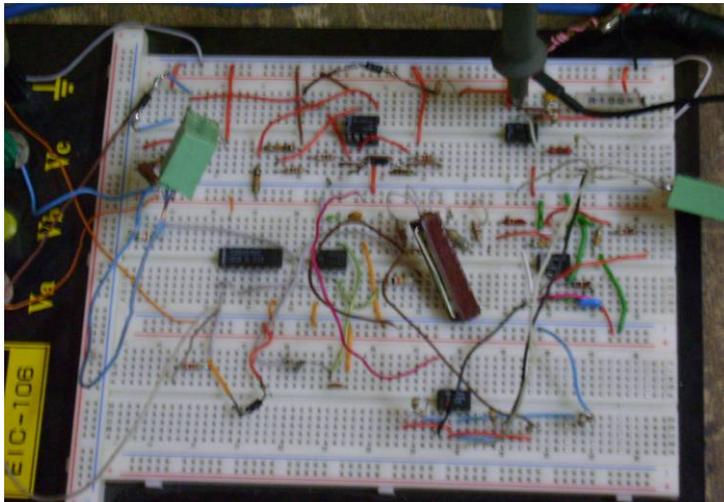


Figura 2.24 Foto del circuito encargado de convertir la frecuencia en voltaje.

La señal de entrada a este circuito proviene de un banco de transformadores que convierten la tensión de generación en una tensión de 12 V con la misma frecuencia, esta señal es de tipo sinusoidal es por ello que para que no se pierda información se coloca a la entrada el CI 4093 con el objetivo de que este brinde al CI 555 un tren de pulsos. En la figura 2.25 se puede apreciar la señal de entrada al CI 4093 y la de salida del mismo.

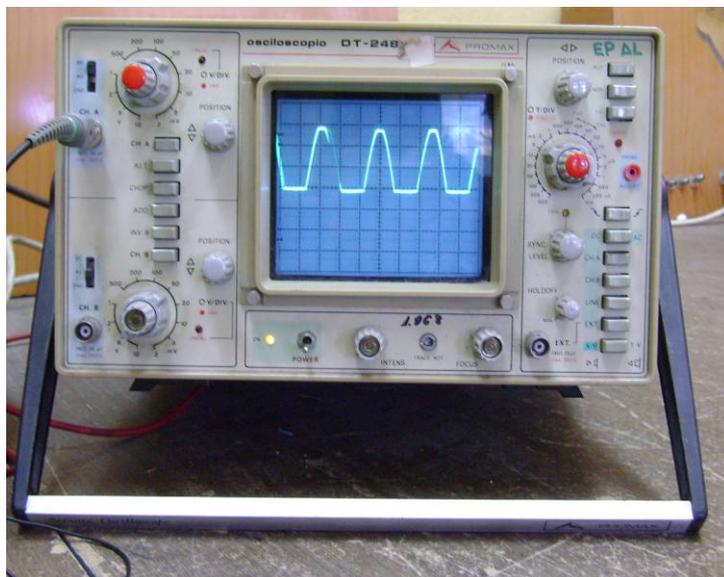


Figura 2.25. En la figura, la señal de entrada al CI 4093.



Figura 2.26. En la figura, la señal de salida del CI 4093.

La figura 2.27 muestra la señal de salida del CI NE555, parte del circuito donde se fija el tiempo en ON del monoestable este tiempo tiene una duración de 13 ms, tiempo que no debe variar aun con cambios de frecuencia a la entrada. Lo anteriormente expuesto puede ser apreciado en las siguientes figuras.



Figura 2.27. En la figura, la señal de salida del CI 555 para 60Hz de frecuencia a la entrada del conversor.



Figura 2.28. En la figura, la señal de salida del CI 555 para 50 Hz de frecuencia a la entrada del conversor.

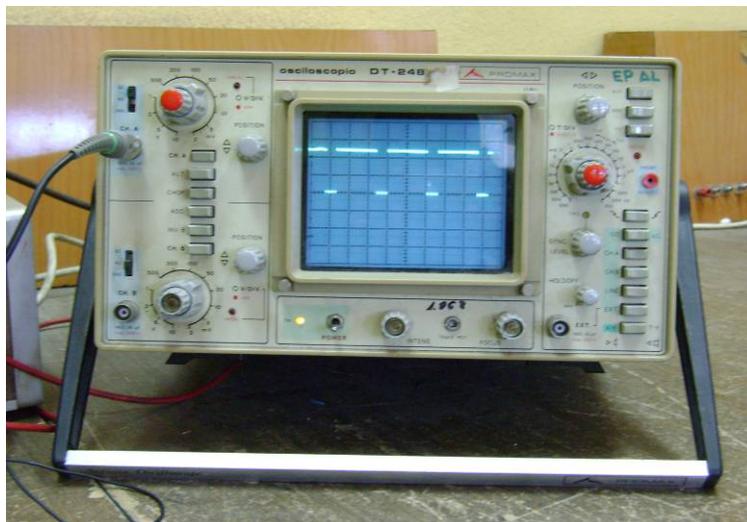


Figura 2.29. En la figura, la señal de salida del CI 555 para 70 Hz de frecuencia a la entrada del conversor.

Inicialmente cuando el equipo se enciende y son suministradas todas la señales de entrada incluyendo la frecuencia como se puede observar en la figura (2.30), se

obtiene a la salida del conversor de frecuencia a voltaje una señal de voltaje (5.037 V) que es equivalente a la frecuencia que hay en la entrada.



Figura 2.30. En la figura, la señal de entrada del conversor de frecuencia a voltaje y su respectiva señal de salida proporcional a la frecuencia de entrada.

Dada variaciones de la frecuencia (50 Hz) a la entrada del circuito se puede observar Figura 2.31 que a la salida se obtiene un voltaje de 4.195 V proporcional a la señal de entrada.



Figura 2.31. En la figura, la señal de salida del circuito para una señal de entrada de 50 Hz

Dada variaciones de la frecuencia (70 Hz) a la entrada del circuito se puede observar que a la salida se obtiene un voltaje de 5.831V proporcional a la señal de entrada.



Figura 2.32. En la figura, la señal de salida del conversor para una frecuencia de entrada de 70 Hz.

A la salida del bloque conversor de frecuencia a voltaje se obtiene una señal de tensión que tiene una componente de alterna que no es conveniente para el bloque precedente puesto que una variación constante del voltaje a la entrada del controlador provoca un mal funcionamiento de este y por tanto un control insuficiente sobre la frecuencia. Es por ello que en el diseño del circuito del conversor se implemento una red RC con el objetivo de eliminar la componente de alterna que trae la señal y entregar un voltaje más invariante en el tiempo. Lo anteriormente expuesto puede ser apreciado en las figuras que precede este comentario.

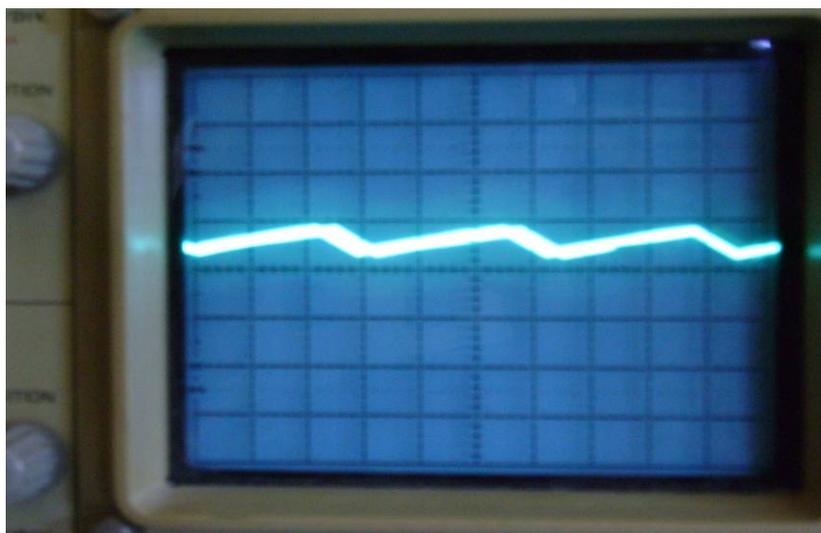


Figura 2.33. En la figura, la señal de salida del conversor de F-V con una frecuencia de 60 Hz.

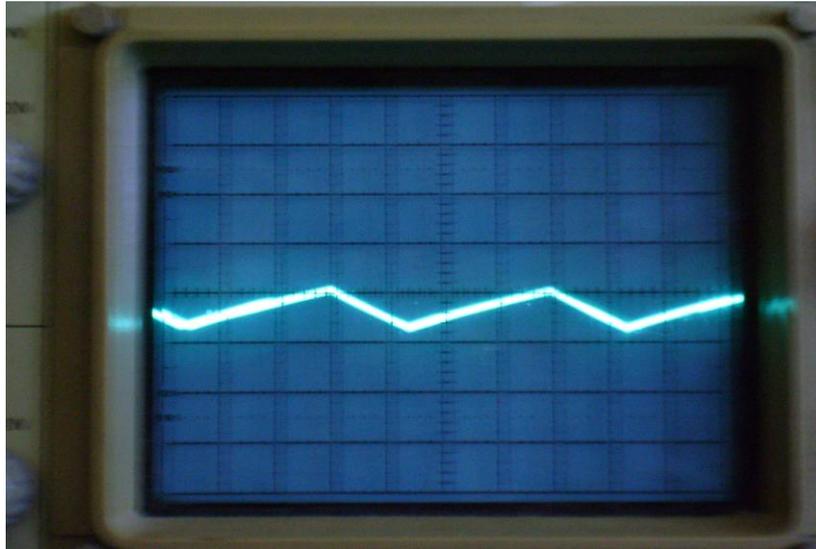


Figura 2.34. En la figura, la señal de salida del conversor F-V con una frecuencia a la entrada de 50 Hz.

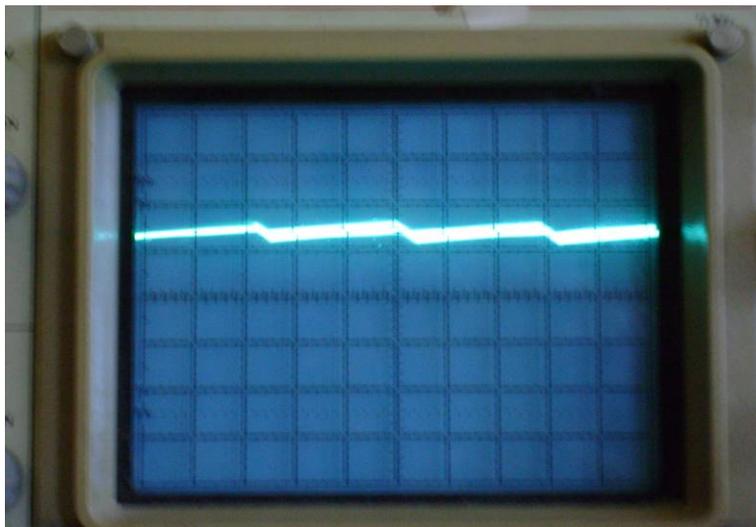


Figura 2.35. En la figura, la señal de salida del conversor de F-V con una frecuencia de entrada de 70 Hz.

Como se puede observar en las figuras anteriores las señales de salida tienen una componente de alterna que debe ser eliminada para no causar trastornos en el control de la frecuencia, es por ello que a la salida de este circuito se coloca una red RC. En las siguientes figuras se podrá apreciar la señal resultante luego de atravesar por la red antes mencionada.

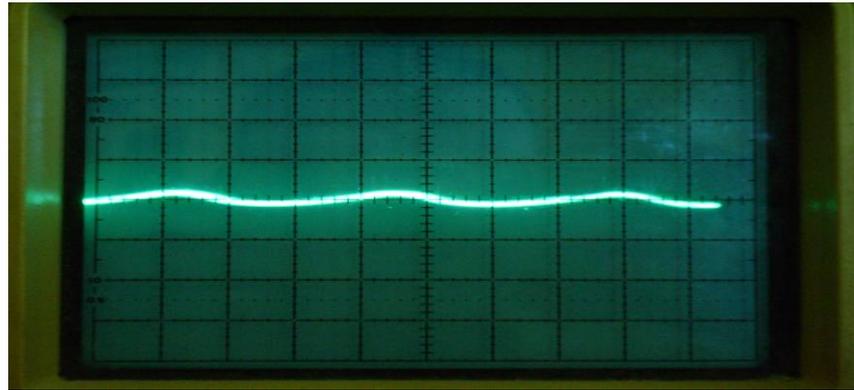


Figura 2.36. En la figura, al señal de salida de la red RC con una frecuencia a la entrada de 60 Hz.

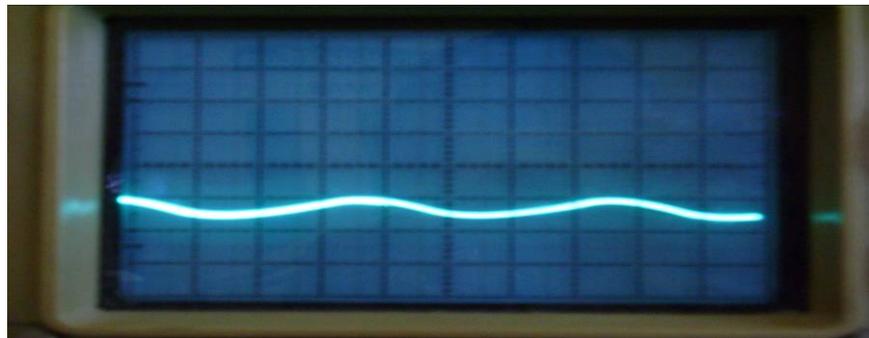


Figura 2.37. En la figura, la señal de salida de la red RC con una frecuencia de 50 Hz a la entrada.

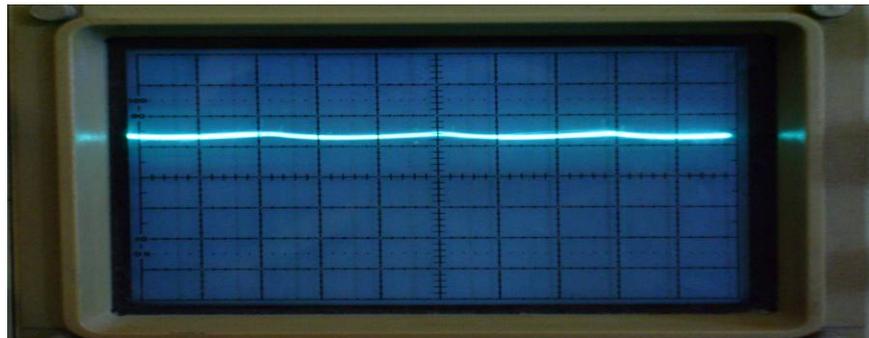


Figura 2.38. En la figura, la señal de salida de la red RC con una frecuencia de 70 Hz a la entrada.

Inicialmente en la etapa de prueba del sistema la salida que se deseaba del circuito restador era la diferencia entre las señales de entrada puesto que una era fijada con el mismo voltaje que sale del convertor de F-V por tanto a la salida hay 0 V no siendo así para una variación de frecuencia a la entrada, luego la fuente que había sido fijada con el mismo voltaje que sale del convertor fue puesta a un valor que permite que ala salida del circuito restador haya 2.5 V,

posteriormente el controlador se encargara de regulara la diferencia que exista entre el voltaje que el tiene de regencia y el que le esta llegando de esta etapa.



Figura 2.39. En la figura, la señal de salida del circuito restador cuando la frecuencia a la entrada es 60 Hz.

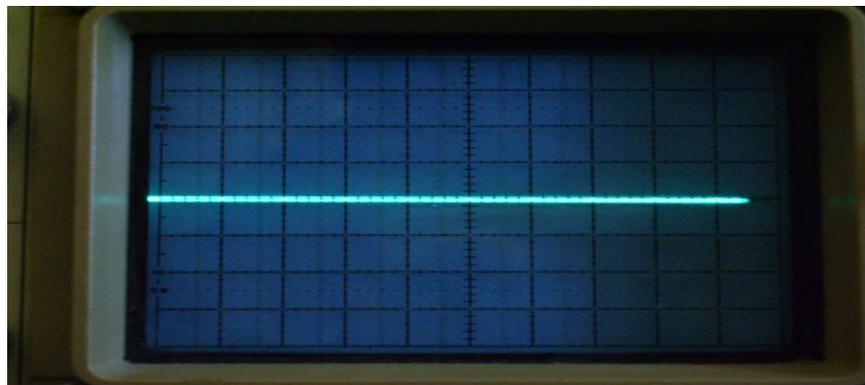


Figura 2.40. En la figura, la señal de salida del circuito restador cuando la frecuencia a la entrada es 60 Hz.



Figura 2.41. En la figura, la señal de salida del circuito restador cuando la frecuencia a la entrada es 50 Hz.

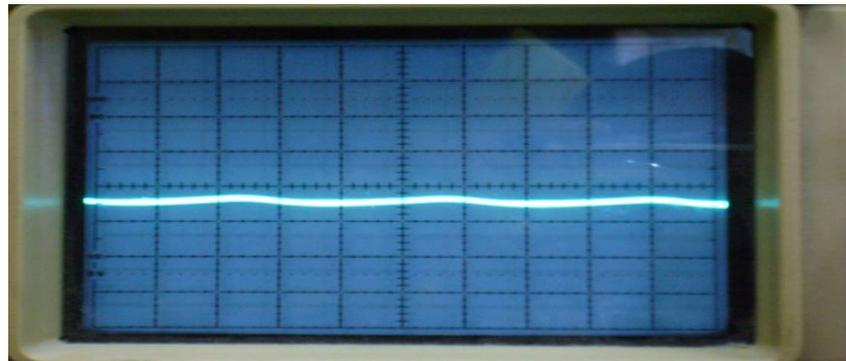


Figura 2.42. En la figura, la señal de salida del circuito restador cuando la frecuencia a la entrada es 50 Hz.



Figura 2.43. En la figura, la señal de salida del circuito restador cuando la frecuencia a la entrada es 70 Hz.

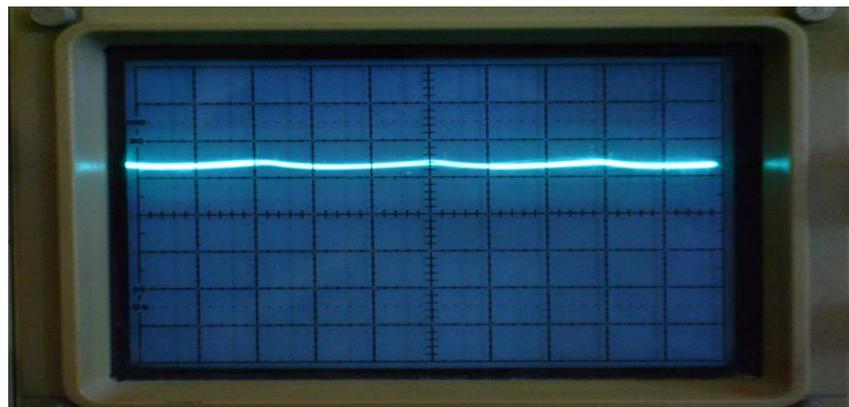


Figura 2.44. En la figura, la señal de salida del circuito restador cuando la frecuencia a la entrada es 70 Hz.

El controlador en el sistema de control es de vital importancia ya que este es el encargado de corregir la variación de frecuencia a la entrada. Inicialmente en la etapa de prueba para el ajuste del mismo se le suministro un voltaje de referencia de 0 V y se conectó a la salida del circuito restador con el objetivo de que si la salida del circuito antes mencionado varia este haga que la frecuencia vuelva a su valor prefijado.



Figura 2.45. En la figura, la señal de salida del controlador par una frecuencia de 60 Hz a la entrada.

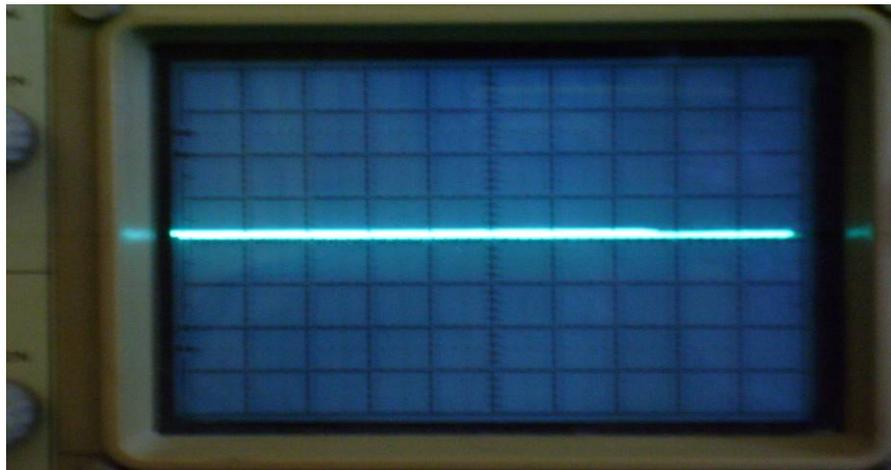


Figura 2.46. En la figura, la señal de salida del controlador para una frecuencia de 60 Hz a la entrada.



Figura 2.47. En la figura, la salida del controlador con una frecuencia de 50 Hz a la entrada.

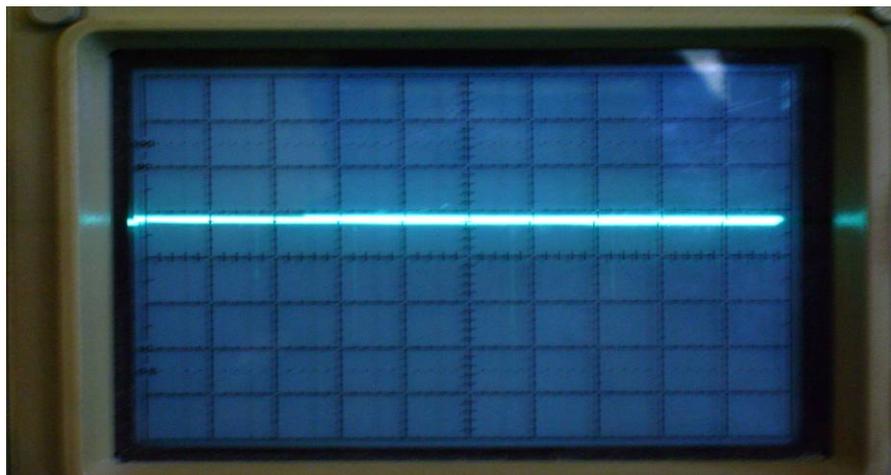


Figura 2.48. En la figura, la salida del controlador con una frecuencia de 50 Hz a la entrada.



Figura 2.49. En la figura, la señal de salida del controlador para una frecuencia de 70 Hz a la entrada.

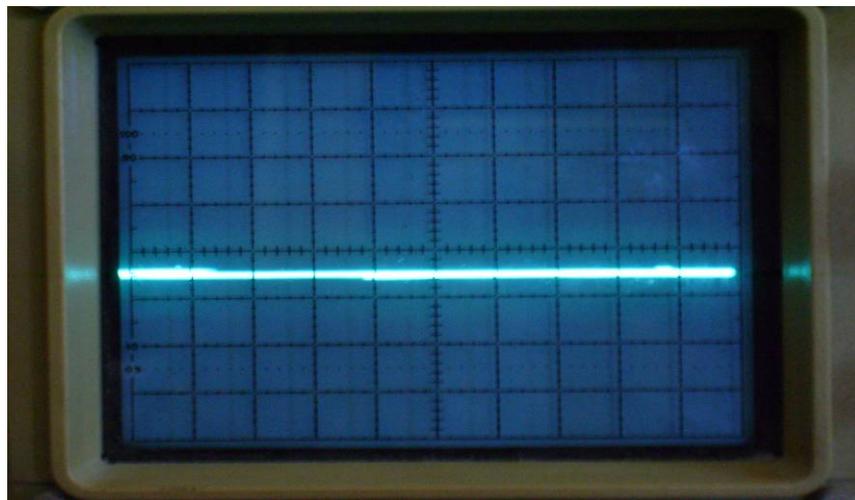


Figura 2.50. En la figura, la señal de salida del controlador para una frecuencia de 70 Hz a la entrada.

Para las pruebas experimentales realizadas al regulador fue necesario el uso del equipamiento (equipos de medición y medios técnicos) que se relaciona a continuación:

- Fuente de alimentación:
 - Marca: FOKGVEIV
 - Modelo: TR – 9193
 - Fabricación: Hungary
- Generador de ondas:
 - Marca: ZHINAN
 - Modelo: ZN1020
 - Fabricación: China
- Osciloscopio:
 - Marca: PROMAX
 - Modelo: DT – 248
 - Fabricación: España
- Multímetro digital:
 - Marca: KEITHLEY
 - Modelo: 179 TRMS
 - Fabricación: U.U.EE

2.5 Valoración económica.

Con la instalación del sistema de control para la regulación de frecuencia que se propone se puede obtener una energía de mejor calidad, así como el mejoramiento de las facilidades de trabajo para los operadores. Lo antes mencionado se traduce en un mejor funcionamiento de la unidad y mayor durabilidad de los equipos instalados.

Por la importancia social, económica, ambiental y estratégica de la electrificación de las zonas apartadas y montañosas del país. El número de estas instalaciones crece cada año, mejorando las condiciones de vida de los residentes de estas zonas y contribuyendo a estabilizar la mano de obra y el desarrollo económico de las mismas, jugando también un papel importante en las concepciones estratégicas del país.

En la tabla %% se hace una relación de los componentes utilizados y su valor comercial actual, necesarios para el montaje del regulador de frecuencia:

En esta valoración económica del trabajo realizado, sólo se tuvo en cuenta el precio de los componentes.

Tabla 2.1. Relación de componentes con su costo actual y el costo total. Los valores de costo y total están dados referentes a euros

Componentes	Cantidad usada	Costo por unidad	Sub. - total
T BC557 (PNP)	1	0.08	0.08
D IN 4001	4	0.06	0.24
XTR110	1	27.00	27.00
RV 0.15K	1	0.19	0.19
RV 0.47K	1	0.19	0.19
RV 100K	1	0.19	0.19
R 1K	2	0.04	0.08
R 1.3K	2	0.04	0.08
R 2K	4	0.04	0.16
R 3K	3	0.04	0.12
R 5K	1	0.04	0.04
R 6K	1	0.04	0.04
R 10K	4	0.04	0.16
R 16K	1	0.04	0.04
R 40K	1	0.04	0.04
R 50K	1	0.04	0.04
R 100K	11	0.04	0.44
R 180K	1	0.04	0.04
R 500K	1	0.04	0.04
R 1000K (1 M)	3	0.04	0.12
C 5.8uf	1	0.10	0.10
C 4.7uf	1	0.10	0.10
C 1uf	1	0.15	0.15
C 0.1uf	2	0.12	0.12
C 0.01uf	2	0.19	0.38
CI NE 555	1	0.59	0.59
CI LM 358	3	0.72	2.16
CI 4093	1	0.47	0.47
	54		33.4
	Total de componentes		Precio total

Al analizar la factibilidad técnica – económica de este trabajo se puede utilizar el criterio del valor activo (V. A. N.) este es un método que es considerado por muchos autores como uno de los mas completo de los abordados, el mismo se basa en el criterio de que un peso actual puede ser invertido inmediatamente y reportar beneficios.

El V. A. N se define como la diferencia entre las entradas y las salidas de efectivo (dinero) ocurridas en cada año y actualizadas para cada unidad de tiempo (normalmente un año).

Para el calculo del V. A. N el análisis se realiza partiendo de ¿Cuanto cuesta el proyecto?, ¿Cuándo va a ingresar inmediatamente después de su puesta en explotación?, ¿Será creciente este ingreso?. De ser afirmativo en estos elementos hay una referencia para aceptar el V. A. N. si el V. A. N es positivo o igual a cero el proyecto es aplicable, si el V. A. N es negativo el proyecto no procede.

Su valor se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$VAN = C_0 + \frac{C_1}{(1+r)} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+r)^n}$$

donde:

C1 y C2: representa los ingresos anuales, o los flujos de efectivo.

r: tasa de descuento apropiada, o de capital de proyecto.

C0: costo inicial del proyecto, tiene valor negativo.

n: vida esperada del proyecto en años.

El costo del capital (r) depende del grado de riesgo del proyecto, del nivel de tasas de interés en la economía y de algunos otros factores.

El valor C0 resulta la suma del costo total de la inversión que hay que hacer para implementar el sistema de control que se desea.

Estos valores del V. A. N de recuperación y el tiempo optimo T. O. R nos guían a aceptar el proyecto, pues con el mismo se debe de recuperar la inversión inicial en el tiempo para el cual se puede calcular el V. A. N (2 años). A partir de este criterio se puede considerar la factibilidad del proyecto. En nuestro caso no se efectúa el calculo debido a que entran en juego otros factores además del económico, la humanización del trabajo de los operadores, los aspectos sociales y estratégicos, la revolución energética, los programas educacionales y de salud, los programas socio – culturales en las comunidades montañosas, la defensa del país, la protección del medio ambiente y otros priorizados por el estado cubano y que justifica cualquier inversión. Además se debe tener en cuenta otro factor sumamente importante como es el hecho de disponer de prototipos nacionales que permite la construcción de reguladores con diseños propios para las instalaciones en el territorio nacional y para la exportación a otros países.

Conclusiones.

En este capítulo se propone un sistema de control automático para la regulación de frecuencia en el grupo de generación y se describe el funcionamiento de cada uno de los bloques que intervienen en el mismo. Por otra parte se le realizan pruebas experimentales al circuito eléctrico del sistema para corroborar si este resuelve la problemática que se viene presentando en la generación de energía eléctrica en la localidad. Además se demuestra la eficiencia económica de la propuesta, siendo esta una alternativa viable y barata con resultados excelentes.

CONCLUSIONES

Los recursos fósiles no son renovables, por lo que no solo para Cuba, sino para las demás naciones emplear fuentes alternativas de energía resulta una tarea vital para la supervivencia humana.

Adoptar conductas que impidan el agotamiento de los recursos energéticos y conserven nuestra permanencia en la Tierra, es responsabilidad de todos los gobiernos y poblaciones en cada región. Cuba emplea alternativas.

Fidel Castro Ruz

En la generación de energía eléctrica mediante cualquier tecnología y entre ellos los grupos electrógenos que utilizan biogás, los factores más importantes de la calidad son la estabilidad de la frecuencia y del voltaje. Con la introducción del regulador de frecuencia concebido en el presente trabajo se puede garantizar la estabilidad de la frecuencia y la tensión, generada en un grupo electrógeno alimentado con biogás trabajando en modo aislado, ante la variación de la demanda de potencia por parte de los usuarios.

Con la presente investigación, se ha logrado el diseño electrónico con tecnología propia de una alternativa de regulador para el control de la frecuencia de la tensión generada en grupos electrógenos alimentados con biogás y que operan en forma aislada.

Se montó en una Protoboard el circuito electrónico del esquema de regulador de la velocidad de rotación del grupo electrógeno y se comprobó el funcionamiento de los bloques siguientes:

- Convertidor de frecuencia a voltaje.
- Regulador PI.
- Convertidor de voltaje a corriente.
- El regulador de presión Marca SMC tipo IT 2010. Este regulador presentó dificultad en su funcionamiento.

Se han cumplido todas las tareas planificadas y el objetivo del trabajo con muy buenos resultados.

Este trabajo no puede considerarse cerrado, sino que deja una puerta abierta a modificaciones futuras. Una posible modificación sería la introducción de microcontroladores para la medición de la frecuencia y el control de la velocidad del grupo electrógeno, además la introducción de nuevas funciones tales como sistema de alarma y protección de la instalación y mediciones de los parámetros fundamentales.

RECOMENDACIONES

- Montaje de un prototipo de regulador haciendo uso de un circuito impreso profesional.
- Reparar el actuador del flujo de biocombustible o sustituirlo por una válvula proporcional.
- Incorporar un sistema de control de calidad de la combustión para reducir la contaminación ambiental.
- Gestionar la introducción del regulador perfeccionado en los grupos electrógenos que consumen biocombustibles.

BIBLIOGRAFÍA

[1] 10.30.3.16/moodle

Datasheet del XTR110 (convertor de voltaje a corriente) en Mediciones Industriales II.

Métodos de ajuste de controladores en Sistema de Control y Control de Procesos

[2] Ogata, k. Ingeniería de control moderna.

[3] Zapata, A. 1998. Utilización de biogás para la generación de electricidad.

Disponible en:

www.cipav.org.co

[4] Marchaim, U. 1992. Biogas processes for sustainable development.

Disponible en:

www.fao.org

[5] Colectivo de autores. 2008. Tierra tropical (Revista de la universidad de EARTH) Costa Rica. Generación de energía eléctrica a partir de biogás.

[6] Mazzone, Virginia. Controladores PID.

[7] Gutiérrez Torres, R. El motor de combustión interna y su impacto ambiental.

[8] Chara, J; Pedraza, G. 2002. Biodigestores plásticos de flujo continuo: Investigación y transformaciones en países tropicales.

Fundación CIPAV.

[9] Energías renovables y no renovables.

Disponible en:

www.construible.es

[10] Métodos de regulación de frecuencia:

Disponible en:

www.ciget.pinar.cu

[11] Garrido, D.I; Guillén, E. 2007. Aplicaciones de la electrónica.

[12] Hohlfeld J, Sasse L. 1986. Production and utilization of biogas in rural areas of industrialized and developing countries. Eschborn, Alemania.

[13] Muche H, Zimmermann H. 1985. La purificación del biogás. Alemania

[14] www.uah.es

[15] www.swagelok.com.mx

[16] www.directindustry.es

[17] Componentes Electrónicas (Amplificador Operacional).

Disponible en:

www.es.wikipedia.org

[18] www.lademajagua.co.cu

[19] Manual de reguladores SMC.

[20] www.dialnet.unirioja.es

[21] www.datasheetcatalog.net

Transistores y circuitos integrados.

[22] Definición y Característica del CI NE555

Disponible en:

proyctoselectronics.blogspot.com

ANEXOS

Anexo 1. Fotos de la planta de generación de electricidad



Figura 1. Planta de generación de energía de la comunidad de Magueyal.



Figura 2. La planta desde una vista superior.

Anexo 2. Control de frecuencia actual.



Figura 1. Bloque de indicadores del actual sistema de control a lazo abierto.