



*Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática*

Trabajo de Diploma

*Título: Diseño de un sistema de control de frecuencia para
una nano hidroeléctrica*

Autor: Yunier Eladio Rodríguez Díaz

Tutor: Msc. Julio Fong Barrio

Curso 2008-2009

Año del 50 Aniversario del Triunfo de la Revolución.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos

A mi tutor Julio Fong Barrio y a todos los profesores que durante el periodo de mi carrera han contribuido al final exitoso de este trabajo.

A todos mis compañeros que con sus consejos me han ayudado desinteresadamente.

A todos

Muchas gracias.

DEDICATORIA



Dedicatoria

*A mi papá Joel Rodríguez Perdomo.
A mi mamá Ramona Díaz Rodríguez.
A mi Herma Yudieska Rodríguez Díaz.*

PENSAMIENTO



Pensamiento

¿Para qué sino para poner paz entre los hombres, ha de ser los adelantos de la ciencia?

José Martí.

Héroe Nacional

RESUMEN



RESUMEN

En el presente trabajo, se diseña un sistema de regulación de frecuencia, para una instalación nano hidrogeneradora, montada en el Lab. GERA de la Fac. de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Oriente. El diseño está concebido para trabajar con una turbinas de acción tipo Pelton . Esta instalación, al igual que la mayoría de las pequeñas centrales hidroeléctricas instaladas en las regiones montañosas de Cuba, opera en régimen aislado. Las pequeñas instalaciones que operan en régimen aislado presentan inestabilidad en la frecuencia y tensión generada por variación de carga demandada por los usuarios y en el caso de la nano instalación instalada en el Lab. GERA presenta la particularidad de que trabaja conjuntamente con otras fuentes de energía renovable formando un sistema híbrido.

Para garantizar el correcto funcionamiento de la instalación se ha implementado un sistema de regulación de frecuencia por variación de caudal de agua. El principio de trabajo del regulador se basa en la variación del caudal de agua en dependencia de la demanda de la carga; el regulador mide la frecuencia y la compara con una referencia y en caso de la presencia de error el regulador actúa, mediante un motor reversible, sobre una electroválvula encargada de la regulación del caudal de agua. De este modo se mantiene la velocidad del rotor del alternador y por consiguiente la frecuencia en su valor nominal.

ABSTRACT.

In the present paper, we designed a system of regulation of frequency, for a nano hidrogeneradora, mounted in GERA Lab of the Faculty of Mechanical Engineering, University of Oriente. The design is designed to work with one type of action Pelton turbines. This facility, like most small hydro installed in the mountainous regions of Cuba, operates under vacuum. Small isolated operating system present instability in the frequency and voltage generated by variation in load demand by users for the facility installed in the nano GERA Lab presents the particularity that works in conjunction with other energy sources renewable forms a hybrid system.

To ensure the proper functioning of the facility has implemented a system of regulation by frequency variation of water flow. The working principle of the regulator is based on the change of water flow depending on the demand of the load, the controller measures the frequency and compared with a reference and in case of error of the regulator acts through a motor reversible, a valve on the charge of regulating water flow. This follows the rotor speed of the alternator and hence the frequency at its nominal value

ÍNDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1:REGULACIÓN DE FRECUENCIA EN PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.	7
Introducción.....	7
1.1 Energía hidráulica e hidroeléctrica.	7
1.2 Origen.....	7
1.3 Componentes de un sistema hidroeléctrico.....	8
1.4 Tipos de Turbinas Hidráulicas.	8
1.4.1 Turbina Francis.....	8
1.4.2 Turbina Kaplan	9
1.4.3 Turbinas de Acción.....	9
1.4.4 Turbina Pelton	10
1.5 Micro y mini-hidroeléctricas para usos productivos y mini-redes comunales.....	10
1.6 Sistemas domésticos individuales (nano-hidroeléctricas).....	11
1.7 Ventajas y desventajas de los sistemas hidroenergéticos.....	11
1.7.1 Ventajas.....	11
1.7.2 Desventajas.....	12
1.8 Regulación de la frecuencia.	12
1.9 Problemas que se presentan al variar la frecuencia.	13
1.10 Tipos de regulación.	14
1.10.1 Regulación a caudal constante.....	14
1.10.2 Regulación de velocidad a caudal variable.....	14
1.10.1 Regulación de frecuencia mediante carga complementaria (carga lastre). ...	14
1.10.3 Control del caudal de agua y carga complementaria (Sistema mixto de regulación de frecuencia).	15
Conclusiones	16
CAPÍTULO II. IMPLEMENTACIÓN DEL REGULADOR DE FRECUENCIA.....	18
2.1 Componentes y dispositivos electrónicos del regulador de frecuencia.....	18
2.2 Disparador de Schmitt (SCHMITT TRIGGER).....	18
2.3 Principio de Funcionamiento del CI 4093.	19
2.3.1 Conexión de los pines del CI 4093.	20
2.4 Definición y características CI SE555.....	20
2.4.1 Características del circuito integrado NE555.....	20
2.4.2 Descripción de los Pines del Temporizador NE555.....	21
2.4.3 Funcionamiento del Circuito Integrado 555.	21
2.4.4 CI NE555 como astable.....	22
2.4.5 CI NE555 como monoestable.....	23
2.4.6 Conexiones de pines del NE555.	24
2.5.1 Esquemas y Configuraciones Externas.	24
2.5.3 Amplificador Operacional Real.	26
2.5.4 Aplicaciones	26
2.6 Tipos de controladores.	27
2.6.1 Selección del controlador.	27
2.6.2 Configuración del controlador.....	28
2.7 Principio de funcionamiento del sistema de regulación de frecuencia por variación de caudal de agua.....	28
2.8 El sistema de control de frecuencia que se propone en este trabajo esta compuesto por los bloques siguientes.....	30
2.9 Fuente de alimentación.	31

2.10 Primer bloque del transductor de frecuencia a voltaje (CI 4093 y Oscilador monoestable).....	32
2.11 Segundo bloque (Convertor de frecuencia a voltaje).....	33
2.12 Bloque de control.....	34
2.13 Bloque de Accionamiento del motor reversible.....	35
2.14 Cálculo de los parámetros del CI 4093 y el Oscilador Monoestable NE555....	37
2.15 Cálculo del circuito de polarización negativa con el amplificador operacional U1B (AO U1B).....	37
2.16 Cálculo del Integrador con el amplificador operacional U2A (AO U2A).....	38
2.17 Cálculo de los parámetros del bloque de control.....	38
2.17.1 Control proporcional integral.....	39
2.17.2 Cálculo de los parámetros del controlador PI.....	39
Conclusiones.....	40
RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	42
Introducción.....	42
Prueba del funcionamiento del sistema control de frecuencia a nivel de laboratorio.	42
Equipos de medición y medios técnicos que se utilizan.....	46
VALORACION ECONOMICA.....	47
CONCLUSIONES.....	50
RECOMENDACIONES.....	51
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	52
ANEXOS.....	53

Introducción

INTRODUCCION.



Hidroenergía en Cuba: una alternativa energética y ambientalista

Gisela Rodríguez Armas
Colaboradora de Radio Rebelde
23 de Enero de 2009, 1:00 p.m.

La Habana, Cuba.- La hidroenergía en Cuba se utiliza desde hace un siglo. No se trata de una estrategia más para producir electricidad, sino de una vía para sustituir el uso de fuentes contaminantes como el petróleo, el gas y el carbón.

La contribución a la preservación del ambiente es tal que solo en la pequeña hidroeléctrica del Guaso, en Guantánamo (zona oriental), se han dejado de emitir a la atmósfera unas 600 toneladas de dióxido de carbono. A escala nacional la cifra superó las mil ciento diez en el 2008.

La isla caribeña posee un potencial hidroenergético instalado por encima de las ciento ochenta unidades generadoras, capaces de entregar unos sesenta megawatt-hora.

Según el ingeniero Jorge Luis Castañeda, especialista del Instituto de Recursos Hidráulicos, la capacidad en explotación cubre las necesidades de unos 35 mil habitantes ubicados en zonas apartadas y de difícil acceso. Hablamos de áreas montañosas y asentamientos rurales.

"Cerca de 500 objetivos económicos y sociales disponen de electricidad gracias a la utilización de esta fuente renovable de energía. Durante el pasado año se dejaron de consumir unas 135 mil toneladas".

"Además, la hidroenergía permitió garantizar el servicio en zonas intrincadas y recuperar parte del sistema electroenergético posterior al paso de los huracanes Gustav, Ike y Paloma por el archipiélago cubano".

La introducción de nuevas tecnologías y la reanimación de las existentes pudieran hacer más eficiente un sistema. Estudios indican que el país posee un potencial que supera los 500 megawatts si se aprovechan los ríos, presas y canales, como es el caso del salto de El Nicho, en el Escambray cienfueguero, aspectos que pretenden impulsar en este 2009.

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 [1].

Energía renovable a pequeña escala una alternativa económica y ambiental factible para la provisión de energía.

Para la región de América Central, las tecnologías de energía renovable a pequeña escala presentan una alternativa económica y ambiental factible para la provisión de energía a comunidades rurales remotas y para la expansión de la capacidad eléctrica instalada, ya sea por medio de sistemas aislados o por proyectos conectados a la red eléctrica. La región cuenta con suficientes recursos para desarrollar sistemas hidráulicos, solares, eólicos y de biomasa, principalmente. Adicionalmente, estas tecnologías pueden disminuir la contaminación del medio ambiente causada por las emisiones de gases de los sistemas convencionales, que utilizan combustibles fósiles como el carbón y productos derivados del petróleo. Estos gases contribuyen al efecto invernadero y al calentamiento global de nuestro planeta. Sin embargo, existen barreras que dificultan un mayor desarrollo de este tipo de energía: la falta de conocimiento de las tecnologías y las capacidades institucional y técnica aún existentes.

Es de aquí que sale la necesidad de elaborar proyectos que le den solución a estas barreras que dificultan este desarrollo.

La generación de energía a partir de una corriente de agua es la fuente de energía renovable más usada en el mundo para generar electricidad. La mayoría es producida con centrales de gran escala que utilizan presas y embalses grandes los cuales pueden almacenar una gran cantidad de agua para regular la generación. Estas centrales tienen la capacidad de generar cantidades considerables de electricidad en forma constante durante ciertos períodos pero también causan impactos ambientales y sociales como: la obstrucción de la corriente de ríos, la inundación de áreas considerables y la reubicación de comunidades.

Los sistemas a pequeña escala, que pueden variar de unos cuantos vatios hasta 5 MW, no causan estos problemas y pueden contribuir a brindar el servicio de electricidad a zonas no-electrificadas y fortalecer la red interconectada. Estos proyectos generalmente son “a filo de agua”, o sea, que desvían temporalmente una parte del caudal de una corriente para la producción de energía hidroeléctrica.

El desarrollo económico de Cuba impone la necesidad del uso de fuentes de energías renovables para la generación de energía eléctrica

La ingeniería hidráulica se enfrenta permanentemente al reto del desarrollo rural en zonas de pobreza extrema, mediante el planeamiento y ejecución de proyectos integrales de aprovechamiento hídrico. Las zonas de alta montaña, no obstante la variabilidad extrema del flujo base aprovechable, nos presentan grandes bondades topográficas en materia de saltos o caídas hidráulicas y por tanto potenciales importantes en energía hidroeléctrica. La regulación de las nano, mini y micro cuencas mediante nano, mini y micro represamientos y un manejo adecuado de las mismas, nos permitirá en el futuro incrementar el potencial hidro energético con miras a elevar los niveles de vida de la población más desfavorecida, mediante el principal ingrediente – la energía eléctrica – que es el motor del desarrollo. En los últimos años se ha realizado grandes esfuerzos para abaratar los costos de las nano, mini y micro centrales hidroeléctricas que permita ponerlos al alcance de la

mayor parte de comunidades de los países en vías de desarrollo, mediante programas de electrificación rural. El estudio hidrológico para este tipo de proyectos representa uno de los aspectos más importantes, no sólo por que con ello se garantiza el abastecimiento permanente que satisfaga las condiciones más críticas, sino que también permite prever el gasto de avenidas en máximas crecidas y la cantidad y calidad de sedimentos que aporta la cuenca con la finalidad de contrarrestar el fenómeno abrasivo de la maquinaria hidráulica.

Durante las últimas décadas se ha venido promoviendo el concepto de tecnologías apropiadas como una de las claves para contribuir a la mejora de la calidad de vida de los sectores más pobres de los países en desarrollo. En el caso de los servicios energéticos en zonas rurales aisladas, donde existe una enorme deficiencia de estos, se viene promoviendo una gama de alternativas tecnológicas apropiadas para aprovechar recursos energéticos locales y de pequeña escala, energía nano, mini y micro hidráulica, solar, eólica, biogás; entre otros. Los resultados confirman que dichas alternativas tecnológicas contribuyen principalmente de dos formas:

a) reduciendo los costos de implementación de los sistemas y haciéndolos más accesibles a los pobres.

b) asegurando el suministro de repuestos y asistencia técnica y, consecuentemente, contribuyendo a asegurar la sostenibilidad de dichos servicios.

El aprovechamiento de recursos hidroenergéticos a pequeña escala, son ejemplos muy concretos de cómo reducir costos y asegurar la confiabilidad de las pequeñas centrales hidráulicas. Asimismo, muestran también que el desarrollo y promoción de tecnologías apropiadas en energías renovables no están agotados, por el contrario, hay una importante necesidad de seguir innovando y contribuyendo en temas tan esenciales como, reducción de costos, simplicidad de los sistemas y también en la demostración práctica a los planificadores y responsables de políticas, sobre la viabilidad de estas alternativas para contribuir al acceso de millones de pobres a la energía.

Uno de los principales problema que presenta las nano, mini y micro hidroeléctricas es que son inestables, el flujo de agua que llega a estas varia, esto trae como consecuencia la variación de la frecuencia por lo que se hace necesario implementar un sistema de regulación donde le de solución a esta problemática.

Este trabajo esta diseñado para darle solución a este problema implementando un sistema de control de frecuencia con el objetivo de eliminar las variaciones de esta en el sistema

Para el control automático de la frecuencia de la tensión generada en pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) que operan en forma aislada, se utiliza básicamente dos métodos: uno por control de carga balastro (dummy load control - control de carga ficticia) y otro por variación de caudal turbinado (flow control - control por flujo). El método de regulación de la frecuencia que se emplea en este trabajo es por variación del caudal turbinado (flow control - control por flujo)

En el sistema regulador de frecuencia por variación de caudal, un servomecanismo controlado para la frecuencia generada actúa sobre el órgano regulador de caudal, modificando la cantidad de agua turbinada. El diagrama en bloques de la Figura 1 describe el regulador de frecuencia antes mencionado.

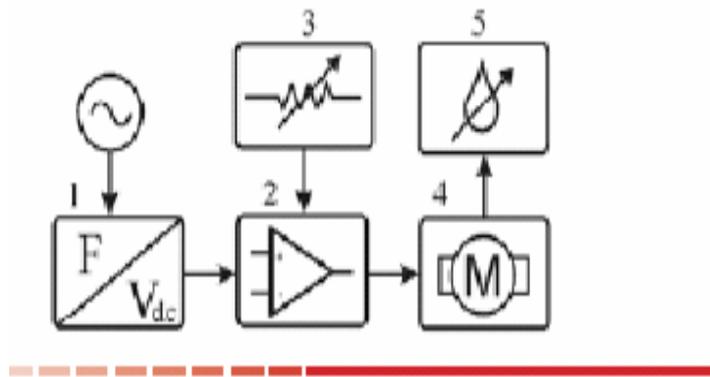


Figura: 1.1 Sistema regulador de frecuencia por variación de caudal de agua.

1. Conversor de frecuencia a tensión.
2. Circuito comparador.
3. Tensión de referencia.
4. Servomotor de regulación.
5. Órgano regulador de caudal.

La velocidad máxima de operación del órgano regulador de caudal está limitada por las condiciones hidrodinámicas del aprovechamiento. En PCH, suele ser lenta respecto de la variación de la carga demandada. En el caso particular de las PCH, donde están involucradas máquinas de pequeño tamaño, los momentos de inercia de rotación son reducidos, con lo que los cambios de velocidad resultan importantes frente a mínimas modificaciones del par resistente. Este problema se agudiza cuanto menor sea la potencia instalada, ya que, ante una disminución de la potencia, se incrementa las variaciones relativas de carga [Muñoz et al. 1996].

En general, el tiempo de respuesta de los sistemas de regulación de frecuencia por variación de caudal es bastante mayor que los sistemas de control por carga balastro. Si bien esto constituye una desventaja de este sistema, la ventaja se encuentra en la posibilidad de almacenar agua, situación no contemplada en los reguladores por carga balastro. La posibilidad de almacenar agua en reservorios se justifica plenamente en regiones donde la variación del caudal módulo, del curso de agua o de la cuenca de aporte, no es constante durante un determinado periodo [2].

Problema de la investigación:

Irregularidades que se manifiestan debido a las limitaciones en la medición de frecuencia y su control en las nano, mini y micro hidroeléctricas.

Objeto de la investigación:

El control de frecuencia en una instalación nano hidroeléctrica montada en el Laboratorio GERA de la Fac. de Ing. Mecánica de la Universidad de Oriente.

Objetivo de la investigación:

Diseño de un sistema de regulación de frecuencia empleando el método de regulación por caudal de agua, que sea capaz de medir y mantener la frecuencia en 75 ± 1 Hz en una instalación nano hidroeléctrica.

Campo de acción de la investigación:

El control de frecuencia en pequeñas instalaciones hidroeléctricas, mediante la regulación del caudal de agua.

Hipótesis de la investigación:

Si se desarrolla un sistema de regulación de frecuencia por caudal de agua, se podría disponer de un sistema de regulación con tecnología propia que permita mantener dentro de determinados límites la frecuencia de trabajo de una nano o micro instalación hidroeléctrica.

La novedad de la investigación:

- Simplificación en la medición de la frecuencia.
- Un regulador de frecuencia con circuito electrónico sencillo, compacto y flexible.
- Simplificación en la implementación del sistema de regulación utilizando componentes de fácil adquisición que permita asegurar la sostenibilidad de la instalación.

Tareas de la investigación:

- Caracterizar el control de frecuencia en particular el control de frecuencia por caudal de agua.
- Diseñar (esquema en bloque) del regulador de frecuencia por caudal de agua.
- Montaje en protoboard y comprobación de algunos de los bloques del sistema de regulación de frecuencia.
- Corroborar la propuesta mediante la valoración de expertos.

Técnicas y métodos empleados en la investigación:

- Técnicas y métodos empíricos: revisión de documentos, estudio, encuestas, análisis de trabajos anteriores, consultas y entrevistas a expertos en el tema.
- Método histórico – lógico.
- Método de análisis – síntesis.
- Métodos experimentales: simulación, medición.
- Comprobación experimental.

CAPÍTULO 1

CAPITULO 1:REGULACIÓN DE FRECUENCIA EN PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.

Introducción

Las instalaciones denominadas nano, micro, mini centrales hidroenergéticas, según el nivel de energía eléctrica que produzcan, van equipadas con generadores sincrónicos, los cuales son máquinas robustas, de simple control y de bajo nivel de mantenimiento. Estas máquinas generan energía eléctrica cuya frecuencia y la velocidad son sincrónicas, de ahí su denominación.

Estas instalaciones funcionando como sistemas aislados principalmente en regiones donde tienen acceso al Sistema Electro energético Nacional, estas enfrentan la necesidad de mantener constantes tanto la tensión como la frecuencia, independiente de las variaciones de carga originadas por el consumo eléctrico y las variaciones del flujo de agua en la turbina . para darle solución a este problema es necesario implementar un regulador de frecuencia que permita mantener constante estos parámetros.

1.1 Energía hidráulica e hidroeléctrica.

La energía hidráulica se refiere al aprovechamiento de la energía potencial que tiene el agua (por diferencia de altura) que se obtiene buscando una caída de agua desde cierta altura a un nivel inferior, la que luego se transforma en energía mecánica (rotación de un eje), con el uso de una rueda hidráulica o turbina. Esta energía se puede utilizar directamente para mover un pequeño aserradero, un molino o maquinaria. También es posible conectar la turbina a un generador eléctrico y de esta manera se transforman la energía mecánica en energía eléctrica, con la ventaja de trasladar con mayor facilidad la energía a los puntos de consumo y aplicarla a una gran variedad de equipos y usos productivos.

Por lo tanto, la cantidad de potencia y energía disponible en el agua de un río o una quebrada, está en relación directa a la altura o caída disponible, así como de la cantidad de agua que se trasiega (caudal). Como estrategia inicial para escoger un posible aprovechamiento hidráulico se debe buscar la mayor caída o altura disponible y de esta manera usar la cantidad mínima de agua que se requiera para satisfacer las necesidades de energía y potencia [3].

1.2 Origen.

La utilización de la energía hidráulica data de la época de los griegos, quienes empleaban la rueda hidráulica para bombear agua. Tanto la rueda hidráulica vertical como la horizontal se usaron en la Edad Media y el Renacimiento en la agricultura, minas, industria textil, industria forestal y en el transporte. Al inicio del siglo XIX se instaló la primera turbina hidráulica. La energía hidráulica tuvo mucha importancia durante la Revolución Industrial; impulsó las industrias textiles y del cuero y los talleres de construcción de máquinas a principios del siglo XIX. Aunque las máquinas de vapor ya estaban perfeccionadas, el carbón era escaso y la madera poco satisfactoria como combustible, por lo que la energía hidráulica ayudó al crecimiento de las nuevas ciudades industriales que se crearon en Europa y América [3].

1.3 Componentes de un sistema hidroeléctrico.

En una central hidroeléctrica, se transforma la energía potencial del agua en energía mecánica con una turbina hidráulica y luego, en energía eléctrica a través de un generador. A continuación se mencionan los componentes que pueden formar parte de estos sistemas [3].

- Desarenador: se utiliza para eliminar la arena y sedimentos de la corriente en el canal.
- Cámara de carga: es un punto de acumulación del agua antes de entrar a la tubería de presión.
- Tubería de presión: es la tubería que conduce el agua a presión hasta la turbina.
- Turbina: es el elemento encargado de transformar en energía mecánica la energía contenida en el agua. Existen diferentes tipos de turbina según la relación de caída y agua.
- Generador o Alternador: se encarga de convertir la energía mecánica recibida de la turbina a través de un eje, en energía eléctrica. La potencia de los generadores tiene que estar acorde con el de la turbina. Para proyectos de nano- y micro-hidro generalmente se usan alternadores, que generan electricidad a corriente directa (CD), a 12 ó 24 V. En proyectos más grandes, los generadores producen electricidad de corriente alterna (CA) a voltajes mayores.
- Transformador o Inversor: se utiliza para elevar el voltaje de la corriente generada. En muchos casos se puede prescindir del transformador, pero si se debe transportar la corriente a grandes distancias y el generador trabaja a bajo voltaje, es necesario utilizar un banco de transformadores. En proyectos de nano- y micro- hidro, se puede aplicar un inversor el cual tiene la función de convertir la electricidad de corriente directa a bajos voltajes, generada por el alternador, a corriente alterna de voltajes mayores (por ejemplo, de 12 a 110 V).

1.4 Tipos de Turbinas Hidráulicas.

La turbina hidráulica es el componente principal de una central hidroeléctrica, donde se transforma la energía contenida en el agua, en energía mecánica. Comparada con una rueda de agua, una turbina hidráulica logra mayores velocidades rotacionales y eficiencias de conversión que la hace más apropiada para la generación de electricidad. Existen diferentes tipos de turbinas. El tipo más apropiado para un proyecto depende de las condiciones topográficas e hidrológicas del sitio, siendo el caudal y caída las más importantes [3].

1.4.1 Turbina Francis

Es la turbina más utilizada en centrales grandes. Se caracteriza por que recibe el flujo de agua en dirección radial, orientándolo hacia la salida en dirección axial. Es más conveniente usar esta turbina cuando los saltos de agua están entre 15 y 150 mts. Estas tienen una eficiencia de conversión entre el 90 y 94%.

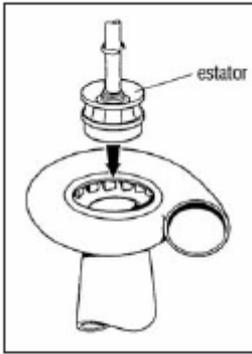


Figura:1.3. Turbina "Francis"

1.4.2 Turbina Kaplan

Es una turbina de tipo hélice. Se compone básicamente de una cámara de entrada que puede ser abierta o cerrada, un distribuidor fijo, un rodete con cuatro o cinco palas fijas en forma de hélice de barco y un tubo de aspiración. Se puede usar esta turbina para caudales grandes y saltos de agua menores de 50 m. Las turbinas tipo Kaplan se consideran con eficiencia del 93-95%.

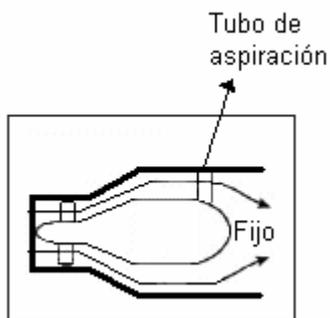


Figura:1.4. Turbina "Kaplan"

1.4.3 Turbinas de Acción

El estator de una turbina de acción opera en aire y se propulsa por la energía cinética del agua que lo impacta a alta velocidad, provocada por uno o más chorros de agua. El agua está a presión atmosférica antes y después del contacto con el estator, por lo tanto sólo se necesita una cubierta para controlar el chapoteo del agua y prevenir accidentes. Este tipo de turbina es muy apropiada para sitios con pequeños caudales y grandes caídas, un escenario común para proyectos micro-hidro. En comparación con la turbina de reacción, la de acción es más económica, de simple fabricación y mantenimiento, así mismo es menos susceptible a daños por la arena u otros materiales en el agua. Sin embargo, tiene menor eficiencia, gira a velocidades menores y no es muy apropiada para sitios con caídas bajas.

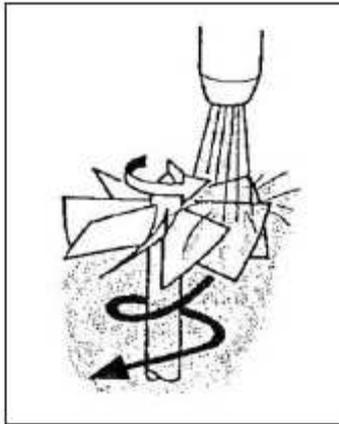


Figura:1.5. Turbina de acción

1.4.4 Turbina Pelton

Este es el tipo de turbina de acción más común. Consta de un disco circular que tiene montados en su periferia unas paletas en forma de doble cuchara y de un inyector que dirige y regula el chorro de agua que incide sobre las cucharas, y que provoca así el movimiento de giro de la turbina. Se usa cuando la caída de agua es grande (alrededor de 80 m). La eficiencia está entre el 84 y 92%.

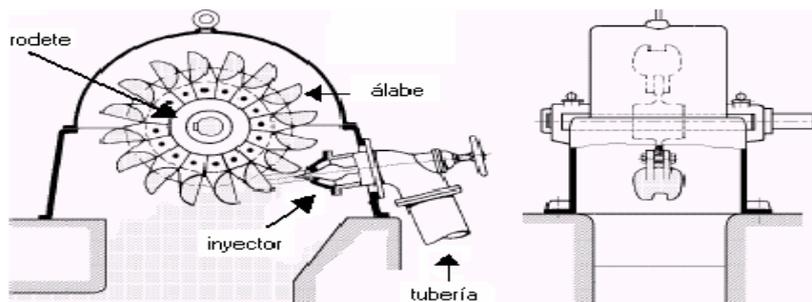


Figura:1.6. Turbina "Pelton".

Especificación. En el Laboratorio del Centro GERA de la FAC. de Ing. Mecánica de la Universidad de Oriente, tiene instalada una nano hidroeléctrica con una Turbina "Pelton", para la cual se ha diseñado el regulador de frecuencia.

1.5 Micro y mini-hidroeléctricas para usos productivos y mini-redes comunales.

Estos sistemas son instalados, por lo general, para pequeñas poblaciones o pequeñas ciudades no interconectadas a las líneas de un sistema de transmisión y que de acuerdo con los planes o programas nacionales o regionales no van a ser incorporadas en un mediano plazo. El confort energético, logrado con estos sistemas, permite un nivel de electrificación similar a cualquier vivienda cuyo suministro eléctrico sea la red convencional. Las potencias alcanzadas por estos sistemas, que pueden ser automatizados o manuales, oscilan entre 1 kW hasta 1.000 kW según las características del salto. La energía obtenida puede acumularse en baterías o consumirse directamente, dependiendo de la capacidad del sistema. El desarrollo de pequeños proyectos comunales genera una serie de beneficios que vienen a mejorar significativamente las condiciones y la calidad de vida de las familias que hacen uso de los servicios facilitados por la energía hidráulica. Además,

el disponer de ella permite que sus usuarios proyecten o inicien pequeñas o medianas actividades agroindustriales, entre ellas, refrigeración de leche, elaboración de productos lácteos, sierras para aserrar madera, despulpado de café y otros.

Sin embargo, uno de los aspectos importantes que aportan el desarrollo de un proyecto de esta naturaleza, es la agrupación comunal en la cual se organizan las familias en torno al proyecto al participar y aportar recursos de mano de obra, equipo y materiales. En Cuba se han desarrollado varios proyectos para generación de electricidad tipo mini-redes, que son ejemplo de la integración comunal en busca de mejores oportunidades para el desarrollo [3].

1.6 Sistemas domésticos individuales (nano-hidroeléctricas)

Para este tipo de sistemas se aplican las nano-turbinas, que son pequeños sistemas de energía hidráulica que aprovechan la fuerza de pequeños ríos y quebradas, principalmente para generar energía mecánica.

Además se pueden acoplar estas turbinas con alternadores o generadores de capacidad en el rango de 300W a 12 voltios, hasta 1 kW a 110 voltios, dependiendo del caudal del agua, la demanda de electricidad y el financiamiento disponible. Posibles aplicaciones de las nano-turbinas son los usos mecánicos en actividades agrícolas como despulpe de café, carga de baterías que luego pueden ser utilizadas en hogares para la de iluminación o la provisión de electricidad a viviendas cercanas. Actualmente, se han instalado sistemas de este tipo en diferentes de zonas agrícolas en Cuba por gestiones particulares o estatales [3].

1.7 Ventajas y desventajas de los sistemas hidroenergéticos.

A continuación se describen las principales ventaja desventajas [3]

1.7.1 Ventajas

Entre las ventajas que tiene la hidro-energía a pequeña escala se citan:

- Fuente limpia y renovable de energía: no consume agua, sólo la utiliza. No emite gases de efecto invernadero y los impactos locales no son significativos. Además es un recurso inagotable, en tanto y cuando el ciclo del agua perdure y se conserve la cuenca.
- Bajos costos de operación: no requiere de combustibles y las necesidades de mantenimiento son relativamente bajas por lo que los gastos de operación son bajos.
- Disponibilidad de energía: la generación de energía generalmente es continua y su disponibilidad es predecible.
- Funciona a la temperatura ambiente: no hay que emplear sistemas de refrigeración o calderas que consumen energía y, en muchos casos, contaminan.
- Eficiencia: la tecnología tiene una alta eficiencia en la conversión de la energía potencial en el agua a energía mecánica y eléctrica (entre 75% y 90%), mayor que la eficiencia de otras tecnologías.
- Solidez: la tecnología es robusta y tiene una vida útil larga. Los sistemas pueden funcionar 50 años o más sin requerir mayores inversiones que para reemplazar componentes.

- Combinación con otras actividades: se puede combinar con otro tipo de actividades económicas, como la irrigación de suelos para siembra.
- Usos productivos: la disponibilidad continua y estable de energía permite el desarrollo de actividades productivas y económicas, tales como aserraderos, lecherías, procesamiento de productos agrícolas. Estas actividades ayudan a aumentar la rentabilidad del proyecto y la calidad de vida de las comunidades aledañas.

1.7.2 Desventajas

A continuación se describen las principales desventajas:

- Alto costo inicial: la inversión requerida está muy concentrada en el desarrollo inicial del proyecto, como por ejemplo en la ejecución de estudios, construcción de la obra civil, y la compra del equipo electromecánico.
- Disponibilidad local: la tecnología depende de las condiciones topográficas e hidrológicas, entonces no está disponible en cualquier sitio. Las posibilidades de transmisión de la energía a largas distancias son limitadas por los costos de éste.
- Potencia máxima: ésta es limitada y definida por el recurso natural en un sitio. Limita las posibilidades de expansión a largo plazo para atender al crecimiento de la demanda.
- Variabilidad del caudal: los caudales de agua pueden variar considerablemente durante las diferentes temporadas, lo que tiene impacto en la generación de energía.
- Necesidad de estudios: Los pequeños proyectos hidroeléctricos, en particular las pequeñas centrales, requieren de estudios técnicos elaborados para conocer el potencial disponible y la factibilidad técnica. Esto implica un costo y un plazo significativo en la puesta en marcha del proyecto.

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 de los alternadores. Esto es:

$$n = 60 \frac{f}{p} \text{ [rpm]} \quad \text{Donde: } n = \text{velocidad en rpm del generador.}$$

f = frecuencia en Hz.

p = número de pares de polos.

Al presentarse variaciones en la velocidad trae como consecuencia las variaciones de la frecuencia y de la tensión a la salida del generador. Debido a esto es importante el control automático de estos parámetros mediante la regulación de frecuencia, utilizando 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.

La capacidad de generación conectada a una red eléctrica en condiciones normales de funcionamiento es superior al consumo. Por esta razón, se mantiene una reserva

de energía rodante, una capacidad no utilizada que puede compensar las variaciones bruscas de carga y mantener la frecuencia dentro de un margen de tolerancia establecido.

Pueden presentarse los siguientes problemas:

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 estas condiciones, si la disminución de la frecuencia se sitúa por encima del margen de tolerancia y los sistemas de regulación no son capaces de responder de forma suficientemente rápida para detener la caída de la misma, puede llegar a producirse un colapso en el sistema.

La recuperación del mismo se lograría mediante un deslastre rápido, selectivo y temporal de cargas.

Asimismo, un incremento brusco de la carga hará que los alternadores pierdan algo de velocidad. En tales casos, los sistemas de regulación de los alternadores detectan esas variaciones de velocidad y suministran energía mecánica adicional a la turbina (en el caso de un control con flujo variable). Así, el incremento de carga se reparte entre todos los generadores conectados a la red y se alcanza un nuevo equilibrio entre carga y generación.

2. La carga es inferior a la generación. En este caso, la frecuencia aumenta. La compensación 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 y particularmente en nano, micro y mini hidroeléctricas. En los micro aprovechamientos el efecto es muy importante no sólo por hallarse aislados de la red, sino además por el bajo valor de potencia instalada [4].

1.9 Problemas que se presentan al variar la frecuencia.

En situaciones normales de tolerancia, la principal problemática de estas variaciones de frecuencia son los cambios en la velocidad de las máquinas rotativas.

La problemática siguiente pueden producir los siguientes fenómenos:

- Los motores transmiten más o menos potencia.
- Cuando disminuye la velocidad del generador, disminuye a su vez la capacidad de generación.
- 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.
- Las turbinas del o los sistemas de generación se ven sometidas a fuertes vibraciones que suponen un severo esfuerzo de fatiga.

Para que esto no traigan consecuencias que me dañen la instalación, se deben tomar las medidas necesarias de protecciones de desconexión de máxima y mínima frecuencia [4].

1.10 Tipos de regulación.

1.10.1 Regulación a caudal constante.

La regulación a caudal constante se realiza manteniendo el caudal constante y variando el valor de carga secundaria necesaria para que la potencia que ésta disipa, junto con la potencia consumida, sea igual a la potencia generada.

$$\text{Potencia Generada} = \text{Potencia Consumida} + \text{Potencia disipada en la Carga Secundaria}$$

Este principio se le aplica a máquinas pequeñas debido a que el costo de las resistencias resulta cada vez más prohibitivo a medida que aumenta la potencia instalada.

Un aumento de la potencia consumida por la carga primaria se traduce en una disminución de la potencia disipada por la carga secundaria y viceversa.

Los métodos más difundidos para realizar este tipo de regulación son:

- Absorción de carga mediante resistencias eléctricas.
- Absorción de carga por corrientes de Foucault.

El empleo de resistencias de carga es una forma ineficiente de regulación, ya que más de la mitad de la energía se desperdiciará al disiparse en las resistencias.

Es mucho mejor desde el punto de vista de la eficiencia, el empleo de un accionamiento que actúe sobre la válvula de control del flujo de agua de la turbina, esta se le puede ser reciclada para usarla nuevamente. Por lo general, los micro aprovechamientos no cuentan con tales reservorios ya que la mayoría se ubica sobre el mismo curso de agua. Hoy en día, sólo las minicentrales y centrales de gran escala utilizan este tipo de accionamientos [5].

1.10.2 Regulación de velocidad a caudal variable.

En este tipo de regulación, la potencia generada está definida exclusivamente por el consumo, esto es:

$$\text{Potencia Generada} = \text{Potencia Consumida}$$

Este tipo de regulación se utiliza tanto en grandes como en pequeñas máquinas, y consiste en adecuar la potencia generada a la potencia consumida variando el flujo de agua que ingresa a la turbina.

1.10.1 Regulación de frecuencia mediante carga complementaria (carga lastre).

Este tipo de regulación se realiza manteniendo el caudal de agua y la potencia generada constante, variando la potencia que se disipa en una carga complementaria en dependencia de la potencia consumida de la energía eléctrica por los usuarios o sea, manteniendo constante la suma de la potencia consumida por los usuarios y la potencia disipada en una carga complementaria.

Este método de regulación de la frecuencia se utiliza en pequeñas instalaciones hidroenergéticas debido a que la carga complementaria se lleva a efecto a través de bancos de resistencias y que resultan costosas en instalaciones de gran potencia.

El uso de este método de regulación hace al sistema de generación poco eficiente, ya que gran parte de la energía se desperdicia al disiparse en la carga complementaria, lo que implica un consumo grande de agua, pero tiene la ventaja de una respuesta rápida en la regulación y se logra mediante un sistema más compacto y a un costo relativamente bajo.

Hay varias formas de implementar lo anterior. Éstas son:

- Regulación por variación de Ángulo de Fase
- Modulación por Ancho de Pulso
- Cargas Binarias

La regulación por variación de ángulo de fase: consiste en modificar continuamente el ángulo de disparo de los elementos de potencia, triacs o tiristores, de forma de variar la potencia entregada a la carga.

La regulación de la modulación por ancho de pulso: Para un voltaje dado, se genera un nuevo voltaje a través de la conmutación rápida (*fast switching*). El valor medio del segundo voltaje puede regularse ajustando el ciclo de trabajo, esto es, la fracción de tiempo que se conecta la carga secundaria. Por lo general esto se hace cambiando la duración de cada pulso mientras se mantiene constante el tiempo entre pulsos (también puede hacerse en forma inversa).

Para el uso de cargas binarias: Se utiliza un conjunto de cargas en el cual cada carga tiene un valor igual al doble de la precedente y a la mitad de la carga que le sigue. Con n cargas distintas pueden lograrse un total de $2n$ combinaciones de valores de potencia a conectar. Para la conmutación de estas cargas se puede usar toda una serie de interruptores de estado sólido [5].

1.10.3 Control del caudal de agua y carga complementaria (Sistema mixto de regulación de frecuencia).

Los inconvenientes generados con respecto a los tiempos de respuesta y las variaciones relativas de carga hacen que se deba recurrir a métodos alternativos para el control de la frecuencia generada.

Una opción para el control de la frecuencia de la tensión generada puede estar en un sistema que combine las ventajas del sistema de regulación por carga ficticia, con las ventajas del método de regulación por caudal.

Este método consiste en la regulación de la frecuencia combinando el control del gasto de agua y la potencia disipada en una carga complementaria (carga lastre). Dada las particularidades de los consumidores, la carga complementaria puede implementarse de modo que represente entre el 20 y 30 % de la potencia nominal del generador.

Los accionamientos mecánicos son caros y requieren un mantenimiento riguroso, lo que encarece el costo de las micro centrales. Las antiguas micro centrales usaban este tipo de mecanismos pero sólo porque la electrónica de ese entonces no permitía la construcción de dispositivos a precios razonables.

Existen micro aprovechamientos que funcionan de manera satisfactoria sin ningún tipo de equipo de regulación; sólo se ajusta manualmente una válvula para variar el flujo de agua que ingresa a la turbina. Esta forma de regulación sólo es factible si la mayoría de las cargas del usuario están conectadas de manera permanente, y si se

utilizan aparatos poco sensibles a las variaciones de voltaje y frecuencia, como por ejemplo lámparas incandescentes.

El regulador de frecuencia descrito en este trabajo se basa en el principio de absorción de carga mediante resistencias eléctricas (carga complementaria o carga lastre) y la regulación del caudal de agua suministrada a la turbina (Sistema mixto de regulación de frecuencia) [5].

Conclusiones

En la generación de energía eléctrica mediante cualquier tecnología y entre ellos las instalaciones hidroeléctricas, 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 una instalación hidroeléctrica trabajando en modo aislado, ante la variación de la demanda de potencia por parte de los usuarios. En este capítulo se analizan para una mejor comprensión de las instalaciones hidroeléctricas:

- La regulación de frecuencia en pequeñas centrales hidroeléctricas
- Tipos de Turbinas Hidráulicas.
- Micro y mini-hidroeléctricas para usos productivos y mini-redes comunales.
- Sistemas domésticos individuales (nano-hidroeléctricas)
- Ventajas y desventajas de los sistemas hidroenergéticos
- Problemas que se presentan al variar la frecuencia
- Tipos de regulación.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO II. IMPLEMENTACIÓN DEL REGULADOR DE FRECUENCIA.

Introducción

El sistema implementado en este trabajo esta basado en la construcción de un regulador de frecuencia por caudal de agua para instalarlo en una nano hidroeléctrica montada en el Laboratorio GERA de la FAC. de Ing. Mecánica de la Universidad de Oriente. En este capitulo se analiza las características y el principio de funcionamiento de los dispositivos electrónicos de este circuito, los esquemas que muestran el principio de funcionamiento del sistema de regulación de frecuencia por caudal de agua, el cálculo de sus parámetros, los resultados experimentales obtenidos durante la realización de este proyecto y su valoración económica.

2.1 Componentes y dispositivos electrónicos del regulador de frecuencia.

En la actualidad el desarrollo científico-técnico están en constante cambio y crecimiento, en constante incremento. En el siglo XX la humanidad consumió más del 95% del total de los recursos energéticos consumido desde que la humanidad apareció en la tierra.

Hasta principios de los años 60 las conversiones de energía eléctrica de cierta potencia se realizaban casi exclusivamente por procesos electromecánicos. Esto se debía al poco desarrollo de la electrónica, por lo que dichos circuitos electrónicos eran limitados a pequeñas potencias. Con la aparición de los dispositivos semiconductores de potencia, así como su comercialización e industrialización esta situación dio un giro extraordinario.

2.2 Disparador de Schmitt (SCHMITT TRIGGER).

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. Ésta es la principal diferencia con un comparador normal, que es un simple amplificador operacional sin realimentación, y que su salida depende únicamente de la entrada mayor.

El Schmitt trigger usa la histéresis para prevenir el ruido que podría solaparse a la señal original y que causaría falsos cambios de estado si los niveles de referencia y entrada son parecidos.

Comparador Regenerativo (Schmitt Trigger)

Este es un circuito comparador que trabaja realimentado positivamente por lo que siempre opera en régimen no lineal.

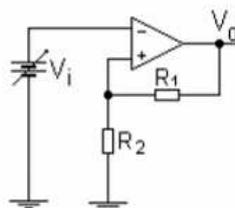


Figura: 2.1. Comparador Regenerativo (Schmitt trigger)

2.3 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. Ésta es la principal diferencia con un comparador normal, que es un simple amplificador operacional sin realimentación, y que su salida depende únicamente de la entrada mayor. El Schmitt Trigger usa la histéresis para prevenir el ruido que podría solaparse a la señal original y que causaría falsos cambios de estado si los niveles de referencia y entrada son parecidos.

En la construcción del circuito se utiliza el circuitos integrados (CI 4093) de funciones lógicas, que incluye cuatro bloques NAND de dos entradas cada uno, (se usa este porque me permite trabajar con un voltaje hasta de 15V) con acción de "gatillo Schmitt" en cada una de dichas entradas, cuya relación de terminales o pin es la siguiente:

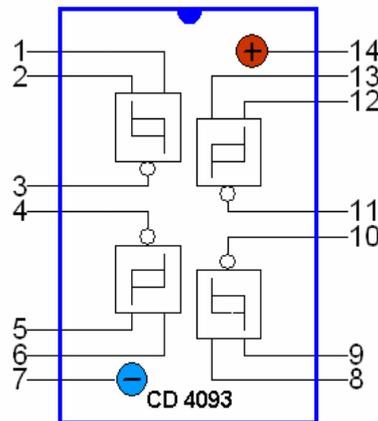


Figura: 2.2 Compuerta NAND-Schmitt-Trigger.

La acción de "gatillaje" ocurre en cada una de las ocho terminales de entrada de este circuito integrado. Esto equivale a tener ocho gatillos Schmitt contruidos dentro del CI 4093, cada uno de ellos conectados a cada entrada de los cuatro NAND, lo cual brinda una excelente inmunidad contra el ruido.

El efecto final y práctico de todo esto es poder llevar a cabo en forma automática y rápida la extracción de una señal útil que puede estar inmersa en ruido eléctrico.

2.3.1 Conexión de los pines del CI 4093.

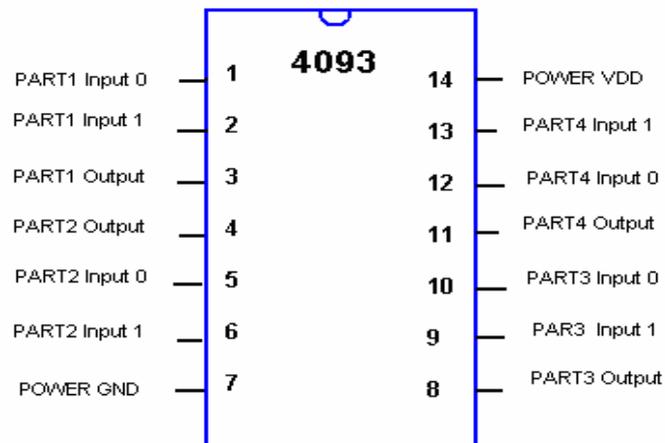


Figura: 2.3 Conexiones de pines del CI 4093.

2.4 Definición y características CI SE555.

El temporizador 555 es un excepcional circuito integrado, muy difundido en nuestros días, nació hace más de 30 años y continúa utilizándose actualmente. El temporizador 555 fue introducido al mercado en el año 1971, por la empresa Signetics Corporation con el nombre: SE555/NE555 y fue llamado "The IC Time Machine" (el Circuito integrado máquina del tiempo), que en esos momentos era el único integrado de su tipo disponible. En la actualidad es construido por muchos otros fabricantes. Entre sus aplicaciones principales cabe destacar las de multivibrador astable y monoestable, detector de impulsos, etcétera [6].

2.4.1 Características del circuito integrado NE555.

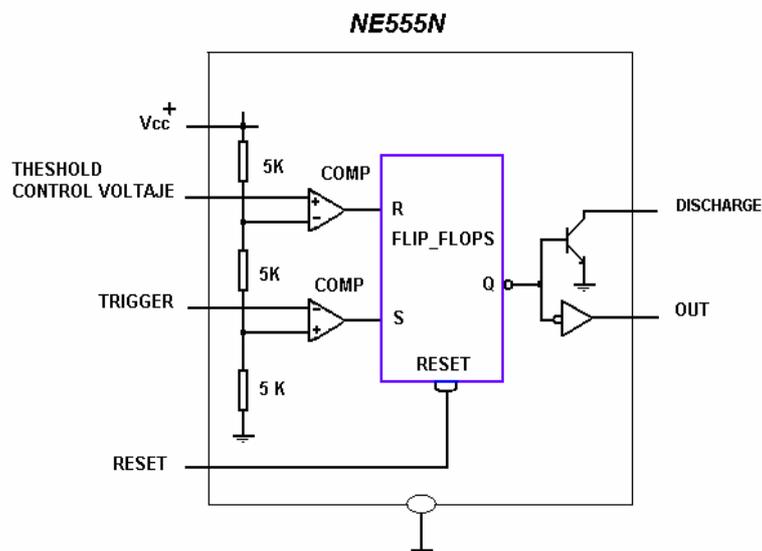


Figura: 2.4 Esquema en bloques del circuito integrado del 555

Este temporizador 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. En el gráfico se muestra el número de pin con su correspondiente función. El 555 está compuesto por 23 transistores, 2 diodos, y 16 resistores encapsulado en silicio. Hay un circuito integrado que se compone de dos temporizadores en una misma unidad, el 556, de 14 pines y el poco conocido 558 que integra cuatro 555 y tiene 30 pines.

2.4.2 Descripción de los Pines del Temporizador NE555.

- **GND** (pin 1): es el polo negativo de la alimentación, generalmente tierra.
- **Disparo** (pin 2): Es en esta patilla, donde se establece el inicio del tiempo de retardo, si el temporizador 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.
- **Salida** (pin 3): Aquí veremos el resultado de la operación del temporizador, ya sea que esté conectado como monoestable, astable u otro.
- **Reset** (pin 4): Si se pone a un nivel por debajo de 0.7 Voltios, pone la patilla de salida a nivel bajo. Si por algún motivo esta patilla no se utiliza hay que conectarla a Vcc para evitar que el temporizador se "reseteo".
- **Control de voltaje** (pin 5): Cuando el temporizador se utiliza en el modo de controlador de voltaje, el voltaje en esta patilla puede variar casi desde Vcc (en la práctica como Vcc -1 voltio) hasta casi 0 V (aprox. 2 Voltios). Así es posible modificar los tiempos en que la salida está en alto o en bajo independiente del diseño (establecido por las resistencias y condensadores conectados externamente al temporizador). El voltaje aplicado a la patilla de control de voltaje puede variar entre un 45 y un 90 % de Vcc en la configuración monoestable. Cuando se utiliza la configuración astable, el voltaje puede variar desde 1.7 voltios hasta Vcc. Modificando el voltaje en esta patilla en la configuración astable causará la frecuencia original del astable sea modulada en frecuencia (FM). Si esta patilla no se utiliza, se recomienda ponerle un condensador de $0.01\mu F$ para evitar las interferencias.
- **Umbral** (pin 6): Es una entrada a un comparador interno que tiene el 555 y se utiliza para poner la salida a nivel bajo.
- **Descarga** (pin 7): Utilizado para descargar con efectividad el condensador externo utilizado por el temporizador para su funcionamiento.
- **V+** (pin 8): También llamado Vcc, alimentación, es el pin donde se conecta el voltaje de alimentación que va de 4.5 voltios hasta 16 voltios (máximo). Hay versiones militares de este integrado que llegan hasta 18 Voltios.

2.4.3 Funcionamiento del Circuito Integrado 555.

El temporizador NE555 se puede conectar para que funcione de diferentes maneras, entre los más importantes están: como (CI NE555) astable y como (CI NE555)

monoestable. Para la construcción circuito integrado de este trabajo se utiliza la configuración como monoestable del (CI NE555).

2.4.4 CI NE555 como astable.

Este tipo de funcionamiento se caracteriza por una salida con forma de onda cuadrada (o rectangular) continua de ancho predefinido por el diseñador del circuito. La señal de salida tiene un nivel alto por un tiempo t_1 y un nivel bajo por un tiempo t_2 . La duración de los tiempos dependen de los valores de R_1 y R_2 .

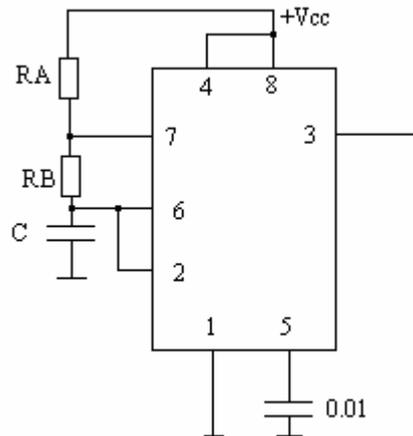


Figura: 2.5 El esquema de conexión del CI NE555 como astable.

$$t_1 = \ln(2) * (R_1 + R_2) * C_1 \quad (2.1)$$

$$t_1 = 0,693 * (R_1 + R_2) * C_1 \quad (2.2)$$

$$t_2 = \ln(2) * R_2 * C_1 \quad (2.3)$$

$$t_2 = 0,63 * R_2 * C_1 \quad (2.4)$$

La frecuencia con que la señal de salida oscila está dada por la fórmula:

$$f = \frac{1}{0,693 * C_1 * (R_1 + 2 * R_2)} \quad (2.5)$$

el período es simplemente

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.6)$$

También decir que si lo que queremos es un generador con frecuencia variable, debemos variar la capacidad del condensador, ya que si el cambio lo hacemos

mediante las resistencias R1 y/o R2 también cambia el ciclo de trabajo o ancho de pulso de la señal de salida según la siguiente expresión:

$$D = \frac{R2}{(R1 + 2 * R2)} \quad (2.7)$$

Hay que recordar que el período es el tiempo que dura la señal hasta que ésta se vuelve a repetir (Tb - Ta).

2.4.5 CI NE555 como monoestable.

El esquema que se presenta es bastante sencillo y corresponde a un montaje temporizador monoestable, el cual se caracteriza por el modo de conexión de la patilla 2, **Disparo**, la cual debe permanecer en nivel alto, hasta el momento de empezar la temporización, hemos de hacer notar que esta patilla, debe ser repuesta a su nivel **alto**, antes de terminar la temporización, si se quiere ampliar el retardo, para evitar disparos fortuitos que variarían el tiempo previsto.

La salida es capaz de entregar una corriente de 200 mA máximo, en caso de necesitar mas corriente, utilizar un relé con contactos que soporten una mayor corriente. Mientras la patilla de disparo esté a nivel alto, la salida patilla 3, permanecerá a nivel **bajo**, esto debe tenerse en cuenta, para un mejor aprovechamiento del dispositivo.

Mediante este principio, podemos trazar un temporizador que encienda o apague una luz con un retraso de tiempo que vendrá calculado mediante la siguiente formula:

$$T = 1,1 * Ra * C \quad (2.8)$$

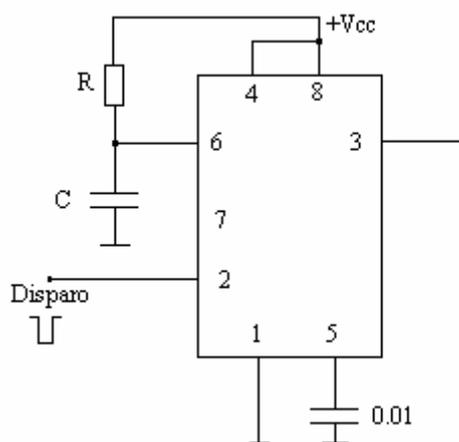


Figura: 2.6 Esquema de conexión del CI NE555 como monoestable.

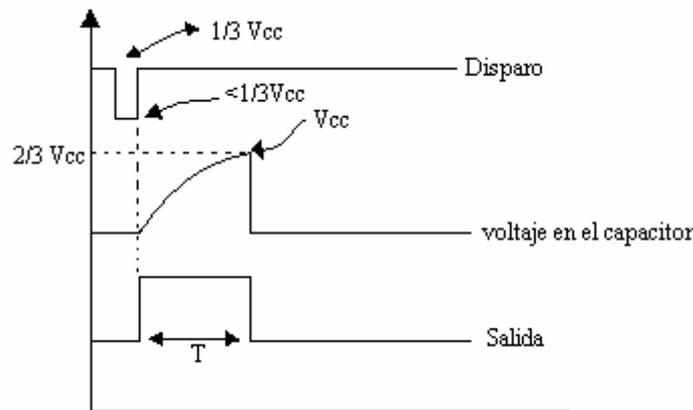


Figura: 2.7 Señal de disparo del monoestable

Observe el biestable se setea y se resetea por flancos y no por nivel.

El circuito como se menciona, puede utilizarse tanto para el encendido como para el apagado de un diodo led o una lámpara, así mismo mediante un relé, se puede poner en marcha o parar un motor. En las figuras, se pueden cambiar el diodo led, por un relé para dotar si es necesaria de mayor potencia a la salida.

2.4.6 Conexiones de pines del NE555.

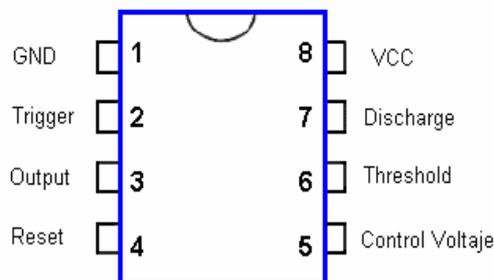


Figura: 2.8 Configuración de pines del CI NE555

2.5 Amplificador Operacional.

El concepto del amplificador operacional procede del campo de los computadores analógicos, en los que comenzaron a usarse técnicas operacionales en una época tan temprana como en los años 40. El nombre del amplificador operacional deriva del concepto de un amplificador dc (amplificador acoplado en continua) con una entrada diferencial y ganancia extremadamente alta, cuyas características de operación estaban determinadas por los elementos de realimentación utilizados [7].

2.5.1 Esquemas y Configuraciones Externas.

El símbolo de un amplificador operacional es el siguiente:

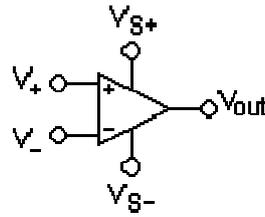


Figura: 2.9 símbolo de un amplificador operacional

Los Terminales son:

V_+ : Entrada no inversora.

V_- : Entrada Inversora

V_{out} : Salida

V_{s+} : Alimentación positiva

V_{s-} : Alimentación negativa.

Normalmente los pines de alimentación son omitidos en los diagramas eléctricos por razones de claridad.

2.5.2 Amplificador Operacional Ideal.

A continuación se muestra un esquema del amplificador operacional ideal:

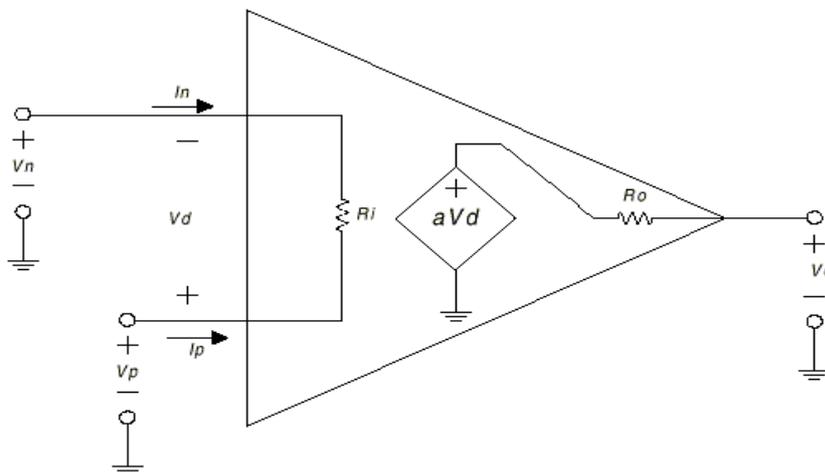


Figura: 2.10 Amplificador Operacional Ideal.

Este es un dispositivo de acople directo, con entrada diferencial y un único Terminal de salida. El amplificador solo responde a la diferencia de tensión entre los 2 terminales de entrada, no a su potencia común. Una señal positiva en la entrada inversora (-), produce una señal negativa a la salida, mientras que la misma señal en la entrada no inversora (+) produce una señal positiva en la salida. Con una tensión de entrada diferencial, V_d , donde a es la ganancia del amplificador. Ambos terminales de entrada del amplificador se utilizaran siempre independientemente de

la aplicación. La señal de salida es de un solo Terminal y esta referida a masa, por consiguiente, se utilizan tensiones de alimentación bipolares (\pm)

Teniendo en cuenta las funciones de la entrada y la salida, se puede definir las propiedades del amplificador ideal.

- 1.- La ganancia K de tensión es infinita: $K = \infty$
- 2.- La Resistencia R_e de entrada es infinita: $R_e = \infty$
- 3.- La resistencia de salida es 0: $R_o = 0$
- 4.- El ancho de banda es infinito: $BW = \infty$
- 5.- La tensión offset V_d de entrada es 0: $V_0 = 0$ Si $V_d = 0$

A partir de estas características del AO, podemos deducir otras 2 importantes propiedades adicionales. Puesto que, la ganancia de tensión es infinita, cualquier señal de salida que se desarrolle será el resultado de una señal de entrada infinitesimalmente pequeña

Luego, en resumen:

La tensión de entrada diferencial es nula.

Especificaciones: En este trabajo para la construcción del transductor de frecuencia a voltaje se utiliza el amplificador operacional LM 358 (CI LM358).

2.5.3 Amplificador Operacional Real.

El amplificador operacional real LM 358 esta compuesto por dos amplificadores operacionales este es un circuito integrado de ocho pines. A continuación se muestra el funcionamiento de las aplicaciones utilizadas de este amplificador para la construcción de este trabajo:

2.5.4 Aplicaciones

Los amplificadores operacionales tienen diversas aplicaciones en los circuitos electrónicos, siendo las más comunes las siguientes:

- Amplificador Inversor
- Amplificador no inversor
- Amplificador restador
- Amplificador integrador
- Amplificador de instrumentación
- Seguidor de Tensión.
- Comparador
- Filtros Activos

2.6 Tipos de controladores.

Controlador P.

Este control solicita una señal en entrada no nula (e) 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. 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 en 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 esta acción sirve a integrar las acciones P y I, con función anticipadora que se encuentra útil en ciertos tipos de procesos. El controlador D es un controlador con acción muy rápida.

2.6.1 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 a 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 mas por el control **PI** que tiene gran exactitud lo que no cuenta con mucha velocidad.

El control **PI**

Cuando el caudal de agua a la entrada de la turbina varié, la velocidad de giro en el eje que esta acoplado al generador 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 [8].

2.6.2 Configuración del controlador.

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

- Configuración en paralelo
- Configuración en serie

En la figura 2.11, la acción **P** y la acción **I**, están colocadas en paralelo entre ellas, y son alimentadas con la misma señal de error ϵ ;

Controlador	Esquema	Ecuación	Notas
PI		$y = K_p \cdot \epsilon + K_I \cdot \int \epsilon \cdot dt =$ $= K_p \cdot \left(\epsilon + \frac{K_I}{K_p} \cdot \int \epsilon \cdot dt \right) =$ $= K_p \cdot \left(\epsilon + \frac{1}{T_I} \cdot \int \epsilon \cdot dt \right)$	$T_I = \frac{K_p}{K_I}$ $T_D = \frac{K_D}{K_p}$

Figura: 2.11 Configuración en paralelo del controlador PI

2.7 Principio de funcionamiento del sistema de regulación de frecuencia por variación de caudal de agua.

En el sistema de regulación que se describe en este trabajo se tiene que la frecuencia de la tensión generada por el alternador es directamente proporcional a la velocidad de rotación del rotor del alternador.

Como puede apreciarse, cualquier modificación en el caudal hidráulico se traduce en una variación de la velocidad de la máquina. Para darle solución a este problema se le agrega al sistema, un regulador de frecuencia con el objetivo de mantener estable la misma. Todas estas acciones tienen como objetivo mantener la velocidad de la máquina en su valor nominal y corregir las posibles variaciones en la frecuencia de la línea.

En el esquema de la figura 2.12 se tiene que al variar el caudal de agua varia la velocidad del rotor del generador y por consiguiente la frecuencia de la tensión generada, al suceder esto el regulador actúa sobre la electroválvula para abrirla o

cerrarla en dependencia de si aumenta o disminuye la frecuencia. Esto hace que el sistema mantenga sus velocidad nominal.

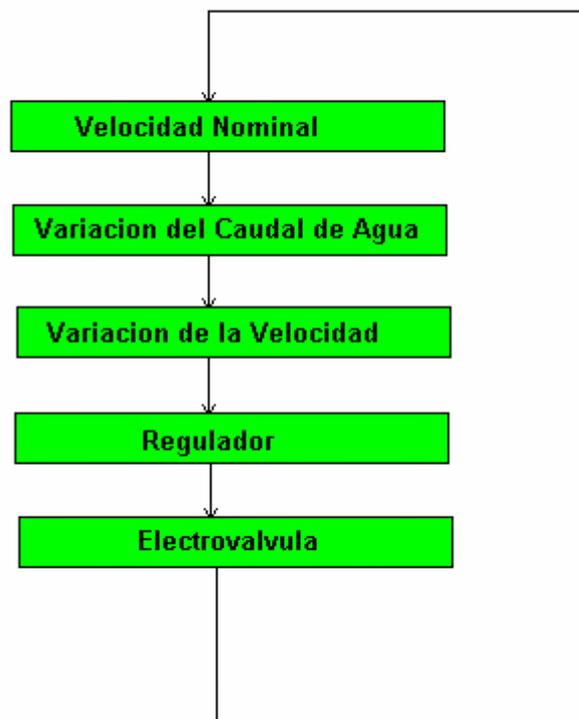


Figura: 2.12 Principio de funcionamiento del sistema de regulación de frecuencia mediante la variación de caudal de agua.

La figura 2.13 muestra un esquema sencillo de una instalación hidrogeneradora. Como la instalada en el Laboratorio GERA de la FAC. de Ing. Mecánica. Esta toma el flujo del agua de la red hidráulica de la Sede Mella de la Universidad de Oriente. Tiene una válvula primaria para el suministro de flujo de agua, a continuación una electro válvula sobre la cual puede actuar el controlador y el grupo turbina generador. La turbina es del tipo "Pelton"

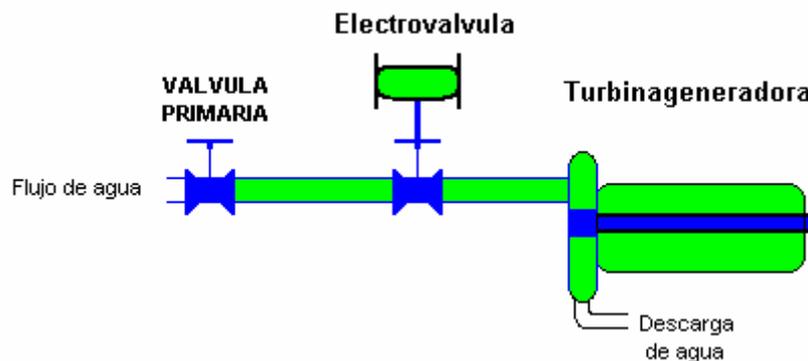


Figura: 2.13 Esquema sencillo de una instalación hidrogeneradora conectado a un sistema hidráulico.

A continuación se muestra la instalación general y los bloques funcionales del sistema de regulación de frecuencia por caudal de agua.

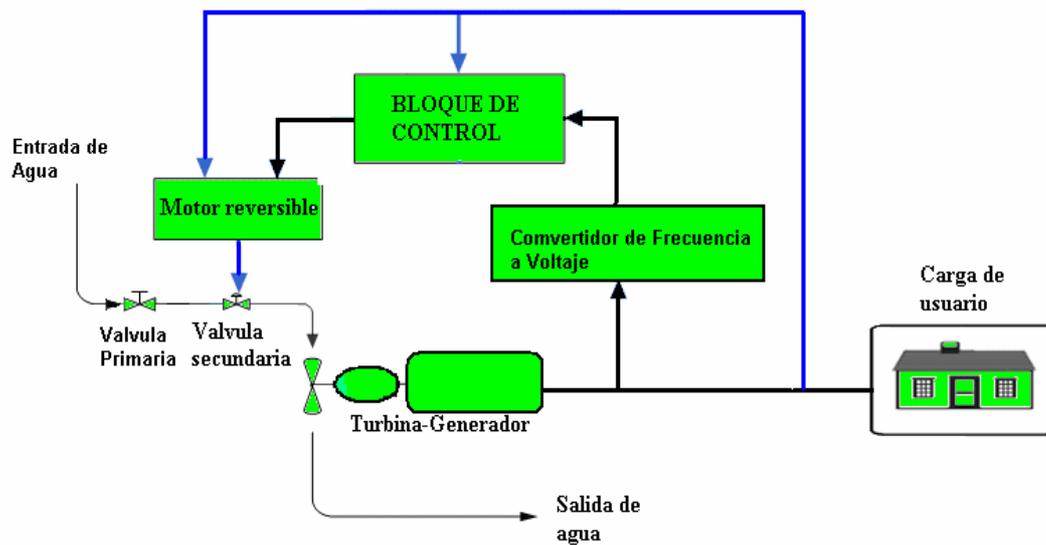


Figura 2.14 Funcionamiento del sistema de regulación de frecuencia por de caudal de agua. El sistema de regulación de frecuencia para su mejor estudio, se divide en bloque en como se muestra figura: 2.15.

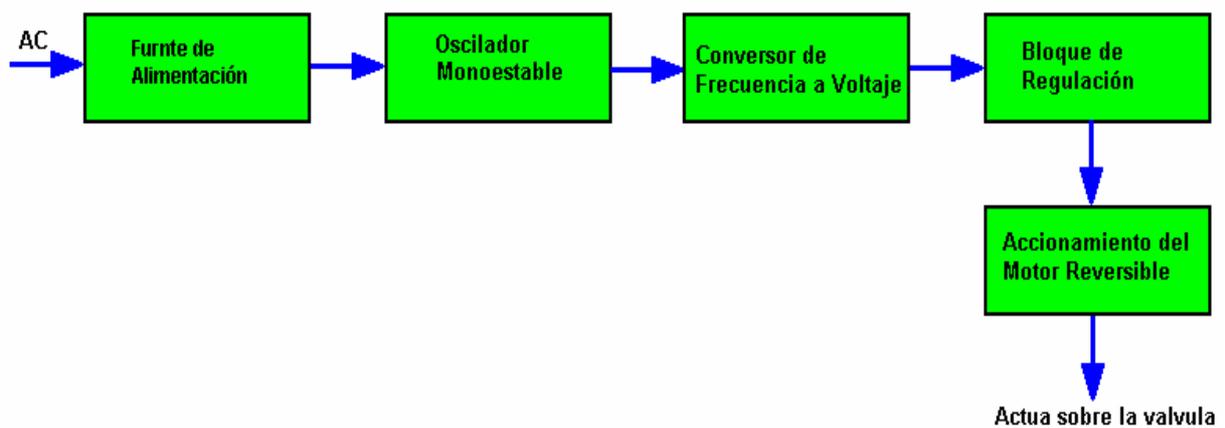


Figura: 2.15 Esquema del sistema de regulación y control de frecuencia que se propone en este trabajo.

2.8 El sistema de control de frecuencia que se propone en este trabajo esta compuesto por los bloques siguientes.

- Fuente de alimentación.
- Primer bloque transductor de frecuencia a voltaje (Oscilador monoestable).
- Segundo bloque (Conversor de frecuencia a voltaje).
- Bloque de control.
- Bloque de Accionamiento del motor reversible.

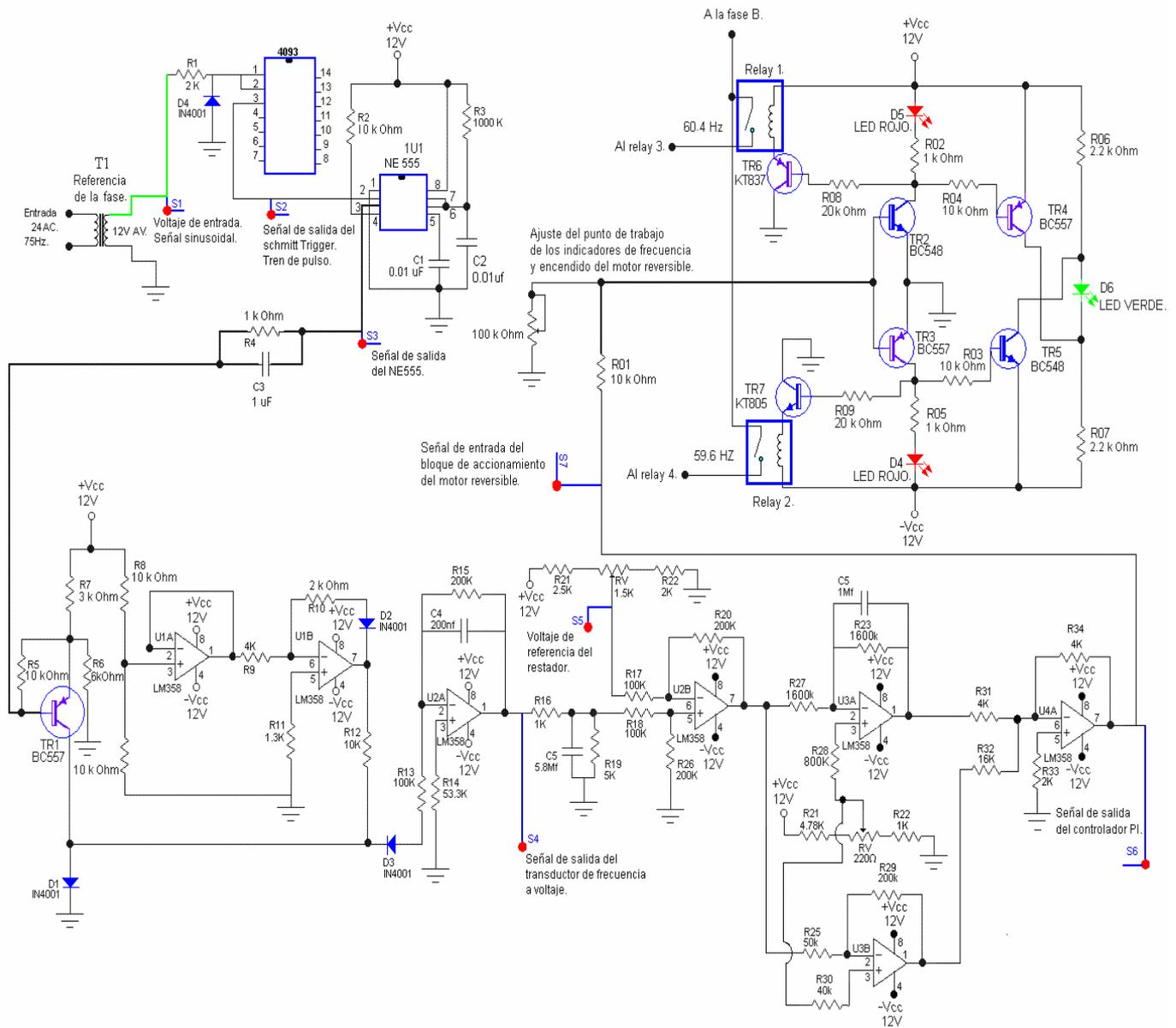


Figura: 2.16 Circuito electrónico del sistema de regulación de frecuencia propuesto en este trabajo

2.9 Fuente de alimentación.

La fuente de alimentación está constituida por dos transformadores de 24V/15V 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, y los circuitos integrados LM7812 y LM7912 estabilizadores de tensión a 12V y -12V.

Para la alimentación de esta fuente utilizamos el voltaje que sale del generador que se encuentra montado en el Laboratorio del Centro GERA.

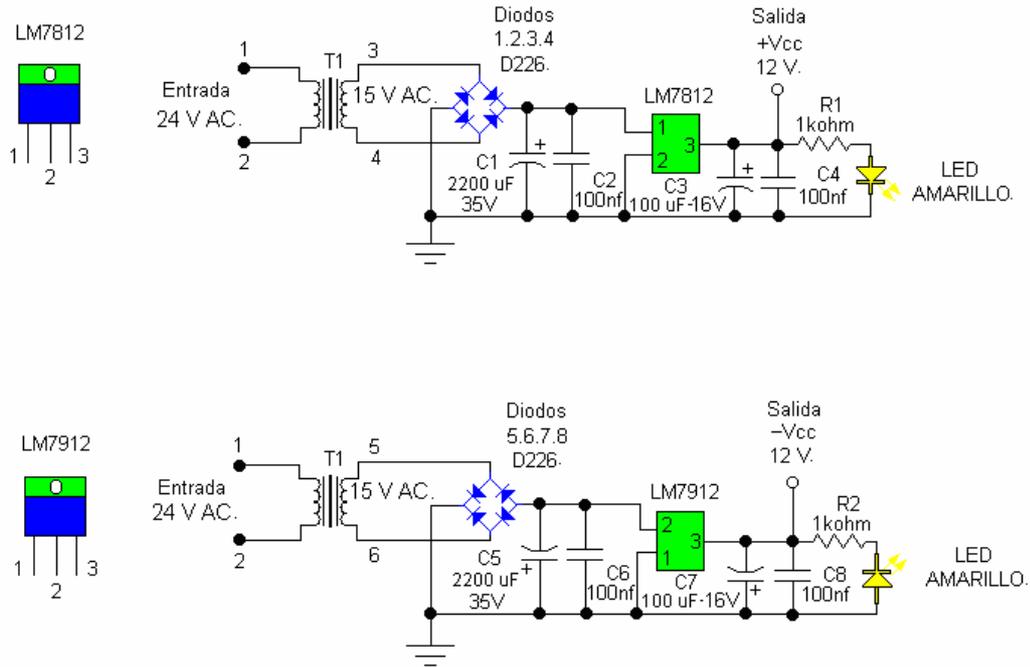


Figura: 2.17 Esquema del circuito electrónico de la fuente de alimentación.

2.10 Primer bloque del transductor de frecuencia a voltaje (CI 4093 y Oscilador monoestable).

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 75 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.

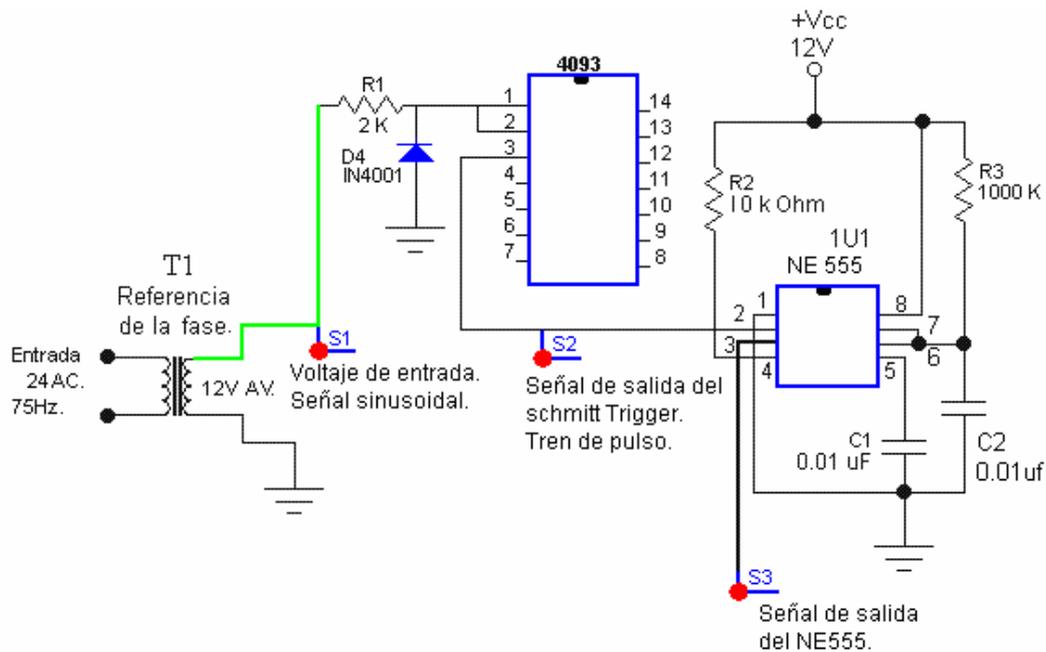


Figura: 2.18 Esquema del circuito electrónico del primer bloque del transductor de frecuencia a voltaje.

2.11 Segundo bloque (Convertor de frecuencia a voltaje).

La señal de salida del CI NE555 como se observa anteriormente es una señal cuadrada que tiene un tiempo en alto prefijado en 11 ms y un tiempo en bajo que varía 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 C3 y R4 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 UIB (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 2.19.

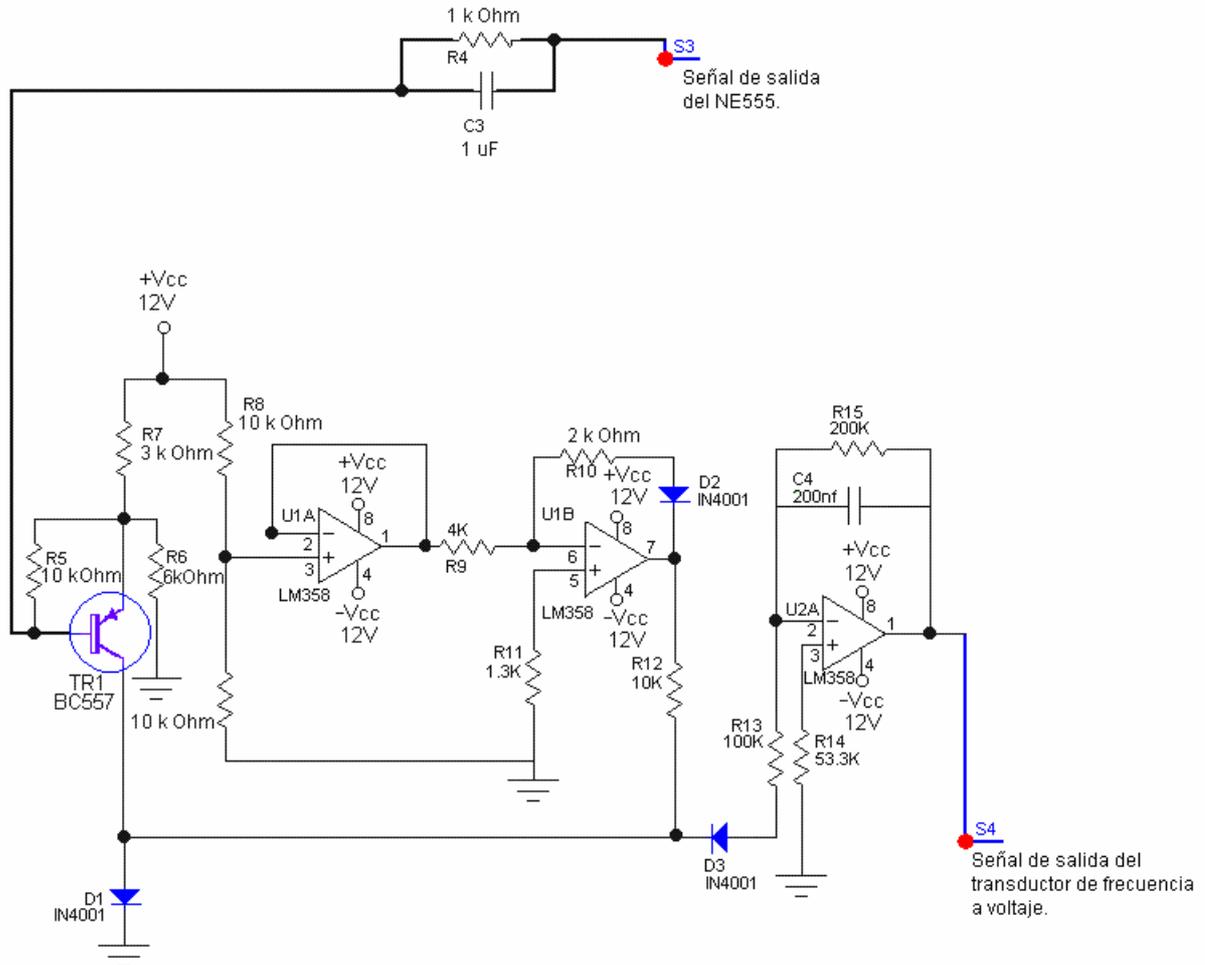


Figura 2.19 Esquema del circuito electrónico del segundo bloque del transductor de frecuencia a voltaje (Convertor de frecuencia a voltaje).

2.12 Bloque 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 un frecuencia de 75 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 1.607 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 conversor 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 (75 Hz), debido a que el controlador tiene una fuente de referencia (Figura 2.19) y siempre este tratara 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

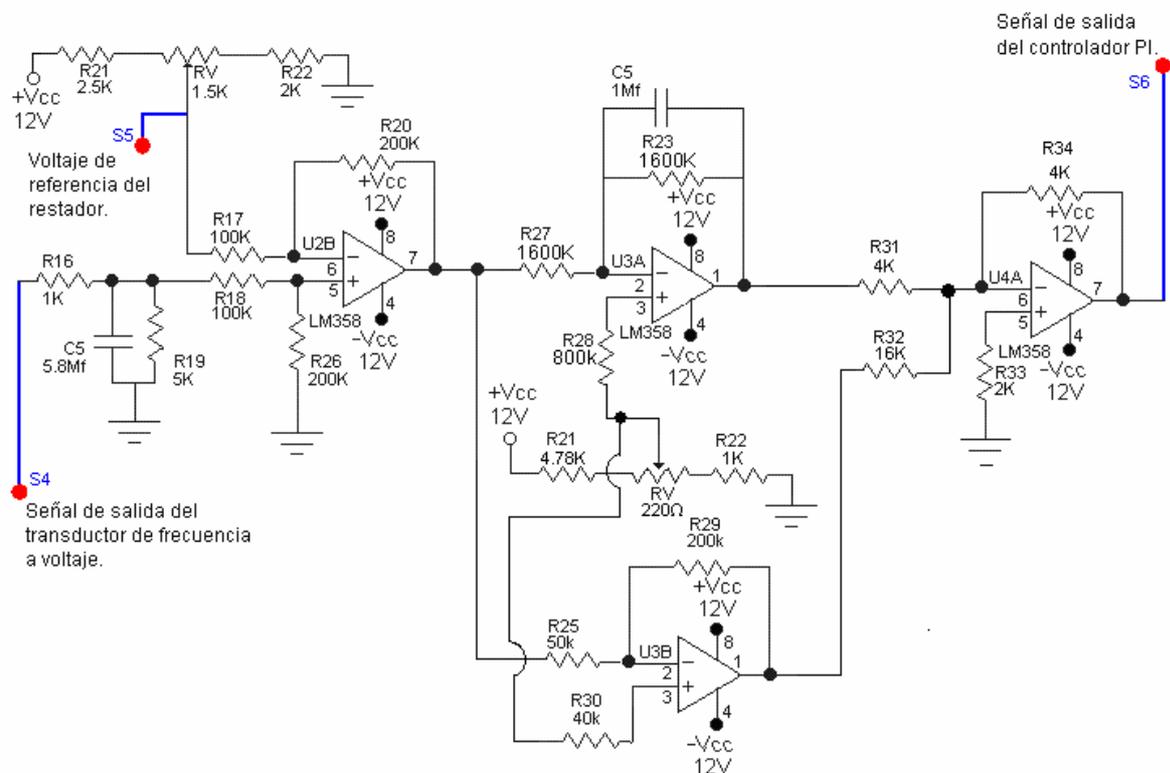


Figura: 2.19 Circuito electrónico del bloque de control

2.13 Bloque de Accionamiento del motor reversible

La señal de salida del bloque de control del transductor de frecuencia como se muestra en la etiqueta (S6) de la figura: 2.19 del bloque de control se aplica al bloque de accionamiento del motor reversible como se señala en la etiqueta (S7) de la figura: 2.20.

El principio de funcionamiento del bloque de accionamiento de motor reversible es el siguiente:

- Se tiene que si la frecuencia de la tensión de salida del alternador es de 75 Hz, en la etiqueta (S7) el voltaje es 0V y todos los transistores se encuentran en la zona de corte por lo que el diodo LED D6 se polariza directamente.

- Si la frecuencia es menor o igual a 74,8 Hz en la etiqueta (S7) aparece un voltaje negativo el cual pone en estado de conducción a los transistores TR3 y TR5. El transistor TR3 polariza directamente al diodo LED D4 indicador de baja frecuencia y el transistor TR5 al entrar en conducción produce una caída de tensión en R06 apagando al diodo LED D6. Los transistores TR2 y TR4 no conducen en esta condición. Si la frecuencia continúa descendiendo hasta 74,6 Hz o menos, el transistor TR7 entra en conducción activando el relé 2 y este a su vez al relé 4, el cual conecta dos fases del motor trifásico reversible de modo que gire en el sentido de apertura de la válvula de regulación del caudal de agua suministrado al grupo turbina generador. Una vez restablecida la frecuencia se desconecta el motor reversible.

- Si la frecuencia en el sistema aumenta a 75.2 Hz o más, la etique (S7) aparece un voltaje positivo el cual pone en conducción a los transistores TR2 y TR4. El transistor TR2 polariza directamente al diodo LED D5, indicador de alta frecuencia, y el transistor TR4 produce un aumento de tensión en el cátodo del diodo LED D6, con lo que se apaga. Los transistores TR3 y TR5 no conducen en esta condición.

Si la frecuencia continúa ascendiendo hasta 60.4 Hz o más, el transistor TR6 se pone en conducción activando el relé 1 y este a su vez al relé 3 el cual conecta dos fases del motor trifásico reversible, en sentido contrario al caso anterior, haciéndolo girar de modo que cierre la válvula de regulación de caudal de agua suministrado al grupo turbina-generador. Una vez restablecida la frecuencia se desconecta el motor.

El potenciómetro RV es el encargado de fijar el punto de trabajo de los diodos indicadores del estado de la frecuencia y de la conexión y desconexión del motor. En la figura 2.14 se muestra el circuito electrónico del bloque de señalización de frecuencia y accionamiento del motor.

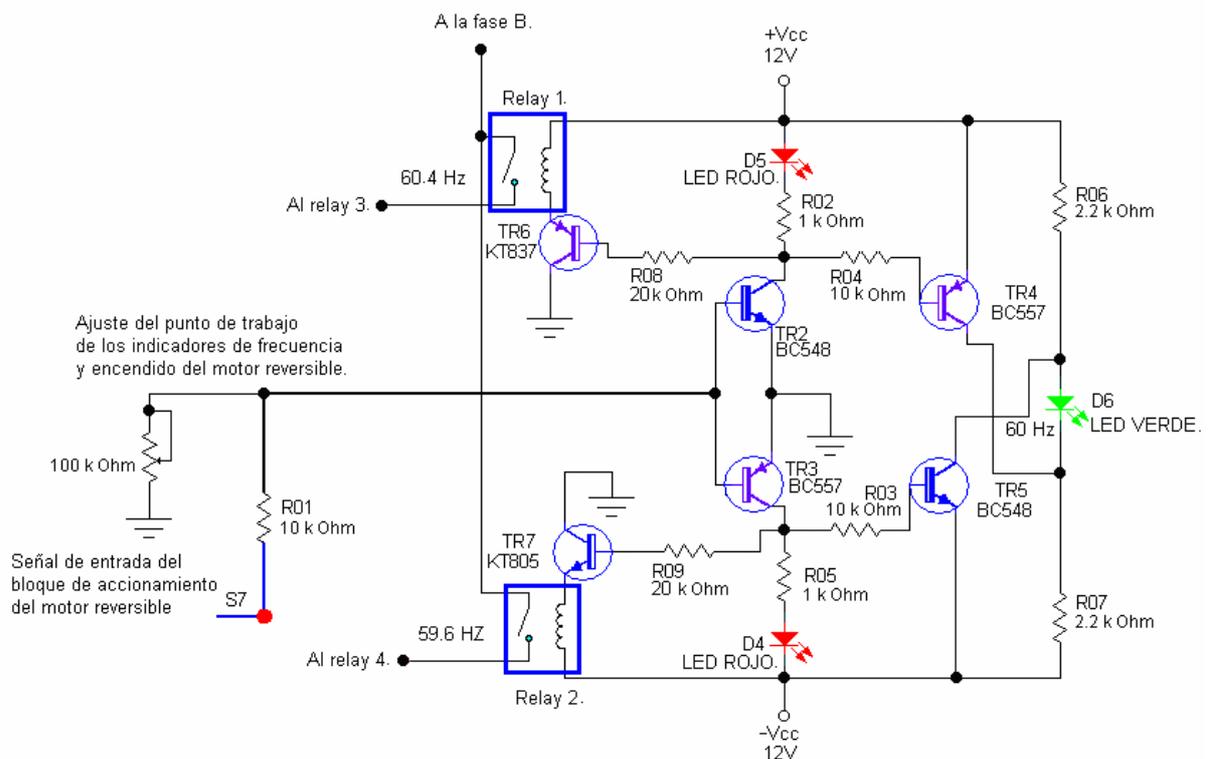


Figura: 2.20 Esquema del (Señalización de frecuencia y accionamiento del motor reversible).

2.14 Calculo de los parámetros del CI 4093 y el Oscilador Monoestable NE555. CI 4093.

La resistencia que se le pone a la entrada de CI 4093 esta puesta con el objetivo de limitar la corriente que llega a este y la misma se fija con un valor de $5K\Omega$, y el diodo, como al CI 4093 llega una señal sinusoidal, el objetivo del diodo es tomar con el solamente los pulso del semiciclo positivo.

Oscilador Monoestable NE555.

En la frecuencia que se controla (se desea mantener constante) en este trabajo es de 75Hz y esta se le da un margen error de 60 a 90 Hz Para calcular el periodo escogemos el máximo valor de la frecuencia a medir (90 Hz) .

Para una señal de 60 Hz el período es $T = 16,66$ ms.

Para una señal de 75 Hz el período es $T = 13,33$ ms.

Para una señal de 90 Hz el período es $T = 11,11$ ms.

Se fija el tiempo en estado ON del monoestable con una duración de 11 ms, ya que este es menor que el periodo de la frecuencia mas alta a convertir.

Calculo del periodo en ON

$$T = 1.1 * R3 * C2 \quad (2.9)$$

Despejamos a R3 de la ecuación() para poder calcularla

$$R3 = \frac{T}{1.1 * C2} \quad (2.10)$$

$$T = 11 \text{ ms} \quad (2.11)$$

El capacitado se fija, $C2 = 0.01$ Mf, Para fijar este capacitado tenemos que tener en cuenta que este debe de estar en el orden de los nanos (10^{-9}) y los micro (10^{-6})

$$R3 = \frac{11}{1.1 * 0.01} = 1000K\Omega \quad (2.12)$$

2.15 Calculo del circuito de polarización negativa con el amplificador operacional U1B (AO U1B).

Se fija la ganancia de esta etapa Avl se fija en 0.5, se escoge $R9 = 4k\Omega$ y se calcula $R10$ mediante la expresión siguiente

$$Avl = \frac{R10}{R9} \quad (2.13)$$

se despeja a $R10$ obtenemos que:

$$R10 = Avl * R9 \quad (2.14)$$

$$R_{10} = 2K\Omega$$

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

$$R_{11} = \frac{R_9 * R_{10}}{R_9 + R_{10}} \quad (2.15)$$

obteniendo que $R_{11} = 1.3k\Omega$.

2.16 Cálculo del Integrador con el amplificador operacional U2A (AO U2A).

Se fija la ganancia en $Avl = 10$, $R_{15} = 200k\Omega$ y se calculan R_{13} y C_4 mediante las siguientes expresiones:

$$Avl = \frac{R_{15}}{R_{13}} \quad (2.16)$$

se despeja a R_{13} obtenemos que:

$$R_{13} = Avl * R_{15} \quad (2.17)$$

$$R_{13} = 100K\Omega$$

Se escoge T igual al doble del período de la frecuencia de 60 Hz y se obtiene aproximadamente.

$$T = R_{15} * C_4 \quad (2.18)$$

$$C_4 = 200nf$$

Para calcular de R_{14} tenemos que esta va a ser igual al paralelo de R_{13} con R_{15} .
obteniendo que $R_{14} = 53.3K\Omega$.

2.17 Cálculo de los parámetros del bloque de control.

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.

El ajuste del controlador se calcula de la siguiente forma:

2.17.1 Control proporcional integral.

$$K_c = 0.45 * K_{crit} \quad (2.19)$$

$$T_i = P_{crit} / 1.2 \quad (2.20)$$

Nota: este ajuste no se pudo llevar a cabo debido a la imposibilidad de poder cerrar el lazo de control. Luego que al hacer algunas pruebas midiendo el voltaje a la salida tomamos algunos valores para los cuales se calcularon los parámetros del controlador.

2.17.2 Cálculo de los parámetros del controlador PI.

La ganancia del controlador (K_c)

$$K_c = 0.45 * 11.11 \quad (2.21)$$

$$K_c = 5$$

El tiempo de integración del controlador (T_i)

$$T_i = 0.66 / 1.2 \quad (2.22)$$

$$T_i = 0.8$$

Cálculo de los componentes resistivos, y del capacitivo.

$$T = R_{23} // R_{27} * C_5 \quad (2.23)$$

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

$$0.8s = R_{23} // R_{27} * 1\mu F \quad (2.24)$$

$$R_{23} // R_{27} = 800 K\Omega \quad (2.25)$$

Aplicando la regla de tres se puede llegar a conocer cual es el valor de las resistencias que en paralelo tiene un valor de 800 K Ω . Para poder aplicar esta regla es necesario que se fije una de las resistencias es por ello que se le da el valor de 1600K Ω a R_{23} .

$$R_{23} // R_{27} = 800 K\Omega \quad (2.26)$$

$$1600 * R_{27} / 1600 + R_{27} = 800 K\Omega \quad (2.27)$$

Trabajando en la ecuación anterior se obtiene que:

$$R_{27} = 1600 K\Omega$$

$$R_{23} = 1600 K\Omega$$

$$C_5 = 1\mu F$$

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 mostrará a continuación:

Ganancia (A_v)

$$A_v = 4$$

$$A_v = R_{29} / R_{25} \quad (2.28)$$

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

$$R_{29} = 200 \text{ K}\Omega$$

Por tanto,

$$R_{25} = R_{29} / A_v \quad (2.29)$$

$$R_{25} = 200 / 4 \quad (2.30)$$

$$R_{25} = 50 \text{ K}$$

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

$$R_{30} = R_{29} // R_{25} \quad (2.31)$$

$$R_{30} = 200 * 50 / 200 + 50 \quad (2.32)$$

$$R_{30} = 40 \text{ K}\Omega$$

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.

Con la presente investigación, se ha logrado el diseño electrónico con tecnología propia de un regulador que posee un circuito electrónico muy sencillo para el control de la frecuencia de la tensión generada en una instalación nano hidroeléctrica del Lab. GERA de la Fac. de Ing. Mecánica.

Conclusiones

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

- Convertidor de frecuencia a voltaje.
- Regulador PI.
- Bloque de accionamiento del motor reversible.

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

Resultado experimentales

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Introducción.

En las instalaciones nano, micro y mini centrales hidroeléctricas, que por lo general trabajan en régimen aislada (no están conectadas al sistema de la red electricas) se hace necesario implementar un sistemas que controlen sus parámetros. Este trabajo esta basado en la construcción de un sistema que permita mantener uno de estos parámetro constante mediante el diseño de un circuito electrónico que mantenga la frecuencia en un rango establecido. Para lograr esto se implementa un circuito que regule la frecuencia mediante el método de caudal de agua constante. Como el flujo del caudal de agua esta sujeto a variaciones continua y tenemos que la velocidad de rotación de las paletas impulsadas por el agua es proporcional a el voltaje y la frecuencia que salen del generador.

Mediante el proceso de construcción del circuito eléctrico que me permita realiza el control de este parámetro se hicieron diversas pruebas a nivel de laboratorio de cada uno de los bloques que presenta:

- Fuente de alimentación.
- Primer bloque transductor de frecuencia a voltaje (Schmitt Trigger y Oscilador monoestable).
- Segundo bloque (Conversor de frecuencia a voltaje).
- Bloque de control.
- Bloque de Accionamiento del motor reversible.

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

Se monto en protoboar este circuito en el Laboratorio de Mediciones Electricas de la Fac. de Ing. eléctrica de la Universidad de Oriente y se le hicieron distintas pruebas y mediciones para comprobar su correcto funcionamiento.

En este circuito se analizaron las respuesta de este sistema de regulación implementado ante la distintas variaciones de la frecuencia, en este caso las variaciones esta entre 60 y 90 Hz que es el rango de variación que permite la nano central hidroeléctrica montada en el Laboratorio GERA de la Fac. de Ing. Mecánica de la Universidad de Oriente. A continuación se muestra los resultados obtenidos en el laboratorio:

En la figura 2.21 se tiene el circuito eléctrico del sistema de regulación de frecuencia montado en la protoboar y en la figura 2.22 la señal de la frecuencia de entrada de Schmitt Trigger 4093.

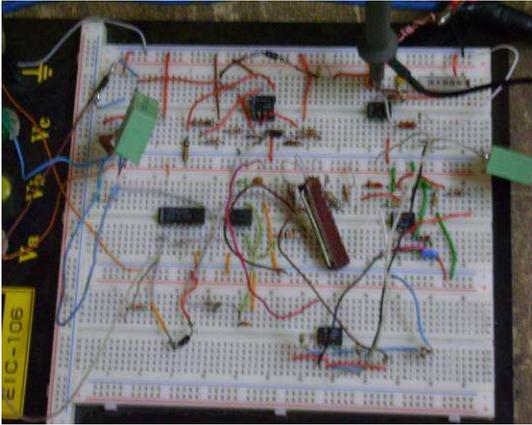


Figura: 2.21 Circuito eléctrico del sistema de regulación de frecuencia montado en la protoboard.

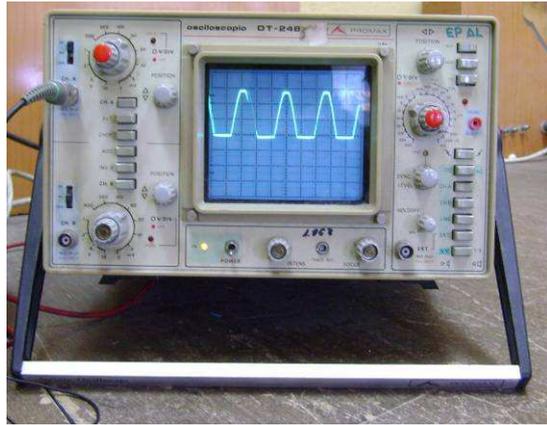


Figura: 2.22 Frecuencia de entrada del Schmitt Trigger (4093) para 75Hz.

La figura 2.23 muestra la señal de salida del CI NE555 (Se fija el tiempo en estado ON del monoestable con una duración de 11 ms) y la figura 2,24 muestra el voltaje de salida del segundo bloque (Convertor de frecuencia a voltaje).



Figura 2.23 Señal de salida del CI NE555 para 75Hz.

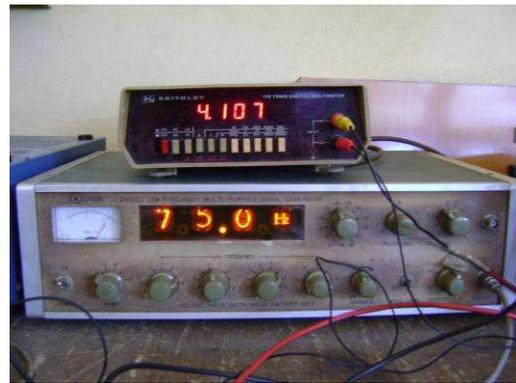


Figura: 2.24 Voltaje de salida del segundo Bloque (Convertor de frecuencia a voltaje) y frecuencia de entrada.

A continuación en las siguientes figuras se muestran la señal de salida del segundo bloque del transductor de frecuencia a voltaje y del amplificador operacional restador del bloque de control.

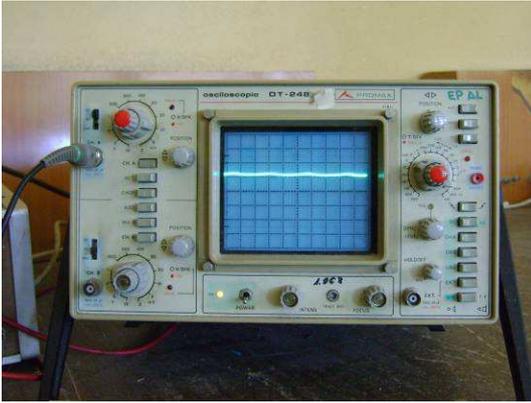


Figura: 2.25 Señal de salida del segundo De la red RC que esta después Bloque del transductor de frecuencia.



Figura: 2.26 Señal de salida de controlador para una frecuencia de 75Hz.

El principal objetivo de la construcción del sistema de control y regulación de frecuencia es mantener esta constante. El rango de variación permisible de esta es de 60 a 90 Hz; en el Laboratorio de Mediciones Electricas de la Fac. de Ing. eléctrica de la Universidad de Oriente se realizaron diferentes pruebas para controlar y regular la frecuencia ante posibles variaciones que puedan existir dentro de este rango. A continuación se muestran en las figuras siguientes algunas muestra de los resultados obtenidos:

Se analiza en la siguientes figura la respuesta del sistema en el caso de que la frecuencia disminuya hasta 60 Hz.



Figura:2.27 Voltaje de salida del segundo bloque para una frecuencia de 60Hz



Figura: 2.28 Señal de salida del segundo bloque para una frecuencia de 60Hz.



Figura: 2.29 Voltaje de salida del A.O restador del bloque de control del sistema para una frecuencia de 60Hz.

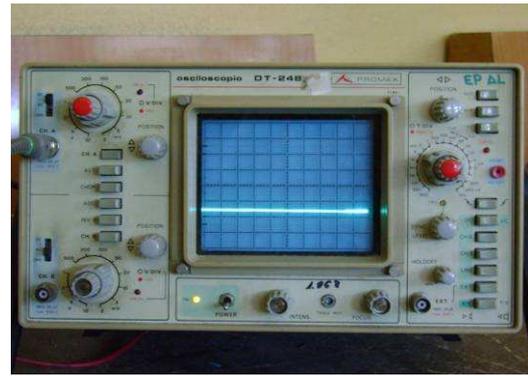


Figura: 2.30 Señal de salida del AO restador del bloque de control para una frecuencia de 60Hz.

Se analiza en las siguientes figuras, la respuesta del sistema, en el caso de que la frecuencia aumente hasta 90 Hz:



Figura: 2.31 Voltaje de salida del segundo bloque para una frecuencia de 90Hz.

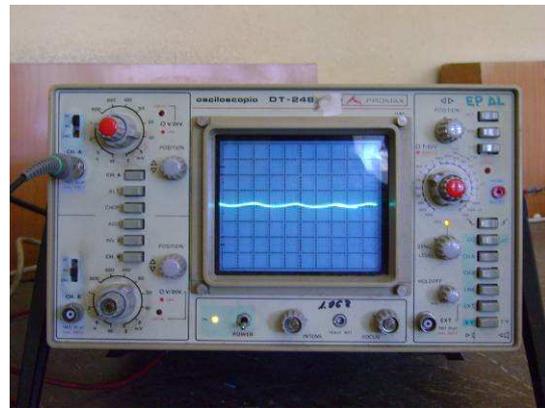


Figura: 2.32 Señal de salida del segundo bloque para una señal de 90Hz.



Figura: 2.33 Voltaje de salida del A.O restador del bloque de control del sistema para una frecuencia de 90Hz.

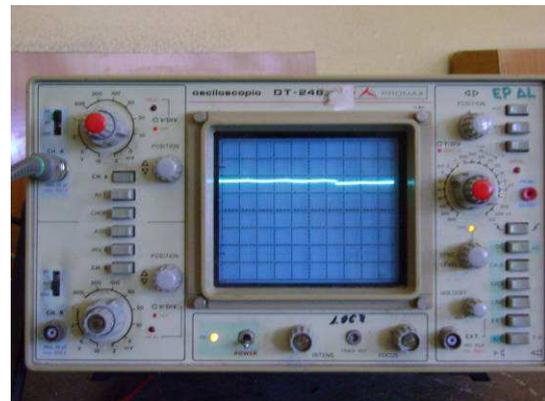


Figura: 2.34 Señal de salida del AO restador del bloque de control para una frecuencia de 90Hz.

VALORACION ECONOMICA

La construcción de sistema de control y regulación de frecuencia que se propone en este trabajo representa una gran ventaja para el óptimo funcionamiento de instalaciones hidro generadoras que trabajan en modos aislados y en zonas de difícil acceso, ya que contribuye al mejoramiento de la calidad de la energía generada y a minimizar el efecto sobre el entorno ambiental.

Actualmente en nuestro país existen 180 nano, micro, mini y pequeñas centrales hidroeléctricas, principalmente en zonas montañosas y apartadas de las regiones orientales, de las cuales 31 se encuentran conectadas al sistema electro energético nacional (SEN) y 149 trabajan en regímenes aislados.

La mayoría de las nano, micro y mini centrales hidroeléctricas que trabajan en zonas aisladas no cuentan con sistemas automatizados y por consiguiente la calidad de la energía generada es deficiente. Esto trae como consecuencia el mal funcionamiento y la rotura de los equipos instalados. Otra dificultad que presenta es que hace mas difícil el trabajo de los operadores, pues tiene que constantemente observar el estado de las instalaciones y darles mas mantenimiento al equipo para logra la tensiones y la frecuencia de generación deseada.

Con la instalación del sistema de control y regulador de frecuencia que se propone se puede obtener una energía de mayor calidad, así como el mejoramiento de la facilidad del trabajo de los operadores. Un aumento en la calidad de la energía generada se traduce en un mejor funcionamiento de la unidad y mayor durabilidad de los equipos instalados y que se sirven de la energía generada por las PCH.

Por la importancia social, económica 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 por, jugando también un papel importante en las concepciones estratégicas del país.

En la siguiente 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.

En Tabla se presenta una relación de los componentes utilizados y su valor comercial.

Tabla de valoración económica.

Componentes	Cantidad	Precio por unidad	Precio sub-total
T BC557	3	0.08 E	0.24 E
T BC548	3	0.08 E	0.24 E
T KT 837	1	0.53 E	0.53 E
T KT 805	1	0.53 E	0.53 E
D IN 4001	4	0.06 E	0.24 E
D LED ROJO	2	0.23 E	0.74 E
D LED VERDE	1	0.37 E	0.37 E
RV 1.5K	1	0.90 E	1.80 E
RV 100K	1	0.90 E	1.80 E
R 1.3K	1	0.04 E	0.04 E
R 1K	5	0.04 E	0.20 E
R 2K	5	0.04 E	0.20 E
R 2.2K	2	0.04 E	0.08 E
R 2.5K	1	0.04 E	0.04 E
R 3K	5	0.04 E	0.20 E
R 4K	1	0.04 E	0.04 E
R 5K	2	0.04 E	0.08 E
R 6K	1	0.04E	0.04 E
R 10K	10	0.04 E	0.40 E
R 20K	2	0.04 E	0.08 E
R 40K	1	0.04 E	0.04 E
R 50K	1	0.04 E	0.04 E
R 53.3K	1	0.04 E	0.04 E
R 100K	5	0.04 E	0.20 E
R 200K	5	0.04 E	0.20 E
R 500K	1	0.04 E	0.04 E
R 1000K	4	0.16 E	0.04 E
C 0.01uf	2	0.19 E	0.38 E
C 2 uf	1	0.16 E	0.16 E
C 1 uf	1	0.15 E	0.15 E
C 5.8 uf	1	0.10 E	0.10 E
CI LM555	1	0.59 E	0.59 E
CI MC1458	4	1.82 E	7.28 E
Schmitt Trigger 4093	1	0.47 E	0.47 E
Relay de 12 V DC	2	0.78 E	1.56 E
Total de componentes			83
Precio total en Euro			19.8 E

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:

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

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. 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 de las pequeñas instalaciones hidroenergéticas, 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

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 las instalaciones hidroeléctricas, 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 una instalación hidroeléctrica 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 un regulador que posee un circuito electrónico muy sencillo para el control de la frecuencia de la tensión generada en una instalación nano hidroeléctrica del Lab. GERA de la Fac. de Ing. Mecánica.

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

- Convertidor de frecuencia a voltaje.
- Regulador PI.
- Bloque de accionamiento del motor reversible.

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 de la turbina, además la introducción de nuevas funciones tales como sistema de alarma y protección de la instalación y mediciones de los parámetros fundamentales.

RECOMENDACIONES

- Perfeccionamiento de un prototipo de regulador haciendo uso de un circuito impreso profesional.
- Gestionar la introducción del regulador perfeccionado en la nano instalación hidrogenadora del Lab. GERA de la Fac. de Ing. Mecánica.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.

[1] Hidroenergía en Cuba: una alternativa energética y ambientalista

Gisela Rodríguez Armas

Colaboradora de Radio Rebelde

23 de Enero de 2009, 1:00 p.m.

<http://www.radiorebelde.cu/noticias/ciencia/ciencia1-230109.html>

[2] Programa de Energía, Infraestructura y Servicios Básicos de Soluciones

Prácticas –ITDG:

HIDRO RED (Red latinoamericana de microhidroenergía.)

Av. Jorge Chávez 275, Lima 18 – Perú

www.solucionespracticas.org.pe.

[3] COZ, F. y T. SANCHEZ, J. RAMIREZ GASTÓN. Manual de nano, mini y micro centrales hidráulicas. Una guía para el desarrollo de proyectos. Lima Perú, ITDG, 1995.

[4] ANOCIBAR, Héctor Rolando. Regulador de tensión y frecuencia. VII Encuentro Hidroenergéticos, Cajamaraca, Perú, 1997. Pág. 148.

[5] Métodos de regulación de frecuencia:

<http://www.ciget.pinar.cu>.

[6] Definición y Característica del CI NE555

http://proyectoselectronics.blogspot.com/2008/10/555-un-poco-de-historia_14.html.

[7] Componentes Electrónicas (Amplificador Operacional).

["http://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional"](http://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional)

[8] Ingeniería de control moderna (Tercera edición)

Katsuhiko Ogata.

[9] Desarrollo hidroenergético en la provincia:

<http://www.santiago.cu/hosting/cies/>

[10] Tutorial Protel 99 SE:

http://www.uhu.es/manuel_sanchez/tutoriales/protel99/protel99.html.

[11] Circuito impreso o PBC:

http://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_impreso#Historia.

[11] Como hacer impresos:

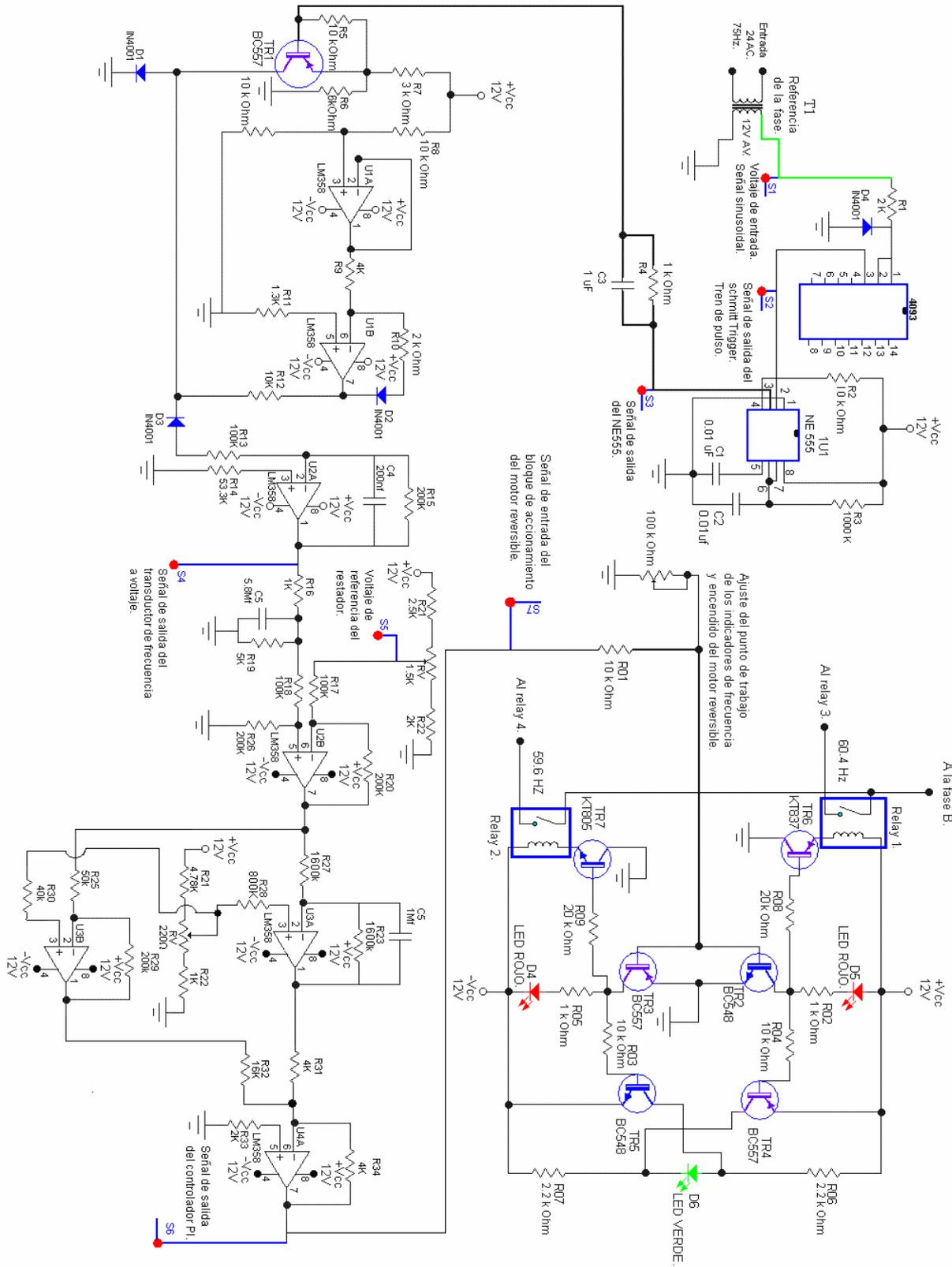
<http://www.sysameri.com/marcelo/placa.htm>

[12] Energías renovables y no renovables:

<http://www.construible.es/noticiasDetalle.aspx?c=19&m=21&idm=158&pat>

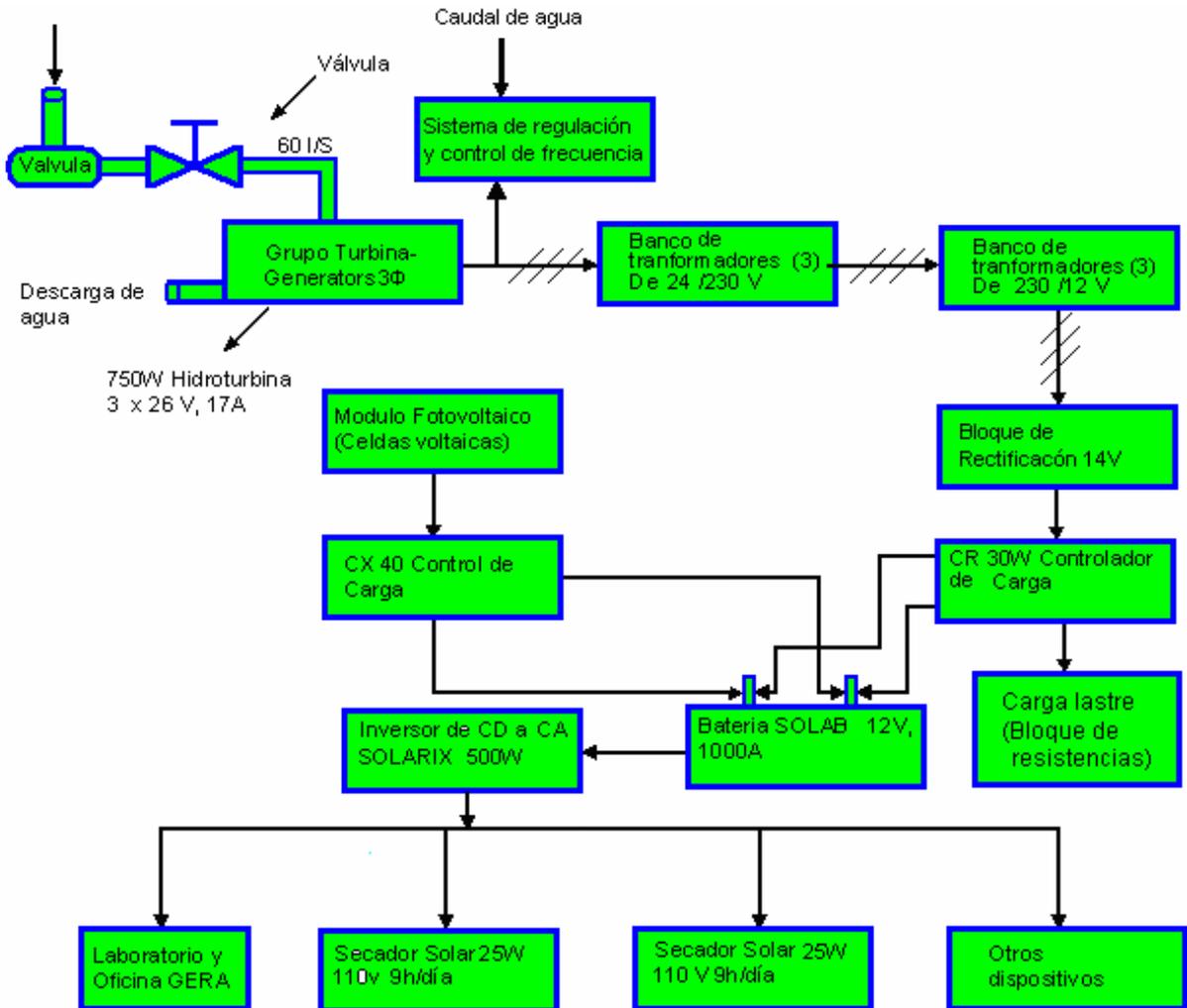
ANEXOS

Anexo: 1 Circuito electrónico del sistema de regulación de frecuencia.



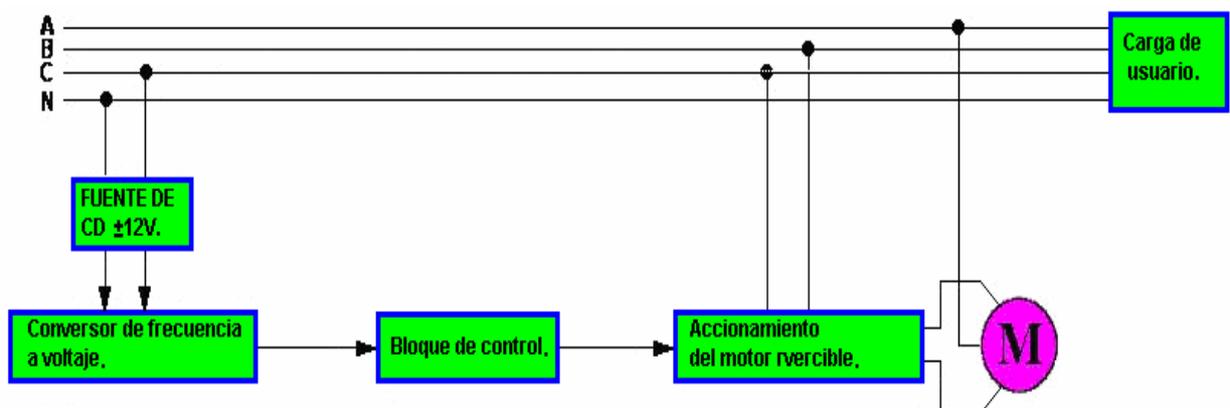
Anexo: 2

Esquema en bloque de la instalación hidrogeneradora montada en el Laboratorio GERA.

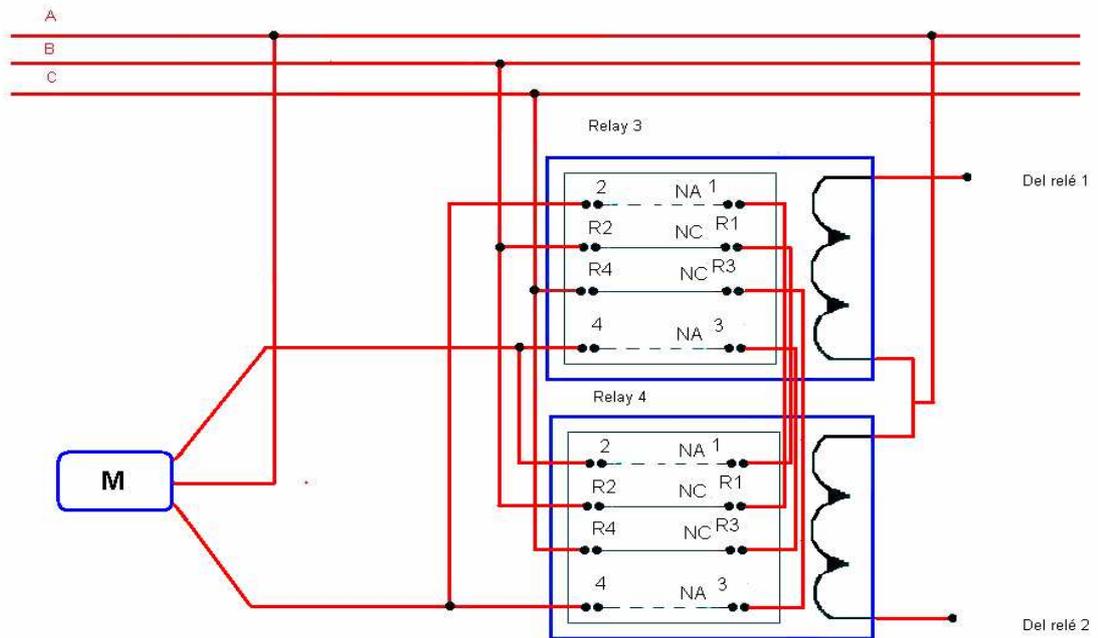


Anexo: 3

Esquema de conexión eléctrica del sistema de regulación de frecuencia.



Anexo: 4
Esquema de conexión de los rele.



Anexo: 5
Esquema de una turbina Pelton.



Anexo:6 Esquema de la forma convencional del montaje de una pequeña central Hidroeléctrica.

