



Trabajo de diploma

Sistema de sincronización automática de una Central Hidroeléctrica y un Grupo Electrónico soportado en plataforma Arduino.

Tesis en opción al grado de Ingeniero en Automática.

Autor: Reynier Rodríguez Gómez

Tutores: Msc. Julio Fong Barrio

Ing. Manuel Verdecia Rubio

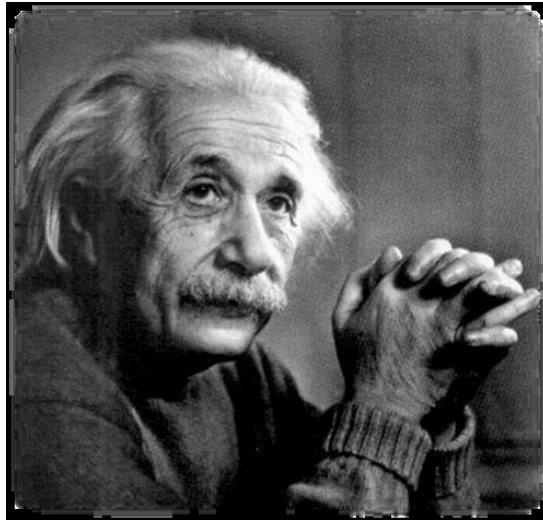
Santiago de Cuba

Curso 2015-2016

Pensamiento

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad."

Albert Einstein.



Dedicatoria

DEDICATORIA

A mi mamá que es la persona que más quiero en el mundo, a mis abuelos que sin ellos no hubiera Reynier, a mi tío que siempre me ha dado su apoyo firme, a toda mi familia y todos mis amigos por su comprensión y solidaridad.

AGRADECIMIENTOS

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

A dios por haberme permitido llegar hasta aquí y darme la fuerza para seguir adelante en los momentos más duros.

A mi mamá, mis abuelos y toda mi familia por su gran apoyo y nunca dejar de creer en mí.

A mis tutores Julio Fong Barrio y Manuel Verdecia Rubio por ayudarme, aconsejarme y guiarme durante la realización de este trabajo.

A mis profesores de toda la vida por su aporte a mi formación profesional.

A mis compañeros de cuarto que estuvieron conmigo en los momentos más difíciles, y a todos mis amigos en general.

A todos muchas gracias.

Resumen

En este trabajo se explica el estado del arte sobre la sincronización automática, se realiza el análisis de los diferentes tipos de reguladores de frecuencia utilizados en pequeñas centrales hidroeléctricas que trabajan en modo aislado y grupos electrógenos, haciendo énfasis en la regulación por caudal de agua, así como el análisis de los sistemas de sincronización de generadores de energía eléctrica. Se describe de forma general los bloques del sistema de sincronización entre un grupo electrógeno y una central hidroeléctrica, además se presenta el desarrollo del diseño de una tarjeta de sincronización basado en la plataforma Arduino Mega 2560. Se muestran los resultados obtenidos y explican las simulaciones realizadas a los diferentes bloques del sincronizador automático.

Abstract

This paper describes the state of the art automatic synchronization is explained, the analysis of the different types of frequency regulators used in small hydroelectric plants working in isolated and gensets mode is performed, with emphasis on regulation by water flow, as well as analysis of synchronization systems power generators. Generally described blocks synchronization system between a generator and a hydroelectric plant, also the design development of a card synchronization based on the Arduino Mega 2560 platform is presented. The results are shown and explained the simulations to different blocks automatic timer.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ESTADOS DEL ARTE SOBRE SINCRONIZACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS HIDRO-DIESEL	5
1.1. <i>Esquema de una pequeña central hidroeléctrica</i>	5
1.2. <i>Regulación de la frecuencia</i>	7
1.2.1. Efectos producidos por las variaciones de la frecuencia	8
1.3. <i>Tipos de regulación de frecuencia en centrales hidroeléctricas</i>	9
1.3.1. Ventajas y desventajas del método de regulación por de los métodos de regulación.....	10
1.4. <i>Regulación de frecuencia mediante variación de caudal de agua</i>	11
1.5 <i>Turbinas Hidráulicas</i>	13
1.5.1 Turbina Pelton	13
1.6 <i>Grupos electrógenos</i>	14
1.7 <i>Regulación de frecuencia en grupos electrógenos</i>	15
1.8 <i>Sincronización de generadores</i>	16
1.9 <i>Procedimiento para conectar los generadores</i>	19
1.10 <i>Descripción del sistema híbrido de generación de energía eléctrica hidro-diesel</i>	23
1.11 <i>Las Plataformas Arduino (Descripción)</i>	24
1.11.1 Ventajas del empleo de Arduino	25
1.11.2 Aplicaciones de Arduino	26
1.11.3 Lenguaje de programación de Arduino	26
<i>Conclusiones parciales del capítulo I</i>	27
CAPÍTULO II SISTEMAS DE SINCRONIZACIÓN	28
2.1 <i>Descripción del sistema de sincronización</i>	28
2.2 <i>Equipos de medición utilizados en el sistema de sincronización</i>	29
2.2.1 Transductor de tensión ZURC CV-A	29
2.2.2. Transductor de frecuencia CF ZURC.	29
2.2.3. Transductor de Potencia ZURC CW-TAN.	29
2.2.4 Medición de fase	30
2.3 <i>Actuadores utilizados para la regulación del caudal de agua</i>	32
2.3.1 Motor asíncrono trifásico	32
2.3.2 Relé de potencia.....	33
2.3.3 Conexión de los relés para el accionamiento del motor trifásico.....	33
2.4 <i>Plataforma Arduino Mega 2560</i>	36
2.5 <i>Diseño y simulación del Sistema de Sincronización</i>	37
2.5.1 Descripción del circuito en PROTEUS.	37
2.6 <i>Programación del Arduino Mega 2560</i>	39
2.7 <i>Secuencia de trabajo del sistema de sincronización</i>	40
2.8 <i>Valoración económica</i>	42
2.9 <i>Valoración medioambiental</i>	43
<i>Conclusiones parciales del capítulo II</i>	43
CONCLUSIONES	44
RECOMENDACIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA	46
ANEXOS	47

Introducción

La energía siempre ha sido imprescindible para el ser humano, y gracias a ella puede cocinar, obtener calor, desplazarse grandes distancias, emplear electrodomésticos, máquinas, etc. Al igual que la energía, el agua es un recurso necesario para la vida en la Tierra, además de que el hombre ha aprovechado la fuerza de los ríos desde tiempo inmemorial, como molinos de agua y norias. Gracias al descubrimiento de la electricidad y su aplicación generalizada a finales del siglo XIX, el hombre empieza a considerar el agua como una de las fuentes más importantes de producción de energía eléctrica. Aquí comienza la carrera de la industria eléctrica mundial, que generó los primeros vatios en las centrales hidroeléctricas recién inventadas. Éstas se encontraban cerca de los centros de consumo, debido a las dificultades que suponía por aquel entonces el transporte efectivo de electricidad. La central hidroeléctrica creada en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña, se puede considerar la primera instalación que transformó la energía del agua de un salto en electricidad. En la actualidad los costos de la producción de la energía eléctrica se incrementan, sumado a la crisis mundial, lo que conlleva a que el recurso energético más usado sean los hidrocarburos, los cuales presentan una situación de agotamiento gradual que lo hace día a día más costoso. La principal causa es el encarecimiento de los combustibles fósiles no renovables como el petróleo, el gas natural y el carbón.

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 debe contar con suficientes recursos para desarrollar sistemas hidráulicos.

Adicionalmente, esta tecnología puede 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.

Introducción

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. También es posible conectar la turbina a un generador eléctrico y de esta manera transformar 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.

El desarrollo económico y social de Cuba impone la necesidad del uso de fuentes de energías renovables para la generación de energía eléctrica. El empleo de las energías renovables es una solución segura para la obtención de energía limpia. En la actualidad una de las fuentes más atractivas de energía renovable es la hidráulica. La energía hidráulica, como fuente alternativa, constituye la vía ideal para evitar la contaminación, garantizar la preservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible. La conversión de energía hidráulica en energía eléctrica se lleva a efecto en las centrales hidroeléctricas, las que se clasifican en dependencia de la potencia de generación. Una pequeña central hidroeléctrica posee una autonomía energética con tecnología relativamente sencilla y de fácil mantenimiento. Además, tiene una larga vida útil y no requiere un sistema complejo de transmisión de energía eléctrica. Por lo que en las últimas décadas, la instalación de micro, mini y pequeñas centrales hidroeléctricas, principalmente en las regiones montañosas del país, ha tenido un fuerte impulso, con el objetivo de electrificar comunidades rurales, objetivos económicos y sociales, apartados del Sistema Electroenergético Nacional (SEN). En áreas aisladas donde los recursos hidráulicos están disponibles la mejor forma de crear energía eléctrica es aprovechando estos recursos ya que suponen un muy bajo costo sin necesidad de transporte y uso de combustibles fósiles.

Según información brindada por las Empresas de Hidroenergía de las provincias de Santiago de Cuba y Guantánamo, en la actualidad existen en Cuba más de 180 pequeñas, mini y micro centrales hidroeléctricas, de las cuales más de 150 no se encuentran conectados al SEN y no poseen sistemas de regulación de frecuencia y tensión.

Entre las principales ventajas de las pequeñas centrales hidroeléctricas están:

- Tienen muy bajos costos de diseño y operación, y un buen retorno de las inversiones. Las obras de ingeniería requeridas no son de gran envergadura, la turbina hidráulica es una máquina sencilla, eficiente y segura, que puede ponerse en marcha o detenerse con rapidez y requiere poca vigilancia.
- El impacto ambiental es pequeño.

Además pueden encontrarse sistemas híbridos de generación de energía, los cuales cuentan con dos o más sistemas de generación que se combinan en un solo sistema para la generación de energía eléctrica. Los mismos están compuestos generalmente por fuentes energéticas renovables y de ser necesario se complementan con grupos electrógenos, dejándolos en la mayoría de los casos solo para funciones de emergencia. Actualmente se proyectan sistemas híbridos en los que las fuentes renovables y el almacenamiento proporcionan hasta un 80–90 % de la necesidad energética, dejando al diésel solo la función de suplir la demanda en hora pico y en emergencia ante fallo.

En la mayoría de las centrales hidroeléctricas instaladas en las zonas montañosas de las provinciales orientales del país requieren de grupos electrógenos para suplir las demandas en horas pico o en temporada de sequía. En algunas instalaciones que disponen de grupos electrógenos, la sincronización se realiza de forma manual si trabajan en paralelo, aunque en la mayoría de los casos se desconecta la instalación hidroeléctrica y se activa o arranca el grupo eléctrico, lo que implica la interrupción del servicio durante esta operación.

Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado, se define como **problema de la investigación**, la carencia de un sistema de sincronización automática de los alternadores, con tecnología propia, para su construcción e implementación en las instalaciones híbridas.

El **objeto de la investigación** lo constituyen las pequeñas centrales hidroeléctricas apartadas del Sistema Electroenergético Nacional con grupos electrógenos de apoyo para la generación de energía eléctrica. De ahí que se precise como **campo de acción** la automatización de sistemas de generación híbridos, constituidos por pequeñas instalaciones hidroeléctricas y grupos electrógenos.

El **objetivo de la investigación** está dado en diseñar un sistema de sincronización automático entre la central hidroeléctrica y el grupo electrógeno soportado en una tarjeta Arduino, que satisfaga los requisitos para las diferentes características hidrológicas y técnicas de las diversas hidroeléctricas instaladas en las zonas rurales de las regiones montañosas de Cuba.

Como **hipótesis de la investigación** se plantean que si se logran construir en Cuba sistemas de sincronización con tecnología propia y técnica avanzada con alta integración, más eficiente, compacto y a menor costo, permitiría generalizar la introducción de sincronizadores en todas las micro y mini centrales hidroeléctricas instaladas, con grupos electrógenos de apoyo en zonas apartadas y montañosas del territorio nacional y no conectadas a la red, para mejorar la calidad de la energía suministrada a los usuarios.

Para el cumplimiento del objetivo propuesto se han asumido las siguientes **tareas de la investigación**:

- Caracterizar las instalaciones hidroeléctricas que trabajan en régimen aislado en las zonas montañosas de Cuba y los grupos electrógenos.
- Caracterizar, desde el punto de vista gnoseológico, histórico y actual, los sistemas de regulación en pequeñas centrales hidroeléctricas y los sistemas de sincronización de generadores.
- Diseñar un sistema de sincronización de una instalación hidroeléctrica y un grupo electrógeno utilizando plataforma Arduino
- Simular el sistema de sincronización propuesto utilizando la herramienta Proteus v8.1

CAPÍTULO I. ESTADOS DEL ARTE SOBRE SINCRONIZACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS HIDRO-DIESEL

Introducción

En este capítulo se exponen una reseña de los fundamentos de las instalaciones generadoras de electricidad, los métodos de regulación de frecuencia en pequeñas instalaciones hidrogeneradoras, la técnica para la sincronización de alternadores, la estrategia para el diseño de un sistema de sincronización entre una central mini hidroeléctrica y un grupo electrógeno, así como un profundo análisis de la estructura y funcionamiento de los sistemas de generación de energía eléctrica utilizados, las características de las plataformas Arduino y sus principales ventajas para la confección del sistema de sincronización.

1.1. Esquema de una pequeña central hidroeléctrica

Una planta hidroeléctrica está constituida por una gran variedad de componentes, como se muestra en la figura 1.1, entre los que se pueden mencionar: un embalse (tipo acumulativo) o un río (planta a filo de agua), obras de conducción (canales abiertos o tuberías a presión), tanques de oscilación, tuberías de alta presión, casa de máquinas, turbinas, generadores, tuberías de desagüe, centro de control, controladores, entre otros.

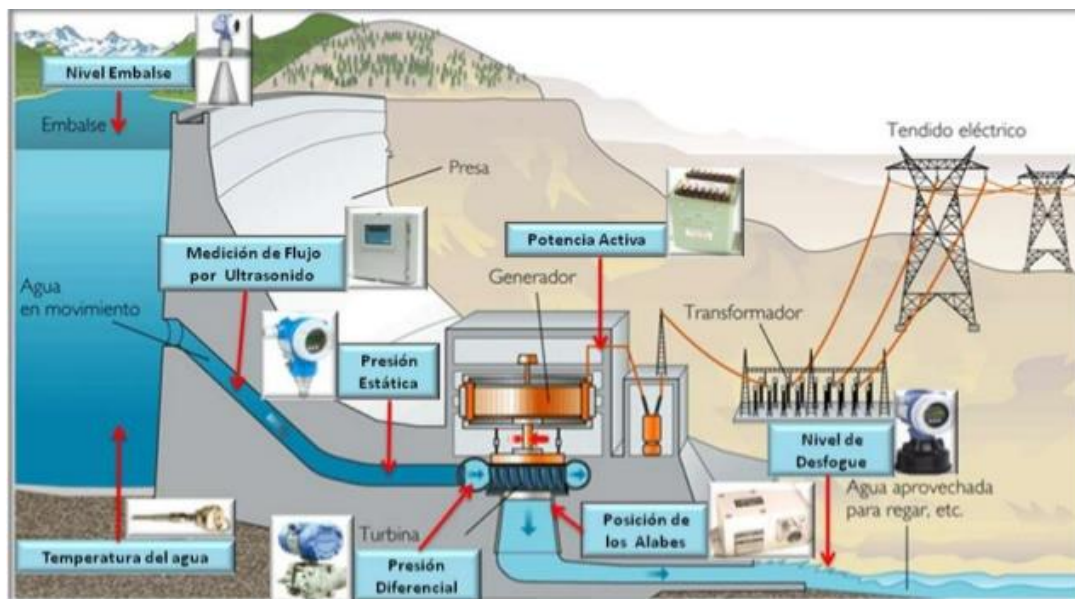


Figura 1.1: Esquema de una central hidroeléctrica.

Se consideran como pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) las que se encuentran en un rango de potencia menor a los 10 MW por unidad. Así en este rango se pueden ubicar las pequeñas centrales (1 MW a 10 MW), las mini-centrales (100 kW a 1MW), las micro-centrales (10 kW a 100 kW), las nano-centrales (1 kW a 10 kW) y las pico-centrales (100W a 1 kW).

El objetivo de una central hidroeléctrica es convertir la energía potencial de una masa de agua situada en el punto más alto del aprovechamiento, donde se ubica el embalse, en energía eléctrica, disponible en el punto más bajo, donde está ubicada la casa de máquinas. La potencia eléctrica que se obtiene en una central es proporcional al caudal utilizado y a la altura del salto (también llamado caída).

Estas instalaciones aprovechan la energía potencial del agua en su caída desde un nivel superior a uno inferior. El flujo de agua es conducido por una tubería conductora desde el embalse hasta la válvula que regula el flujo de agua que llega a la turbina. La presión del agua sobre los álabes de la turbina produce un movimiento que hace girar el eje a una determinada velocidad. Acoplado al eje de la turbina se encuentra un generador eléctrico, el cual entrega en sus terminales de salida una potencia eléctrica con un determinado nivel de tensión y frecuencia que dependerán de la excitación eléctrica, de la velocidad de giro de la turbina y de la corriente eléctrica que demanda la carga.

Generalmente estas instalaciones denominadas micro, mini o pequeñas centrales hidroeléctricas, según el nivel de energía eléctrica que produzcan van equipadas con generadores sincrónicos. Estas máquinas generan energía eléctrica, cuya frecuencia y velocidad son sincrónicas, de ahí su denominación (Posada, Y., 2012).

De acuerdo con la altura del salto las centrales hidroeléctricas pueden clasificarse en:

- De alta caída: salto de más de 150 m.
- De media caída: salto entre 50 y 150 m.
- De baja caída: salto entre 2 y 20 m.

Estos límites son arbitrarios y solo constituyen un criterio de clasificación.

Otra clasificación en función del tipo de central es:

- Aprovechamientos de agua fluyente.

- Centrales a pie de presa con regulación propia.
- Centrales en canal de riego o tubería de abastecimiento de agua.

Estas instalaciones funcionando como sistemas aislados, no conectados al SEN, enfrentan la necesidad de mantener constantes tanto la tensión como la frecuencia, independientemente de las variaciones de cargas originadas por el consumo eléctrico y las variaciones del flujo de agua en la turbina por lo que regular la frecuencia es de suma importancia para el suministro de energía eléctrica a los consumidores y para la óptima sincronización de estas centrales hidroeléctricas con otros sistemas de generación de energía eléctrica.

1.2. Regulación de la frecuencia

La frecuencia en un sistema eléctrico de corriente alterna está directamente relacionada con la velocidad de giro, como se muestra en la ecuación 1, es decir, con el número de revoluciones por minuto de los alternadores. Esto es:

$$n = 60 \frac{f}{p} \text{ [rpm]} \quad (1)$$

Dónde:

n = velocidad en rpm del generador.

f = frecuencia en Hz.

p = número de pares de polos.

Las variaciones de velocidad se traducen en variaciones de la frecuencia y de la tensión a la salida del generador. Por esta razón es importante la regulación automática de estos parámetros, mediante un sistema con respuesta rápida, confiable y de bajo costo. La frecuencia nominal de la tensión de la red en nuestro país es de 60Hz. En condiciones normales de funcionamiento, la capacidad de generación conectada a una red eléctrica es superior al consumo. Para ello, se mantiene una reserva de energía rodante, es decir, una capacidad no utilizada que puede compensar las variaciones bruscas de carga y mantener la frecuencia dentro de un margen de tolerancia establecido (Ane, F. y Arguelles, M., 2007).

Pueden darse los dos casos siguientes:

1. La carga es superior a la generación. En este caso, la frecuencia disminuye. Su velocidad de caída dependerá:

- De la reserva de energía rodante.
- De la constante de inercia de los generadores conectados a la red.

En tales condiciones, si la disminución de la frecuencia se sitúa por encima del margen de tolerancia y 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.

2. La carga es inferior a la generación. En este caso, la frecuencia aumenta. El equilibrio se establece mediante un proceso análogo al anterior, actuando sobre los sistemas de regulación de los alternadores para disminuir su capacidad de generación. El equilibrio se alcanza de forma más sencilla que en el caso anterior.

Las variaciones de frecuencia crean efectos que afectan no solo a los usuarios, al ocasionar problemas a los equipos electrodomésticos, sino que impiden la óptima sincronización de las máquinas generadoras de energía eléctrica.

1.2.1. Efectos producidos por las variaciones de la frecuencia

En los márgenes normales de tolerancia el principal efecto de las variaciones de frecuencia es el cambio en la velocidad de las máquinas rotativas. En tales condiciones pueden producirse los siguientes fenómenos: los motores transmiten más o menos potencia cuando disminuye la velocidad del generador, que disminuye a su vez la capacidad de refrigeración del mismo (menor flujo de aire a través de los bobinados y partes). Las pérdidas en el hierro varían en forma proporcional al valor de la frecuencia afectando otros equipos como son los filtros armónicos que sufren un efecto distorsionador, los equipos electrónicos que utilizan la frecuencia como referencia de tiempo sufren alteraciones, las turbinas del o los sistemas de generación se ven sometidas a fuertes vibraciones que suponen un severo esfuerzo de fatiga y los posibles problemas de funcionamiento en instalaciones de autogeneración.

Debe preverse la instalación de protecciones de desconexión de máxima y mínima frecuencia.

Después de haber conocido en la presente sección los efectos provocados por la variación de frecuencia en sistemas de generación de energía eléctrica, analizaremos los diferentes tipos de regulación de frecuencia empleados en centrales hidroeléctricas así como sus características.

1.3. Tipos de regulación de frecuencia en centrales hidroeléctricas

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.

Regulación de velocidad a caudal constante: En este tipo de regulación la potencia generada es igual a la suma de la potencia consumida y la potencia disipada en la carga secundaria:

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

Este principio se 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. Por lo general, los micro aprovechamientos no cuentan con grandes reservorios de agua ya que la mayoría se ubica sobre el mismo curso de agua. Los accionamientos mecánicos son caros y requieren un mantenimiento riguroso, lo que encarece el costo de la pequeña central (Ane, F. y Arguelles, M., 2007).

Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventaja las cuales se exponen a continuación.

- *Control del caudal de agua y carga complementaria*: 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.
- *Regulación a caudal constante*: Este tipo de regulación se realiza manteniendo el caudal constante y modificando el valor de carga secundaria necesaria para que la potencia que ésta disipa, junto con la potencia consumida, sea igual a la potencia generada.

1.3.1. Ventajas y desventajas del método de regulación por de los métodos de regulación

- Ventaja de los reguladores por caudal de agua.
 - Ahorro de agua
- Desventajas de los reguladores por caudal de agua.
 - Respuesta lenta del sistema de regulación.
- Ventajas del regulador por carga lastre.
 - Respuesta rápida (importante en caso de cambios grandes en la carga).
 - Exactitud.
 - Puede ser instalado en cualquier lugar de la red.
- Desventaja del regulador por carga lastre
 - Consumo alto de agua.
- Ventaja del control del caudal de agua y carga complementaria
 - Permite una buena regulación.
 - Ahorro de agua, cuestión de suma importancia en el caso ríos de poco caudal, sobre todo en época de sequía, garantizando un menor impacto medioambiental.

En la tabla 1.1 se muestra la comparación entre los diversos sistemas de regulación.

Tabla 1.1: Sistemas de regulación de frecuencia.

	Reg. de caudal		Reg. de carga	
	manual	automático	manual	automático
Costo inicial	muy bajo	alto	bajo	medio
Precisión en la regulación de frecuencia	depende del operador	alto	depende del operador	muy alto
Dificultad de instalación	no hay	alta	baja	baja
Dificultad de operación y mantenimiento	muy baja	baja	muy baja	baja
Requiere vigilancia del operador	si	no	si	no

1.4. Regulación de frecuencia mediante variación de caudal de agua

En el sistema regulador de frecuencia por variación de caudal, un servomecanismo controlado para la frecuencia generada actúa sobre el órgano regulador de caudal (válvula), modificando la cantidad de agua turbinada. El diagrama en bloques de la figura 1.2 describe el regulador de frecuencia antes mencionado.

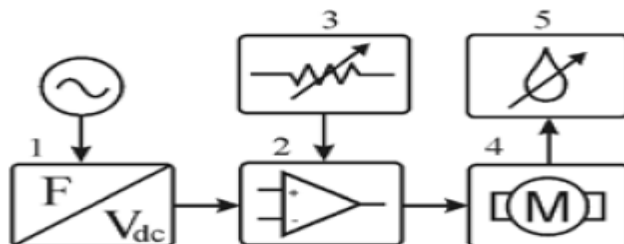


Figura 1.2: Regulador de frecuencia por variación de caudal

Los bloques de la figura 1.2 son:

1. Conversor frecuencia en tensión.
2. Circuito comparador.
3. Valor de referencia.
4. Servomotor de regulación.
5. Elemento de acción final. (Válvula de Regulación).

Este método de regulación está acoplado eléctricamente con un motor que gira en los dos sentidos. Este motor está acoplado mecánicamente a la válvula que controla la entrada de agua a la turbina; es decir, cuando aumenta la frecuencia, el regulador electrónico envía una señal al motor para que gire la válvula de entrada, y disminuya

el caudal de agua que entra a la turbina; y cuando disminuye la frecuencia, envía una señal al motor para que abra la válvula. De esta forma se controla la velocidad de rotación de la turbina, y con ello, la frecuencia y el voltaje

La velocidad máxima de la válvula que regula el 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 este tipo de regulación de frecuencia se lleva a cabo una variación del caudal de agua admitido por la turbina en función de la carga instantánea aplicada al generador; la regulación de caudal se efectúa por medio de un servomotor eléctrico con reductor de velocidad incorporado, de muy baja inercia y por ende alta velocidad de respuesta o por un cilindro hidráulico; el servo-motor actúa directamente sobre el vástago de la válvula de aguja de las turbinas Pelton o sobre el álabe hidrodinámico de regulación de las turbinas Banki. En una turbina Francis, en la que se puede cortar el paso del agua cerrando los álabes del distribuidor, los mecanismos del servomotor tienen que ser muy robustos, para poder vencer la reacción del agua y los rozamientos mecánicos en los ejes. En una turbina Pelton el problema es más sencillo; no sólo porque el sistema de aguja permite cerrar el inyector con muy poco esfuerzo, sino porque además accionando el deflector se impide que el agua llegue a las cazoletas aún sin haberse cerrado el inyector.

En general, un servomotor es un cilindro hidráulico cuyo émbolo, según sea el tipo de turbina, está conectado mecánicamente a los álabes directrices o al inyector, es alimentado por una central hidráulica compuesta por un cárter, una bomba accionada por un motor eléctrico que suministra aceite a presión al sistema, un acumulador para el aceite a presión y la válvula de control.

En el caso de un generador asíncrono conectado a una gran red de distribución, de la que toma la corriente reactiva para generar su propio magnetismo, ésta se encarga de regular su frecuencia por lo que no es necesario instalar un regulador de velocidad.

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.

La selección del método está ligada a las características del proyecto, como por ejemplo la cantidad del recurso hídrico disponible. La regulación por caudal se utiliza cuando se debe racionar el agua, y así se optimiza su uso. En cambio, si no hay necesidad de racionar el recurso, la regulación por carga es más conveniente.

1.5 Turbinas Hidráulicas

La turbina hidráulica es el elemento clave de la mini central. Aprovecha la energía cinética y potencial que contiene el agua, transformándola en un movimiento de rotación, que transferido mediante un eje al generador produce energía eléctrica.

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.

Las turbinas hidráulicas se clasifican en dos tipos generales: Turbinas de acción y turbinas de reacción. En una turbina de acción la presión del agua se convierte en energía cinética mientras que en una turbina de reacción la presión del agua actúa como una fuerza sobre la superficie de los álabes y decrece a medida que avanza hacia la salida.

1.5.1 Turbina Pelton

La turbina Pelton es de las turbinas de acción más comunes. Está formada por una rueda móvil (rodete) con álabes en forma de doble cucharón, sobre estos cucharones

inciden los chorros de agua a presión atmosférica que salen de las toberas del estator (que pueden ser varias o solamente una), con una alta velocidad.

El chorro de agua sale de un inyector fijo en el cual la regulación se efectúa variando la posición de una aguja que deja pasar más o menos agua por el orificio de salida; luego el chorro incide en la arista central que separa las dos cucharas y se divide en dos partes que salen despedidas lateralmente, para caer después al canal de fuga.

Micro turbina Pelton: Por el número de giros relativamente bajo que posee, es adecuada para instalaciones con grandes caídas de agua y caudales reducidos, lo que la convierte en una de las turbinas más utilizadas en micro-centrales hidroeléctricas.

Pueden ser de eje horizontal o vertical y tener desde uno hasta cuatro inyectores. El acoplamiento a generadores eléctricos puede ser directo o indirecto a través de poleas y correas de alto rendimiento.

Es una turbina de fácil y sólida construcción, que ocupa poco espacio y de una alta disponibilidad, bajo costo de mantenimiento y su eficiencia es alta, pues ronda el 80%. Los sistemas de regulación son sencillos y la instalación de la turbina también es sencilla.

Generalmente todas las principales partes mecánicas están hechas de acero inoxidable, lo que las hace más robustas y duraderas, tienen menos peligro que se dañen las cucharas y las reparaciones son más sencillas.

1.6 Grupos electrógenos

Los Grupos Electrógenos diésel son conjuntos de máquinas rotativas, eléctricas y de combustión, acopladas mediante un eje mecánico, capaces de transformar la energía térmica precedente del combustible en energía mecánica en forma de giro del eje, y a su vez esta energía eléctrica en forma de corriente alterna. Se componen generalmente de un generador eléctrico sincrónico con tensión constante, y accionado por un motor de combustión interna con ciclo diesel. Según el destino asignado, los grupos se dividen en grupos para uso terrestre y grupo para uso marino, los grupos para uso terrestre se han previsto de dos tipos: grupos estáticos (instalación fija) y grupos móviles (instalaciones móviles).

El grupo electrógeno, ver figura 1.3, es una máquina que mueve un generador de electricidad a través de un motor de combustión interna. Una de las utilidades más comunes es la de generar electricidad en aquellos lugares donde no hay suministro eléctrico, generalmente son zonas apartadas con pocas infraestructuras y muy poco habitadas. Otro caso sería en locales de pública concurrencia, hospitales, fábricas, etc., que, a falta de energía eléctrica de red, necesiten de otra fuente de energía alterna para abastecerse (TUSA, 2010).



Figura 1.3: Grupo electrógeno terrestre.

1.7 Regulación de frecuencia en grupos electrógenos

El régimen normal de funcionamiento (r.p.m.) del motor viene establecido en función de la frecuencia de la tensión del generador. El número de revoluciones de funcionamiento del motor está estrechamente ligado a la frecuencia de la tensión del generador y del número de polos del alternador, en función a la siguiente formula:

$$n = \frac{120 \times F}{P}$$

$$F = \frac{n \times P}{120}$$

Donde:

n= N° de revoluciones por minuto del motor.

F= Frecuencia, Hz.

P= número de polos.

El motor diesel está previsto de un regulador de velocidad que tiene como finalidad mantener constante, el número de revoluciones del motor en función de la carga. Este puede ser mecánico o electrónico. Generalmente el regulador electrónico da unas prestaciones superiores a las del regulador mecánico (TUSA, 2010).

El regulador electrónico como se muestra en la figura 1.4 está constituido básicamente por los siguientes componentes:

- Unidad de control.
- El actuador.
- Pick-Up magnético.

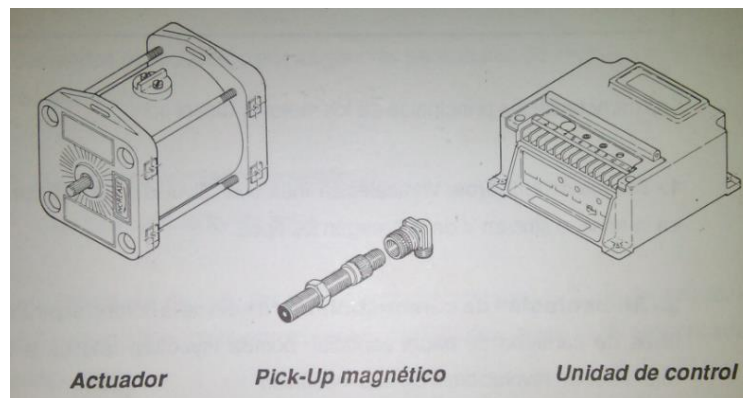


Figura 1.4: Reguladores electrónicos de frecuencia

El funcionamiento básico del regulador electrónico se basa en la captación de impulsos, que transformados en frecuencia por el Pick-Up, son leídos por el circuito electrónico que mantiene una frecuencia de referencia. En función del valor de comparación, la unidad de control envía un pulso eléctrico al actuador que lo convierte en un movimiento mecánico, dando una orden muy precisa al brazo que actúa sobre la cremallera de la bomba de inyección, que proporciona el flujo de combustible necesario al motor para garantizar el correcto funcionamiento del grupo electrógeno con el grado porcentual de carga.

Después de los análisis realizados hay que recordar algunas de las características de las máquinas sincrónicas.

1.8 Sincronización de generadores

La operación de dos o más generadores en paralelo tiene ventajas significativas respecto a un generador trabajando solo conectado a una carga, quizás la ventaja más relevante sea la disponibilidad. Es posible conectar en paralelo únicamente los

generadores necesarios para suplir las necesidades de potencia debidas a los incrementos de la carga, esto con una disponibilidad de generación mayor que cuando se dispone de un solo generador.

La energía de sincronización es la energía transferida de un alternador a otro por medio de la corriente de sincronización. Debido al flujo de la corriente de sincronismo, se produce una acción de motor en la máquina retrasada provocando que esta avance y entre en sincronismo, sin embargo esta corriente actúa como una carga del alternador guiando reduciendo su velocidad. Si los alternadores tratasen en algún momento de salir de sincronismo, esta corriente de sincronismo -la acción resultante de motor y la acción de la carga- los ayudarán a mantenerse en sincronismo (CNCI, 2006).

Si dos o más generadores están conectados en paralelo esto no implica que la distribución de carga sea proporcional para cada uno de los generadores. Para los generadores síncronos conectados en paralelo la distribución de potencia aparente depende de los ajustes de voltaje y frecuencia para cada uno de los generadores (Ramírez J. y Sánchez G., 2012).

Para conectar generadores en paralelo es necesario tener muy en cuenta algunos aspectos para el correcto funcionamiento y de esta manera evitar cualquier tipo de problemas tales como que los generadores se dañen severamente y que la carga pierda potencia (Sargado J., 2014), dichos aspectos se explican a continuación:

- *Voltajes iguales:* Si los voltajes de los generadores no son exactamente iguales, habrá un flujo de corriente muy grande cuando se cierre el interruptor. Para evitar este problema, cada una de las tres fases debe tener exactamente el mismo valor de voltaje y ángulo de fase que la línea a la que se conecta.

En otras palabras, el voltaje de fase a debe ser exactamente igual al voltaje en la fase a' y así en forma sucesiva para las fases b-b' y c-c'.

- *Frecuencias iguales:* Las frecuencias de los 2 o más generadores al igual que los voltajes deben ser las mismas ya que se ocasionarían graves problemas, esto lo podemos visualizar en las siguientes gráficas:

La figura 1.5 muestra una gráfica que posee 60 Hz y un voltaje fase de 120V.

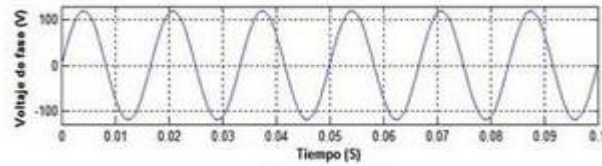


Figura 1.5: Gráfica del voltaje 120V, 60Hz

La figura 1.6 muestra la gráfica que tiene 58 Hz, apenas 2 Hz menor que la anterior y el mismo voltaje de fase.

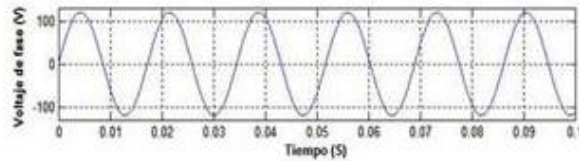


Figura 1.6: Gráfica del voltaje 120V, 58Hz

Y en la figura 1.7 podemos ver el resultado de lo que sucedería si ponemos a funcionar el generador a frecuencias diferentes (60 Hz y 58 Hz).

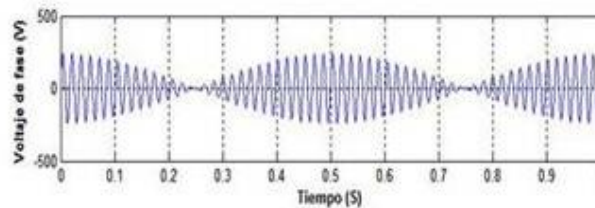


Figura 1.7: Diferencia de frecuencias 2 Hz.

Como se puede ver en la gráfica resultante de la suma de las ondas a distintas frecuencias y al mismo voltaje se obtiene a la salida un voltaje totalmente distorsionado y con una frecuencia igual a la diferencia entre el valor de las frecuencias de las dos primeras ondas lo cual nos ocasionaría grandes problemas en la carga.

- *Secuencias de fase:* Los ángulos de las dos fases deben de ser iguales, ver figura 1.8.

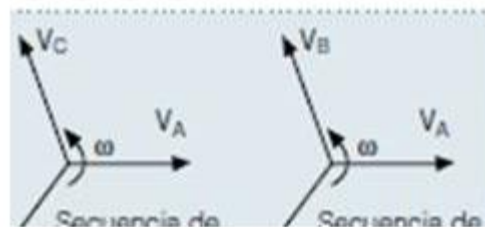


Figura 1.8: Secuencia de fases

La secuencia en la que el voltaje de fase llegue a su pico en los dos generadores sea la misma. Si la secuencia de fase es diferente entonces aun cuando un par de voltajes estén en fase, los otros dos pares de voltajes estarán defasados por 120° . Si se conectan los generadores de esta manera, no habrá problema con la fase a, pero fluirán enormes corrientes en las fases b y c, lo que dañará ambas máquinas.

- *Similares características constructivas:* Un factor casi no mencionado en fuentes bibliográficas es que las máquinas deben ser iguales, es obvio que no se podrá obtener dos generadores totalmente idénticos, pero al menos que se parezcan mucho en su parte constructiva, que las potencias que entregan cada uno sean de similar valor, y preferiblemente del mismo fabricante.

Los límites presentados en la tabla 1.2 establecen el rango en el cual es adecuado realizar la sincronización; si esta sincronización se encuentra fuera de los rangos, se pueden presentar problemas en el torque de los generadores y daños en los elementos del usuario final (Marín, D., 2013).

Tabla 1.2: Límites de los parámetros de sincronización con la red.

Capacidad de la GD	Diferencia de frecuencia (Δf)	Diferencia de tensión (ΔV)	Diferencia de ángulo de fase ($\Delta \phi$)
0.0 - 0.5 MVA	0.3 Hz	10 %	20
0.5 - 1.5 MVA	0.2 Hz	5 %	15
1.5 - 10 MVA	0.1 Hz	3 %	10

1.9 Procedimiento para conectar los generadores

Para la puesta en paralelo de generadores se deben seguir algunos pasos y tomar algunas precauciones para el óptimo funcionamiento de estas máquinas síncronas.

- *Poner en funcionamiento el generador a conectar:* En este punto se pone en funcionamiento el generador que se desea colocar en paralelo (G.E.) esto conlleva a llevarlo a su velocidad sincrónica e igualando el valor de sus voltajes, otra condición es la secuencia de fase del generador en aproximación se debe comparar con la secuencia de fase del sistema en operación. Como mencionábamos anteriormente el grupo electrógeno se fijará con la frecuencia y el voltaje deseados, por lo que a la hora de la sincronización se deben ajustar estos parámetros en la pequeña central hidroeléctrica.

- *Secuencia de fases:* Otra condición es la secuencia de fase del generador en operación (P.C.H.) se debe comparar con la secuencia de fase del sistema en aproximación. Existen muchas formas de comprobar esto una de ellas es conectar alternativamente un pequeño motor de inducción a los terminales de cada uno de los dos generadores. Si el motor gira en la misma dirección en ambas ocasiones, entonces la secuencia de fase es la misma en ambos generadores. Si el motor gira en direcciones opuestas, entonces las secuencias de fase son diferentes y se deben invertir dos de los conductores del generador en aproximación.
- *Sincronización de los generadores:* Este punto es el de mayor importancia cuando se trata de generadores en paralelo, es por eso que se antes de poner en funcionamiento los dos o más generadores debemos hacer algunas pruebas para asegurarnos de su correcta sincronía (Sargado J., 2014).

Un sincronoscopio, como se muestra en la figura 1.9, es un instrumento que indica el estado de sincronización de las tensiones de los generadores, por tanto mide e indica la diferencia en los ángulos de fase de cualquier fase entre los dos sistemas.



Figura 1.9: Sincronoscopio de luces encendidas

Entre los principales están los de aguja y los electrónicos, ver figura 1.10.



Figura 1.10: Sincronoscopio de aguja

Puesta a carga: En un alternador una vez que tiene las rpm deseadas lo que conlleva a la frecuencia de red y la tensión ajustada a la de servicio, al aplicársele carga existirá una caída de tensión que deberá ser compensada con una mayor excitación y mantener la tensión de operación de forma automática o de forma manual, de la misma forma al asumir carga (kW) la máquina motriz necesitara compensar la caída de velocidad del mismo modo de la tensión

De la misma forma un alternador que pierde carga tendrá que hacer ajustes de velocidad y de voltaje, de no hacer esto podríamos provocar grandes daños a la máquina, como un embalamiento y todos los problemas que acarrea dicha situación.

La carga en un alternador implica ajuste de voltaje y ajuste de velocidad. En caso de alternadores en paralelo, una vez trabajando sincrónicamente el ajuste de tensión será controlada por un compensador en cuadratura, que irá a mantener el FP (factor de potencia) lo cual implica un cuidado especial. Del mismo modo las cargas entre los alternadores será controlada por el torque de la máquina al ser ajustado el control de velocidad (Sargado J., 2014). A continuación, se explican más detalladamente algunos casos que pueden suceder en la puesta a carga de los generadores.

Se considera el caso de una máquina, conectada a barras sobre las cuales existen ya trabajando otras máquinas, tales que sus potencias son muy superiores a la primera, de manera que ésta no puede alterar la tensión de barras, por esto se considera $V = \text{constante}$ y se dice sobre barras infinitas.

Caso 1. Máquina en vacío: será $I = 0$, $d = 0$, $E_0 = V$ porque el estar en vacío es su fem la que coincide con la tensión de barras, figura 1.11.



Figura 1.11: Máquina en vacío

Caso 2. Se le aumenta la velocidad de la máquina motriz conectada al alternador. El incremento de la velocidad resultará en un avance de E_0 sobre V en un ángulo d .

Con esto fluirá una corriente eléctrica (I) perpendicular a la caída de tensión $jX_d * I$, en conclusión se entrega corriente a la red, figura 1.12.

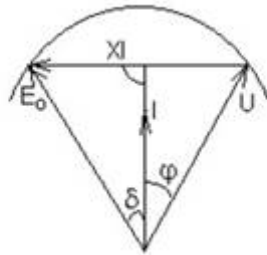


Figura 1.12: Aumento de la máquina motriz

Caso 3. Se varía solamente la excitación. Figura 1.13.

- Sobreexcitado: corriente en retraso de $p/2$
- Subexcitado: corriente en adelanto de $p/2$
- Y en conclusión se produce corriente reactiva pura

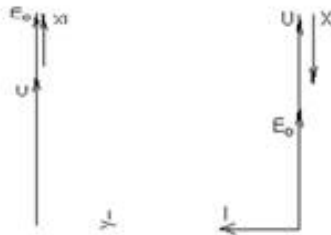


Figura 1.13: Variación de la excitación

Caso 4. Se aumenta la velocidad y la excitación.

Como la diferencia $E_0 - U$ es mayor, la corriente eléctrica (I) será mayor y en conclusión a este caso mejoramos o variamos el $\cos \phi$ según la necesidad o norma presente, figura 1.14.

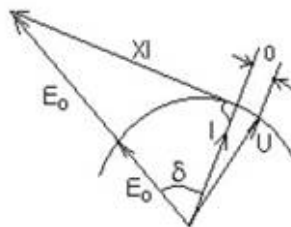


Figura 1.14: Aumento de velocidad y excitación

1.10 Descripción del sistema híbrido de generación de energía eléctrica hidro-diesel

Como se muestra en la figura 1.15 el sistema cuenta con una pequeña central hidroeléctrica (P.C.H.), un grupo electrógeno (G.E.), y una tarjeta de control (T.C.S) que se encarga de regular la frecuencia en la P.C.H. a través de un motor asíncrono trifásico accionado mediante relé que actúa sobre una válvula regulando la entrada de agua en la turbina variando así la frecuencia en la P.C.H y de la sincronización a través del transferencial que conecta al grupo electrógeno en paralelo con la red de la hidroeléctrica.

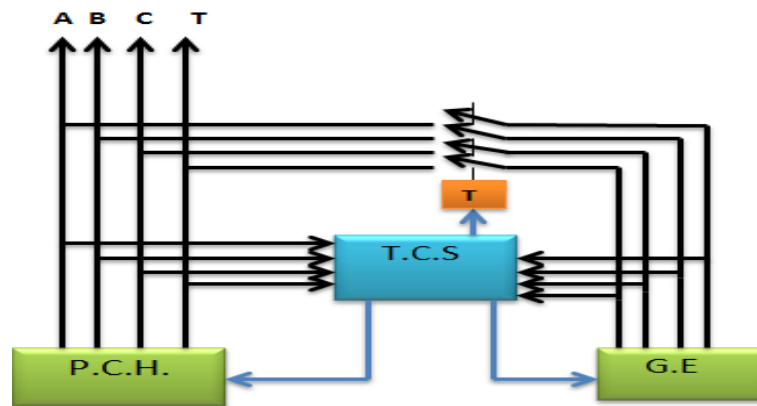


Figura 1.15: Sistema de sincronización hidro-diesel

La T.C.S. está basada en el control con Arduino y se encarga de medir la potencia, tensión, la frecuencia y la fase, en ambas máquinas y de la regulación de la frecuencia en la P.C.H. Al detectar que la P.C.H. está al 80% de su capacidad el Arduino envía una señal de arranque al G.E. (A.G.), el cual está prefijado a una frecuencia y tensión adecuada para la sincronización. Cuando todos los parámetros de sincronización mencionados son los adecuados, la T.C.S. envía una señal al transferencial (T) el cual conecta el grupo electrógeno en paralelo con la red de la pequeña central hidroeléctrica, esta tarjeta cuenta con conexión USB para la comunicación con la Pc.

La regulación de la frecuencia y la tensión en el grupo electrógeno la hará la propia unidad de control del grupo, se fijará una frecuencia deseada de aproximadamente 60Hz.

Otra consideración que debemos tener en cuenta para la sincronización de un sistema híbrido hidro-diesel es que la incorporación del grupo electrógeno se hará cuando la mini hidroeléctrica se encuentre a más del 80% de su capacidad de generación, por lo que se conformará un sistema para el arranque automático del grupo electrógeno.

Después de haber descrito nuestro sistema de sincronización a diseñar, se expondrán las características y el funcionamiento de algunos de los componentes electrónicos fundamentales del sistema.

1.11 Las Plataformas Arduino (Descripción)

En la actualidad las evoluciones de los microcontroladores han impulsado en gran medida el desarrollo de la Ingeniería de Control permitiendo diseñar equipos más compactos y versátiles para la medición y control. Es por ello que cosas tan comunes hoy en día como el transporte, las comunicaciones y en general los procesos de producción han tenido una evolución extraordinaria, alcanzando niveles de seguridad y calidad con los que no se contaba algunas décadas atrás. Con esta evolución de los microcontroladores se han desarrollado nuevas plataformas, una de la más utilizada en el mundo actual es la de Arduino.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de los microcontroladores en proyectos multidisciplinarios.

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el ATmega168, ATmega328, ATmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo costo que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado, el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque (bootloader) que corre en la placa.

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada de toda una gama de sensores y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino

pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un ordenador, si bien tienen la posibilidad de hacerlo y comunicar con diferentes tipos de software (por ejemplo: Flash, Processing, MaxMSP, C, C++) [3, 5, 9].

1.11.1 Ventajas del empleo de Arduino

Hay muchos otros microcontroladores y plataformas con microcontroladores disponibles para la computación física. Parallax Basic Stamp, BX-24 de Netmedia, Phidgets, Handyboard del MIT (Massachusetts Institute of Technology), y muchos otros ofrecen funcionalidades similares. Todas estas herramientas organizan el complicado trabajo de programar un microcontrolador en paquetes fáciles de usar. Arduino, además de simplificar el proceso de trabajar con microcontroladores, ofrece algunas ventajas respecto a otros sistemas a profesores y estudiantes.

- Económicas: Las placas de Arduino son más baratas comparadas con otras plataformas de microcontroladores. La versión más cara de un módulo de Arduino puede ser montada a mano, e incluso ya montada cuesta menos de 60€.

- Multi-Plataforma: El software de Arduino funciona en los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux. La mayoría de los entornos para microcontroladores están limitados a Windows.

- Entorno de programación simple y directo: El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes y lo suficientemente flexible para los usuarios avanzados. Pensando en los profesores, Arduino está basado en el entorno de programación de Processing con lo que el estudiante que aprenda a programar en este entorno se sentirá familiarizado con el entorno de desarrollo Arduino.

- Software ampliable y de código abierto: El software Arduino está publicado bajo una licencia libre y puede ser ampliado por programadores experimentados. El lenguaje puede ampliarse a través de librerías de C++, y si se está interesado en profundizar en los detalles técnicos, se puede dar el salto a la programación en el lenguaje AVR C en el que está basado.

- Hardware ampliable y de código abierto: Arduino está basado en los microcontroladores ATmega168, ATmega328y ATmega1280. Los planos de los módulos están publicados bajo licencia Creative Commons, por lo que diseñadores de circuitos con experiencia pueden hacer su propia versión del módulo, ampliándolo

u optimizándolo. Incluso usuarios relativamente inexpertos pueden construir la versión para placa de desarrollo para entender cómo funciona y ahorrar algo de dinero

1.11.2 Aplicaciones de Arduino

Las aplicaciones que ofrece Arduino son múltiples, y dependen del problema a resolver. Mediante diferentes componentes se pueden crear aplicaciones sencillas enfocadas a la docencia para estudiantes de automática, proyectos más elaborados para la industria, entre otros. Ejemplos de estas aplicaciones:

- Xoscillo: Osciloscopio de código abierto.
- Arduinome: Un dispositivo controlador MIDI (Interfaz Digital de Instrumentos Musicales).
- OBduino: Un económetro, es un indicador del consumo de un vehículo.
- Humane Reader: Dispositivo electrónico de bajo coste con salida de señal de TV que puede manejar una biblioteca de 5000 títulos en una tarjeta microSD.
- The Humane PC: Equipo que usa un módulo Arduino para emular un computador personal, con un monitor de televisión y un teclado para computadora.
- Ardupilot: Software y hardware de aeronaves no tripuladas.
- ArduinoPhone: Un teléfono móvil construido sobre un módulo Arduino.
- Impresoras 3D

1.11.3 Lenguaje de programación de Arduino

La plataforma Arduino tiene un lenguaje propio que está basado en C/C++ y por ello soporta las funciones del estándar C y algunas de C++. Sin embargo, es posible utilizar otros lenguajes de programación y aplicaciones populares en Arduino como Java, Processing, Php, C#, Matlab, Visual Basic, entre otros. Esto es posible debido a que Arduino se comunica mediante la transmisión de datos en formato serie que es algo que la mayoría de los lenguajes anteriormente citados soportan. Para los que no soportan el formato serie de forma nativa, es posible utilizar software intermediario que traduzca los mensajes enviados por ambas partes para permitir una comunicación fluida. Es bastante interesante tener la posibilidad de interactuar con Arduino mediante esta gran variedad de sistemas y lenguajes, ya que dependiendo

de cuales sean las necesidades del problema que se va a resolver se aprovecha la gran compatibilidad de comunicación que ofrece.

Conclusiones parciales del capítulo I

A partir del estudio realizado en este capítulo se arriban a las siguientes conclusiones:

- Los grupos electrógenos pueden generar electricidad en cualquier momento, por lo que son idóneos como sistemas auxiliares, funcionando en momento de déficit de generación.
- Para la sincronización de generadores en un sistema híbrido se debe tener en cuenta que la tensión, la frecuencia, fase y secuencia de fase de los generadores del sistema deben ser aproximadamente iguales.
- No se conoce hasta el momento ninguna tecnología nacional o propia que garantice la sincronización de generadores en sistemas híbridos que permita suplir las necesidades de consumo de energía de la población.
- La regulación por caudal de agua permite el ahorro de agua, cuestión fundamental en las micro y mini instalaciones hidroeléctricas instaladas en las zonas montañosas.
- La sincronización automática también es de interés en las micro y mini centrales hidroeléctricas que tienen posibilidad de conectarse a la red nacional.
- La plataforma Arduino tiene la potencialidad para el desarrollo de sistemas de sincronización.

CAPÍTULO II SISTEMAS DE SINCRONIZACIÓN

Introducción

En este capítulo se describe el procedimiento seguido para el diseño y simulación de un sistema de sincronización entre una central hidroeléctrica y un grupo electrógeno utilizando plataforma Arduino. Se describe el esquema eléctrico del mismo, además las características de los equipos propuestos para su implementación en el proyecto, así como las simulaciones realizadas para comprobación del sistema de sincronización.

2.1 Descripción del sistema de sincronización

El sistema de sincronización está compuesto por varios transductores ZURC encargados de medir potencia, voltaje y frecuencia en la central y el grupo electrógeno y un circuito confeccionado para la medición de fase. Todo esto controlado por la plataforma Arduino la cual visualiza las mediciones a través de un LCD. El Arduino también controla un motor que permite variar el flujo de entrada de agua a la turbina de la central modificando su frecuencia, también se encarga del encendido y apagado del grupo electrógeno y de la sincronización con la central.

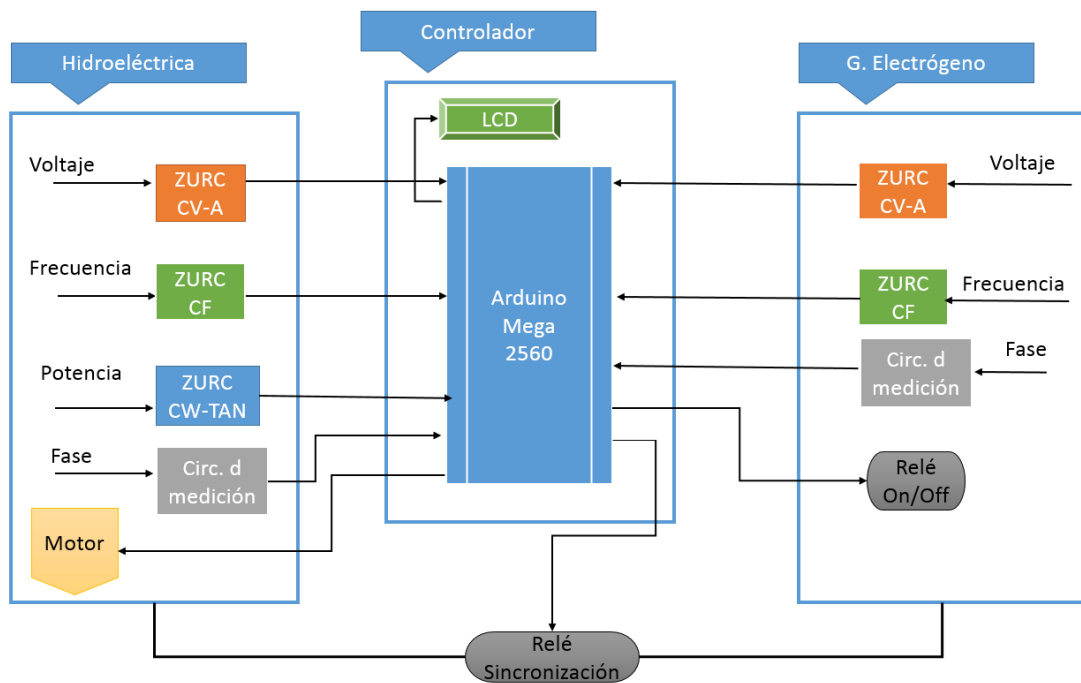


Figura 2.1: Diagrama de funcionamiento del sistema de sincronización

2.2 Equipos de medición utilizados en el sistema de sincronización

En este epígrafe se describen los instrumentos y circuitos usados para las mediciones de los parámetros tensión, frecuencia, potencia y fase así como sus rangos de entradas y los rangos de salida utilizados.

2.2.1 Transductor de tensión ZURC CV-A

Para monitorear las tensiones de salida tanto de la hidroeléctrica como del grupo electrógeno, se utiliza el transductor de tensión de la marca ZURC CV-A figura 2.2, con una entrada de 230 V y salida con rango de 0 a 5 V. En el anexo 1 se puede observar las características de este transductor.



Figura 2.2: Transductor de tensión ZURC CV-A.

2.2.2. Transductor de frecuencia CF ZURC.

La medición de frecuencia tanto del grupo electrógeno como de la central hidroeléctrica se realiza con el transductor de frecuencia CF ZURC figura 2.3, con un rango de entrada de 45 a 65 Hz y su salida 0 a 5 V. Las características de este transductor se pueden observar en el anexo 2.



Figura 2.3: Transductor de frecuencia ZURC CF.

2.2.3. Transductor de Potencia ZURC CW-TAN.

Para la medición de Potencia de la central hidroeléctrica se emplea el transductor de Potencia ZURC modelo CW-TAN. Este dispositivo transforma la señal medida en una señal de proceso. La salida analógica es directamente proporcional al valor de la

potencia activa trifásica medida en un sistema desequilibrado. La medida es realizada en verdadero valor eficaz. La salida analógica puede salir configurada como tensión (0...10 V) o corriente (0...20 mA). En este caso usaremos la salida de 0 a 5V. Figura 2.4, sus características se muestran en el anexo 3.



Figura 2.4: Transductor de Potencia ZURC CW-TAN

2.2.4 Medición de fase

Para la medición de fase, se convierten las dos señales sinusoidales, cuyo desfase entre ellas se desea medir, en pulsos rectangulares. La separación entre los pulsos de una señal y los pulsos de la otra es igual al desfase. En la figura 2.5 están representadas dos ondas sinusoidales desfasadas un ángulo Δt .

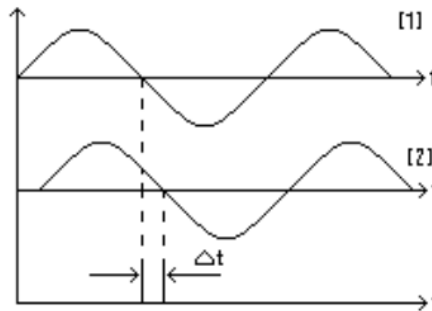


Figura 2.5: Gráfico de dos señales desfasadas en tiempo.

El desfase lo podemos expresar como:

$$\varphi = \omega \Delta t$$

Donde ω es la velocidad angular, en rad-seg, y Δt es el tiempo, en seg, que hay entre el paso por cero de las señales 1 y 2.

$$\Delta t = \frac{\varphi}{\omega}$$

La diferencia de tiempo Δt es directamente proporcional al desfase ϕ , por lo que se conforma un circuito eléctrico que genera un impulso rectangular de duración Δt .

Para generar este impulso las ondas sinusoidales se convierten en ondas cuadradas, para lograr esto se diseñó el circuito mostrado en la figura 2.6.

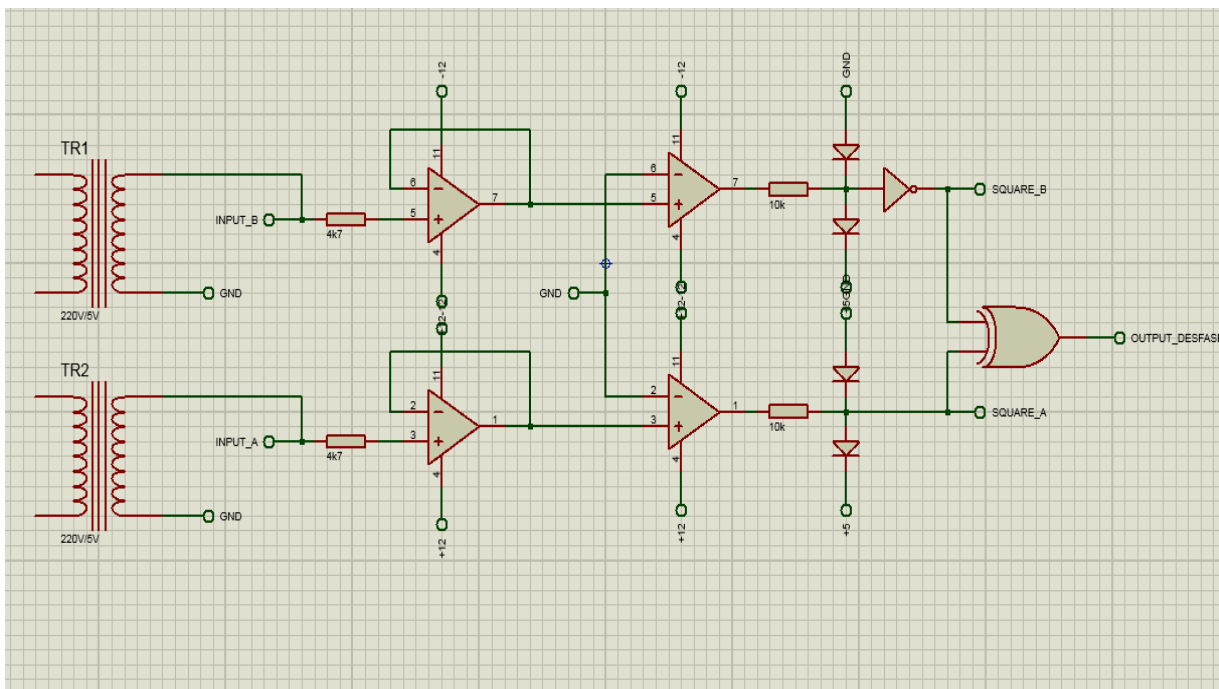


Figura 2.6: Circuito para la medición de fase.

Primeramente, el valor de tensión de una fase de la hidroeléctrica y del grupo electrógeno son transformadas a valores de tensión de 5V por los transformadores TR1 y TR2, luego los valores de tensión transformados son llevados a dos seguidores conformados con el amplificador operacional LM324, estos seguidores son utilizados para lograr una alta impedancia de entrada y que el instrumento no se comporte como una carga en el circuito donde se conecte. Luego la señal se lleva a los comparadores que también están conformados por los A.O. LM324, en los comparadores las ondas sinusoidales se convierten en ondas rectangulares. Estas ondas cuadradas mantienen el mismo desfase que tienen las ondas sinusoidales.

La señal desfasada en un ángulo es llevada a una compuerta NOT, circuito integrado 7404, donde es invertida y luego se realiza una suma exclusiva mediante una compuerta XOR con la señal de referencia, a la salida de esta compuerta se obtiene un impulso rectangular proporcional al desfase como se observa en la figura 2.7

Este pulso es llevado al Arduino, mediante la función Pulse In donde se obtiene el tiempo del impulso generado por circuito y se lleva al valor del desfase.

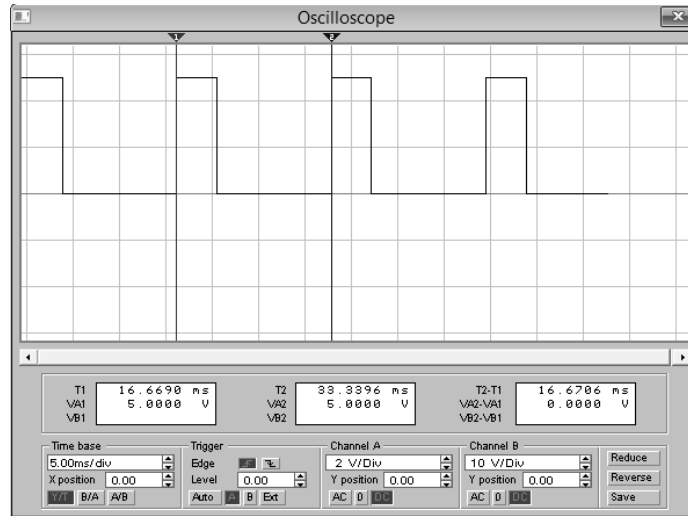


Figura 2.7: Señal de salida del circuito para la medición de fase.

2.3 Actuadores utilizados para la regulación del caudal de agua

El sistema utiliza elementos de acción final con el objetivo de controlar la frecuencia en la central hidroeléctrica, el encendido y apagado del grupo electrógeno y la sincronización.

2.3.1 Motor asincrónico trifásico

Para la regulación de la velocidad de giro de una turbina, por ende, del alternador, o de la frecuencia de generación de una instalación hidrogeneradora es necesario variar la posición de la válvula de regulación del caudal de agua suministrada a la turbina. La regulación de la apertura o cierre de la válvula se realiza mediante un motor eléctrico. Este motor tiene que ser de baja revoluciones para evitar el golpe de ariete o utilizar un sistema de engranaje acoplado al motor. En este trabajo se propone el uso de un motor trifásico asincrónico, como se muestra en la figura 2.8, el cual debe acoplarse a una caja de velocidad para la reducción de la velocidad de apertura y cierre de la válvula.



Figura 2.8: Motor Asíncrono Trifásico

2.3.2 Relé de potencia

Para el arranque automático del grupo electrógeno la señal que proviene del Arduino pasa a dos circuitos integrados (74LS245 y ULN2803) los cuales se utilizan para activar un relé OMRON G2E, figura 2.9, las características de este relé se muestran en el anexo 4.

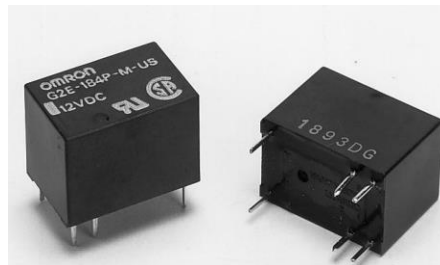


Figura 2.9: Relé OMRON G2E.

Otro relé, del mismo tipo, se utiliza para activar un magnético trifásico que sincroniza las fases del grupo electrógeno con las fases de la central. Otro es usado para controlar el motor asíncrono trifásico que acciona sobre una válvula para regular la frecuencia en la central.

2.3.3 Conexión de los relés para el accionamiento del motor trifásico

Para el accionamiento y control del motor asíncrono trifásico con la finalidad de regular el caudal de agua se propone el esquema que se muestra en la figura 2.10

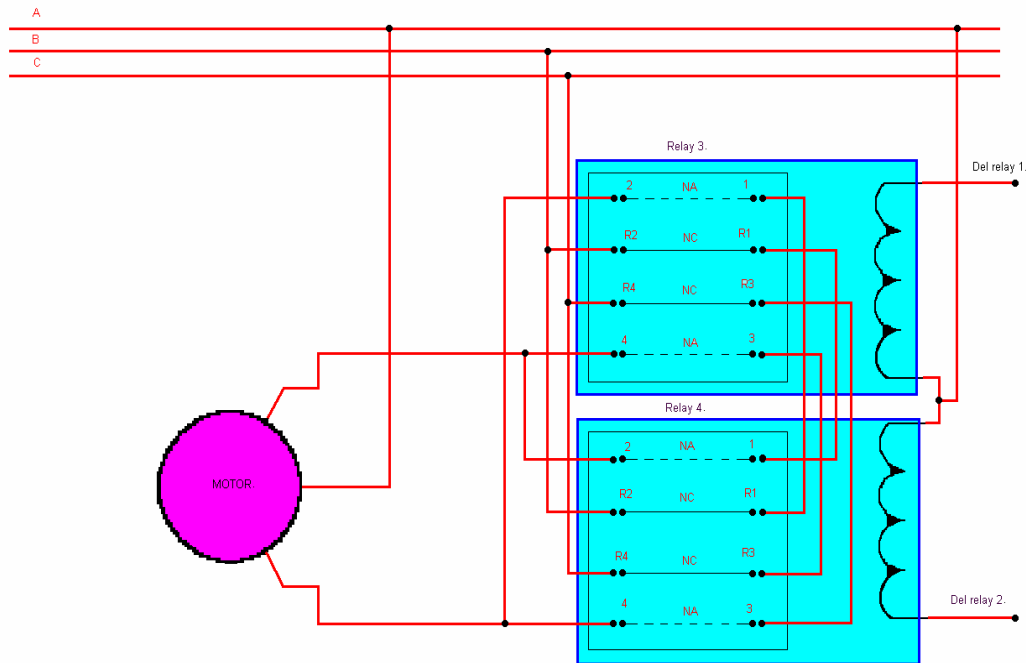


Figura 2.10: Esquema de conexión de los relés para el control de giro del motor trifásico

El principio de funcionamiento del accionamiento del motor trifásico es el siguiente:

El Arduino tiene dos salidas digitales 1 y 2 encargados de la conexión del sistema de relés para el control de la rotación del motor asincrónico trifásico. Los códigos 00 y 11 no energizan las fases B(S) y C(T) del motor, el código 01 permite el giro del motor en un sentido y el código 10 permite el giro en sentido contrario.

Para el control de giro del motor trifásico acoplado a la válvula de regulación del caudal de agua, que alimenta a la turbina, se dispone de dos bits del Arduino, que permiten 4 estados. Se ha concebido que los estados 00 y 11 mantengan en reposo el motor y los estados 01 y 10 permitan el giro del motor en un sentido u otro.

Para lograr una actuación correcta del funcionamiento del motor y de modo seguro se han seleccionado como etapa final dos relés, modelo MULTI9, fabricado en España. Cada uno de estos relés posee 4 contactos, dos normalmente abiertos y dos normalmente cerrados. La conexión de estos relés se muestra en la figura 2.11, donde se puede observar que el accionamiento del motor, solo se efectúa, si uno de los relés es activado y el otro no (si una de las bobinas es energizada y el otro no). En

caso de que las bobinas de los relés 3 y 4, respectivamente, se encuentran energizados o desenergizados, el motor se mantiene en reposo. Para que el motor gire en un sentido u otro se debe energizar solo una de las bobinas (bobina del relé 3 o bobina del relé 4), de modo que los contactos normalmente abierto se cierren y los contactos normalmente cerrado se abran, permitiendo la energización del motor.

Para activar los relés 3 y 4 de la figura 2.10 se conectan las bobinas de accionamiento a las líneas B y C de la red, a través de dos micro relés (micro relé 1 y micro relé 2), como se muestra en la figura 2.11 Estos micro relés son accionados por la señal de control proveniente del Arduino, de acuerdo al estado (código) programado según la regla siguiente:

Código 00: Desactivado (contacto abierto) los micro relés 1 y 2, por consiguiente en estado normal los relés 3 y 4. Motor trifásico en reposo.

Código 11: Activado (contacto cerrado) los micro relés 1 y 2, por consiguiente en estado activado los relés 3 y 4. En este estado los contactos normalmente abierto se cierran y los contactos normalmente cerrado se abren. Motor trifásico en reposo.

Código 01: Se activa el micro relé 1 (se cierra el contacto), por consiguiente se activa (energiza la bobina) el relé 3 y se mantiene no activado el relé 4, por tanto los contactos normalmente cerrado, del relé 3, se abren y los contactos normalmente abierto se cierran. En esta condición se energiza el motor trifásico y gira en un sentido.

Código 10: Se activa el micro relé 2 (se cierra el contacto), por consiguiente se activa (energiza la bobina) el relé 4 y se mantiene no activado el relé 3, por tanto los contactos normalmente cerrado, del relé 4, se abren y los contactos normalmente abierto se cierran. En esta condición se energiza el motor trifásico y gira en sentido contrario.

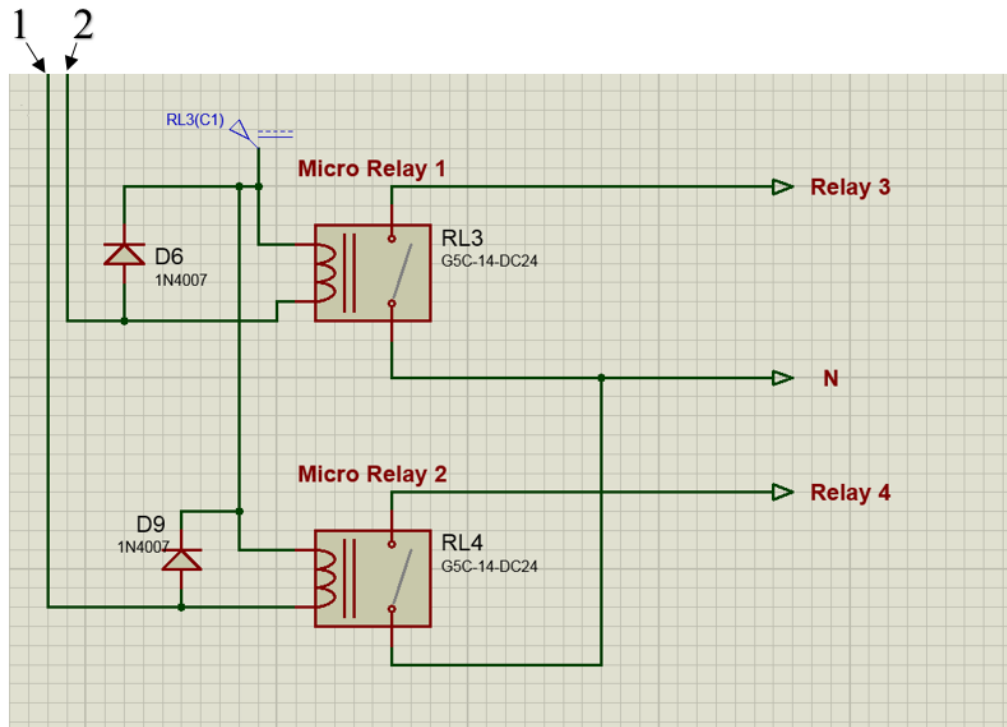


Figura 2.11: Esquema de conexión de los micro relé 1 y 2

2.4 Plataforma Arduino Mega 2560

El controlador utilizado para el sistema de sincronización es el Arduino Mega 2560, fig. 2.12 Es una placa electrónica basada en el Atmega2560 que cuenta con 54 pines de entradas/salidas digitales (de los cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWM) y 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos de hardware de serie), un oscilador de cristal de 16MHz, un puerto USB de conexión, un conector de alimentación, una cabecera de ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar a la micro, solo tiene que conectarse a un ordenador con un cable USB o el poder con un adaptador AC-DC o la batería para empezar. La Mega es compatible con la mayoría de los escudos diseñados para el Arduino Duemilanove o Diecimila.

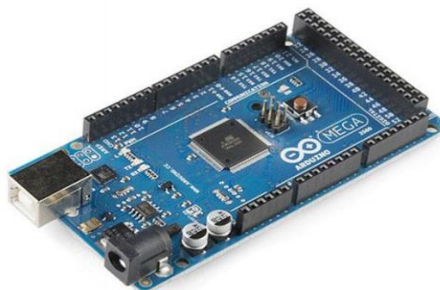


Figura 2.12: Arduino Mega 2560

La tabla 2.1 contiene las especificaciones del Arduino Mega 2560.

Tabla 2.1: Especificaciones del Arduino Mega 2560.

Microcontrolador: ATmega2560	Tensión de alimentación: 5V
Tensión de entrada recomendada: 7-12V	Límite de entrada: 6-20V
Pines digitales: 54 (14 con PWM)	Entradas analógicas: 16
Corriente máxima por pin: 40 mA	
Memoria flash: 256KB	SRAM: 8KB
EEPROM: 4KB	Velocidad del reloj: 16 MHz

2.5 Diseño y simulación del Sistema de Sincronización.

Para la confección y simulación del sistema se utilizó el programa profesional PROTEUS 8.1. El mismo permite que los diseños realizados simulen en tiempo real. Permite, además, programar el Arduino Mega 2560 y simular las tareas que llevará a cabo.

2.5.1 Descripción del circuito en PROTEUS.

El circuito del Sistema de Sincronización, ver figura 2.13, está compuesto por el Arduino Mega 2560, un LCD alfanumérico, potenciómetros para simular la señal de salida de los transductores, 2 LED para indicar el estado de los relé.

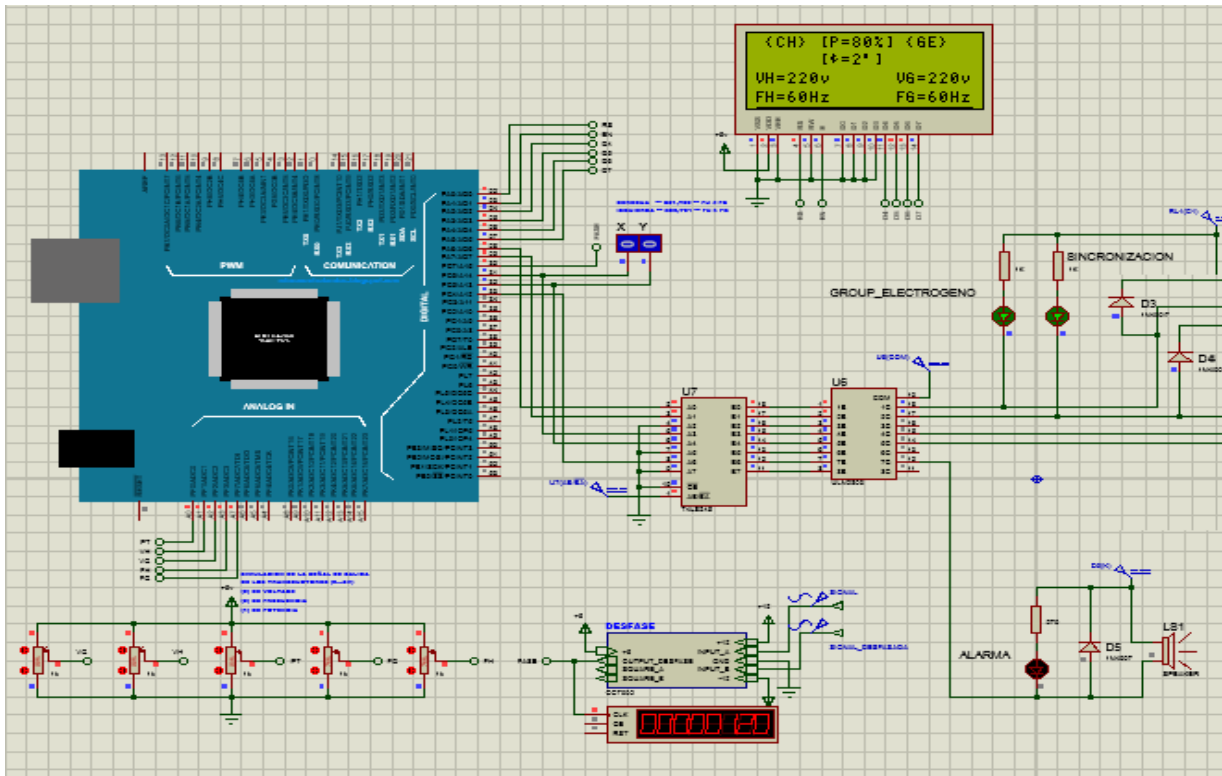


Figura 2.13: Simulación del sistema de sincronización en PROTEUS

Los potenciómetros son usados para simular las mediciones de tensión, potencia y frecuencia de los transductores ZURC ubicados en el grupo electrógeno y la central hidroeléctrica, los mismos van conectados a 5 entradas analógicas del Arduino Mega 2560.

El LCD LM044L, figura 2.14, de 20x4 se encarga de visualizar las mediciones tomadas por el controlador en tiempo real. Aquí se muestra el voltaje medido en la central con la variable (VH), el voltaje medido en el grupo se muestra con la variable (VG). También se muestran las frecuencias medidas en la central y el grupo electrógeno con las variables (FH y FG) respectivamente, la variable PH representa la potencia medida en la central, $\Delta\phi$ representa el desfase de las fases medidas, y el estado del grupo electrógeno y la sincronización.

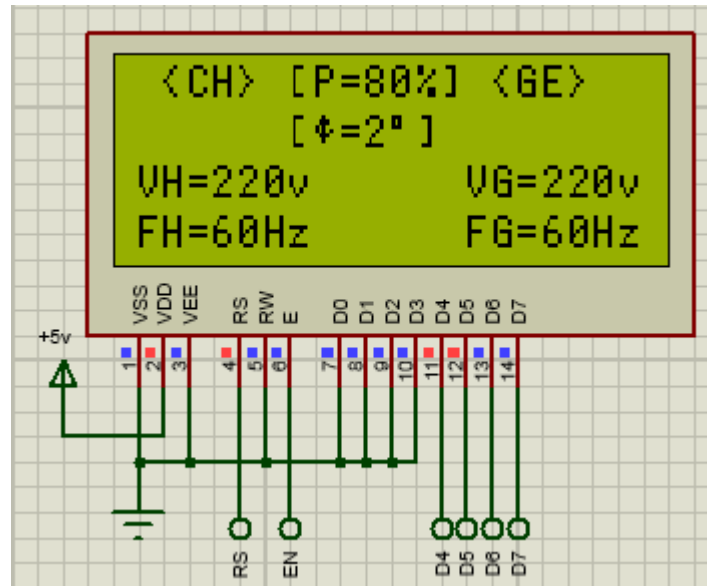


Figura 2.14: LCD LM044L.

2.6 Programación del Arduino Mega 2560

Para la programación del Arduino se utilizó el programa Arduino IDE, que es un compilador en lenguaje C/C++ para plataformas Arduino.

Teniendo en cuenta que el lenguaje C/C++ es un lenguaje de alto nivel, sumamente potente y muy común para programar sistemas con microcontroladores incorporados, que son muy usados en aplicaciones científicas e industriales (industria robótica y cibernética) y que además en la actualidad se utiliza ampliamente en la docencia en muchas universidades e institutos educativos, se considera como la mejor alternativa para la confección del sistema, sin pasar por alto que la programación de Arduino se encuentra actualmente en auge en todos los países de Latinoamérica.

El software del sistema cuenta con un programa principal, ver figura 2.14, desde el cual se accede a diferentes subrutinas que la complementan. El sistema propuesto se va a mantener en un ciclo infinito midiendo la potencia activa de la central hidroeléctrica hasta que detecte un aumento del 80% de su capacidad de generación. Se manda a arrancar el grupo electrógeno y se miden los parámetros, tomando como referencia el voltaje y la frecuencia del grupo electrógeno, para poner en marcha la sincronización, si los parámetros están en el rango deseado se activa la señal para sincronizar.

El programa continúa midiendo la potencia de la central hasta que disminuya al 75%, cuando esto sucede se manda la señal para desactivar la sincronización y posteriormente otra para apagar el grupo, volviendo así el programa a su ciclo inicial, todo esto se realiza mientras el sistema funciona normalmente sin problemas.

2.7 Secuencia de trabajo del sistema de sincronización

- El sistema mide potencia en la Central Hidroeléctrica (CH) en todo momento.
- Cuando la potencia es igual o mayor al 80% de su capacidad de generación $P \geq 80\%$ se debe seguir los pasos siguientes: se envía una señal para arrancar el Grupo Electrónico (GE) y espera 60 segundos hasta que este alcance los parámetros de trabajo definidos por el usuario.
- Se miden frecuencia y tensión en la CH y el GE para comprobar si están correctos los parámetros para iniciar la sincronización.
- Si la frecuencia en la CH no es la deseada, el microcontrolador envía una señal para regular el caudal de agua hasta obtener una frecuencia de ± 0.3 Hz de diferencia con respecto a la del GE.
- Se realiza la medición de desfase entre las fases de la CH y el GE hasta tener una diferencia de $\pm 10^\circ$ ó 12° .
- Si todos los parámetros están dentro de los rangos establecidos para la sincronización, el Arduino envía una señal para sincronizar el sistema, conectándose en paralelo el CH con la GE.
- Si el sistema detecta que los parámetros para la sincronización no son los establecidos, se activa una señal de alarma para que el operador los verifique y en caso de ser necesario los regule manualmente.
- Cuando la sincronización está en marcha el sistema seguirá monitoreando la potencia en la CH.
- Si la potencia en la CH desciende al 75% de su capacidad de generación o menor $P \leq 75\%$.
- Se manda una señal para detener la sincronización.
- Seguidamente si la potencia se mantiene durante 120 segundos $P \leq 75\%$ se mandará otra señal para apagar el GE.
- El sistema continúa en todo momento monitoreando la potencia en la CH.

En la figura 2.15, se muestra el diagrama de flujo del programa principal que responde a la secuencia de trabajo del sistema de sincronización.

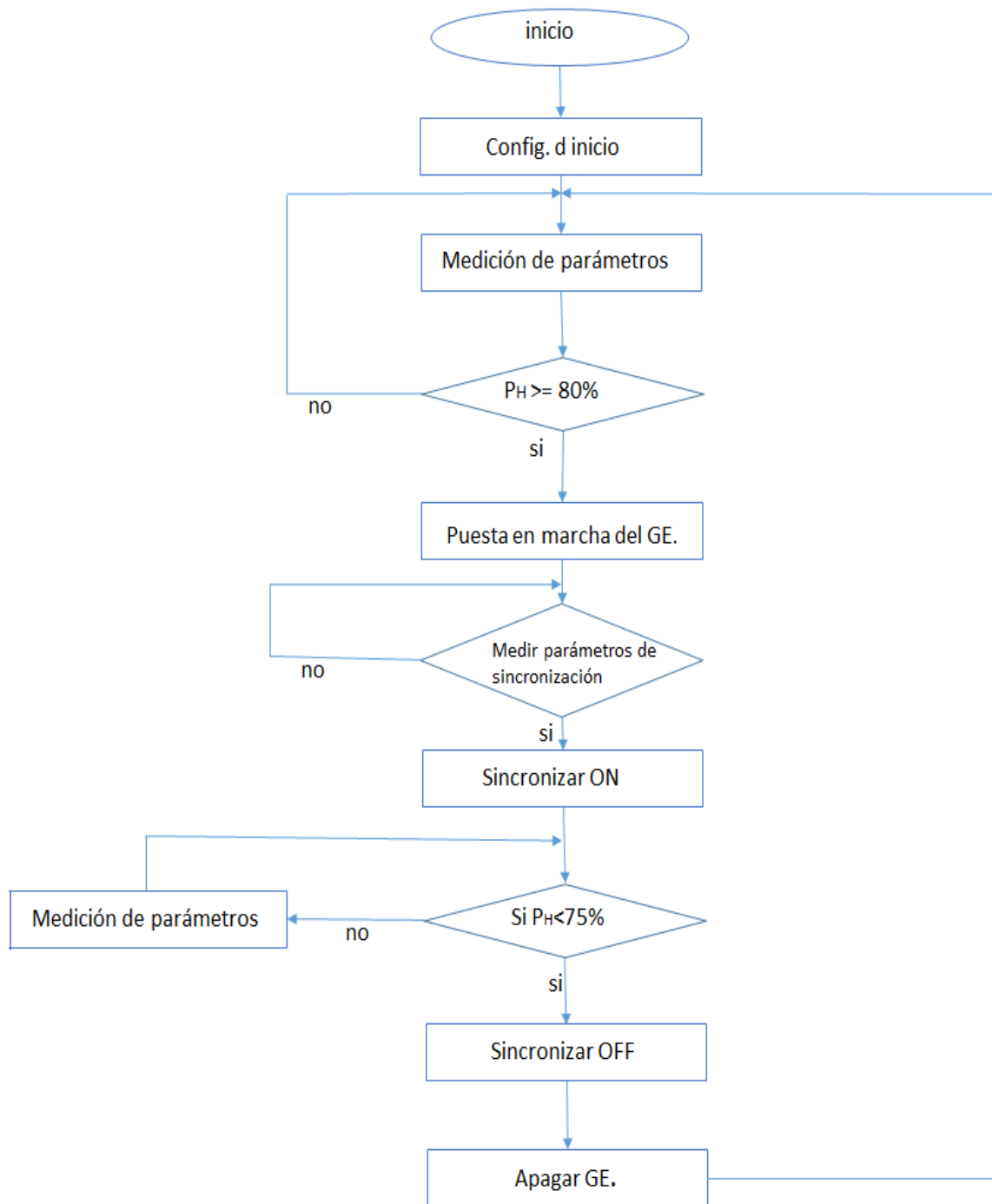


Fig. 2.15: Diagrama de flujo del programa principal

2.8 Valoración económica

A continuación, se muestra el listado y el precio de los componentes utilizados para el diseño del sistema de sincronización entre un grupo electrógeno y una pequeña central hidroeléctrica, también se muestra el presupuesto total para el diseño del sistema de sincronización.

En esta valoración solamente se ha considerado el costo de los componentes.

Componentes	Cantidad	Precio de Unid. (USD)	Precio Total (USD)
Arduino Mega 250	1	15.00	15.00
ZURC CV-A	2	96.27	192.54
ZURC CF	2	130.73	261.46
ZURC CW-TAN	1	105.87	105.87
LM324	4	0.48	1.92
LCD 20x4	1	10.99	10.99
Resistencia	12	0.03	0.36
Diodo LED	3	0.05	0.15
Relé OMRON G2E	4	4.90	14.70
Transformadores de Corriente	3	24.99	49.98
Relé de potencia trifásico (100A)	1	15.60	15.60
Relé de 2 contactos abiertos y 2 cerrados	2	12.50	25.00
Total			723.46

La construcción de un sistema de sincronización, como el diseñado con tecnología propia y adaptable a las diversas condiciones tecnológicas e hidrológicas de las zonas montañosas de Cuba resulta muchas veces menos costos o que un sistema comprado en el exterior. Los sistemas de sincronización automáticos adquiridos en el mercado internacional están en el orden de los 2000 a 3000 USD.

2.9 Valoración medioambiental.

El empleo de las energías renovables, como la energía hidráulica, reduce notablemente la contaminación del medio ambiente, pero este recurso no se puede usar en todo momento debido a que la demanda de energía eléctrica puede en ocasiones ser mayor que la energía eléctrica generada por la pequeña central hidroeléctrica por lo que es necesaria la utilización del generador diesel. Al contar con un sistema de sincronización automático garantiza que el generador diesel (grupo electrógeno) sea utilizado solo en caso necesario, reduciendo así las horas de trabajo del grupo electrógeno, lo que conlleva a una disminución de la emisión de gases a la atmósfera y a disminuir la frecuencia con que se transporta combustible a estas zonas aisladas debido a un ahorro notable del consumo de combustible del grupo electrógeno, lo que disminuye la probabilidad de accidentes que puedan dañar el medio ambiente.

Conclusiones parciales del capítulo II

- Del estudio del sistema de sincronización entre una central hidroeléctrica y un grupo electrógeno, se realizó el diseño y la simulación utilizando plataforma Arduino.
- Según las especificaciones de los equipos e instrumentos propuestos, se describió el esquema eléctrico de los mismos.
- De acuerdo a las características del sistema de sincronización automática se escogió el programa Proteus V8.1 para realizar la simulación y comprobar el funcionamiento del mismo.

CONCLUSIONES

- Se realizó un estudio de los sistemas de regulación de frecuencia en las pequeñas centrales hidroeléctricas que trabajan de forma aislada de la red nacional, y de los sistemas de regulación de frecuencia en grupos electrógenos.
- Se efectuó un estudio profundo de los sistemas de sincronización de generadores de energía eléctrica y los parámetros fundamentales en estos sistemas.
- Se demostró la necesidad de implementar un sistema de sincronización automático en las centrales hidroeléctricas acompañadas con grupos electrógenos de apoyo para garantizar una buena calidad del servicio eléctrico y para facilitar el trabajo de los operadores.
- Se diseñó un sistema de sincronización automático aprovechando al máximo las potencialidades del Arduino Mega 2560, gracias a las características de esta plataforma se simplificó el hardware que lleva sistema.
- Se realizaron diferentes pruebas mediante simulaciones que aseguran el funcionamiento del diseño, por lo que los resultados obtenidos muestran la posibilidad de realizar la construcción del sistema de sincronización.
- Por las características del sistema de sincronización automática se escogió el programa Proteus V8.1 para realizar la simulación del mismo.

Recomendaciones

- Implementar el diseño del sincronizador automático entre un grupo electrógeno y una pequeña central hidroeléctrica utilizando la plataforma Arduino Mega 2560.
- Implementar la comunicación TCP/IP para la comunicación del sincronizador automático con una PC a distancia aprovechando esta capacidad del Arduino.
- Implementar el sistema de trabajo manual.
- Analizar la posibilidad de medición de desfase mediante otro circuito eléctrico u electrónico.

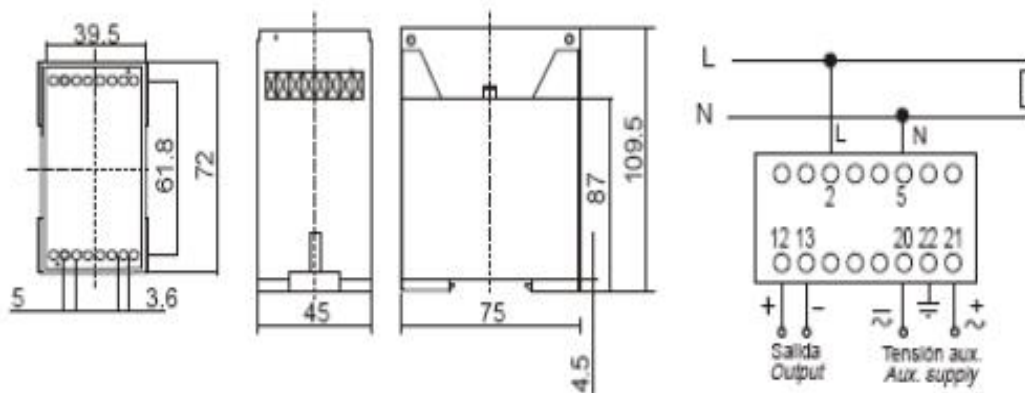
Bibliografía

1. Ane Ramos Frank y Arguelles Stay Michel, "Control de frecuencia en centrales minihidroeléctricas aisladas", Tesis en opción al grado de ingeniero en Automática, Control Automático, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, S. de Cuba, Cuba, 2007.
2. Arduino Mega 2560, DataSheet (www.arduino.com).
3. Balbosa Acuña Yusnel, "Sincronización automática de una central hidroeléctrica y un grupo electrógeno", Tesis en opción al título de Ingeniero en Automática, Automática, Facultad de ingeniería eléctrica, Universidad de Oriente, S. de Cuba, Cuba, 2015
4. CNCL. "Generadores de CA". 2006.
5. Marín Jiménez Juan David. "Estudio del Control de una Pequeña Central Hidroeléctrica para la Operación Por Microrredes en el Sistema de Distribución Loca". Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Colombia. 2013.
6. Pablo Díaz, Rafael Peña. "Estudio de Campo de la Generación Híbridadiesel /renovable para Electrificación Rural". IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES), Cusco, 2010.
7. Posada García Yosvanis, "Diseño de un regulador de frecuencia utilizando dispositivos PSoC", Tesis en opción al título de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Telecomunicaciones, Facultad de ingeniería eléctrica, Universidad de Oriente, S. de Cuba, Cuba, 2012.
8. Ramírez Medina Javier y Sánchez Barroso German. "Diseño y construcción de un tablero de transferencia y sincronización de generadores con PLC y pantalla táctil". Tesis de grado, Facultad de mecánica, Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, Ecuador, 2012.
9. Rashid Muhammed. H. "Electrónica de potencia. Circuitos. Dispositivos y aplicación."
10. Sargado Chamba José, "Generadores síncronos en paralelo"; www.monografias.com. 2014
11. TUSA. "Generamos Luz". Manual General de Instrucciones.

Anexos

Anexo 1: Características del transductor de tensión ZURC CV-A.

Circuito de entrada:	230 V	Precisión:	
Tensión Un:	0...660V	Clase de medida:	0.19 % lectura + 0.01 % Final de escala
Rango de medida de tensión:	0 ... 150 % Un	Coefficiente de T°:	100 ppm/°C
Sobrecarga de tensión:	1000 V permanentes	Aislamiento:	
Frecuencia de la señal entrada:	45/65 Hz	Alimentación en C.A.:	
Impedancia :	3000 Ohmios/voltio	Tensión de prueba:	3 kV RMS 50 Hz 1min.
		Test de impulsos:	4 kV (1.2/50 us)
Circuito de salida:		Alimentación en C.C.:	
Salida de tensión o corriente	0 ... 5, 10 V 0 ... 10, 20 mA	Tensión de prueba:	2 kV RMS 50 Hz 1min.
Salida desplazada:	0,2 ... 2 V 2 10 V 4 ... 20 mA	Test de impulsos:	3 kV (1.2/50 us)
Imp. de carga, en corriente:	<500 Ohm	Condiciones ambientales:	
, en tensión:	>500 Ohm	T° de almacenamiento:	-40° C ... +70° C
T. de respuesta (0...99 % Un):	< 300ms	T° de trabajo:	-10° C ... +55° C
Rizado RMS:	< 0.5 %	Caja:	
		Fijación:	sobre carril DIN 35 x 7,5 mm o fijación mediante tomillos en panel.
Alimentación auxiliar:		Posición de montaje:	cualquiera
Alimentación en C.A.:		Tipo de protección:	caja: IP 40 Terminales: IP 20
Valor nominal:	24/115/230/400 V	Peso:	310 g
Márgenes:	+20% -15%	Normas:	
Frecuencia:	40 ... 90 Hz	Seguridad:	IEC 1010
Consumo:	2.5 VA	Protección:	IEC 529
Alimentación en C.C.:		Normativa de convertidores:	IEC 688
Márgenes:	9-18 / 18-36 V 36-72 / 90-140 V	Compatibilidad electromagnética:	IEC 801, EN50081-2 EN50082-2
Consumo:	2.5 VA		

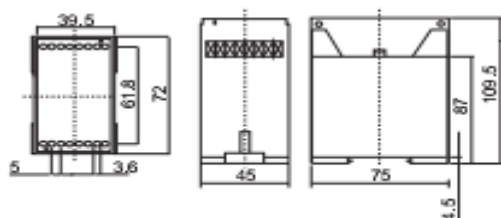


Anexo 2: Características del transductor de frecuencia ZURC CF

Características técnicas

Circuito de entrada:	
Rango de frecuencia:	0... 10kHz
Tensión Un:	10 ... 150V 30...300V 60...660V
Rango de la tensión de entrada: 0 ... 150% Un	
Sobrecarga de tensión:	1000 V permanentes
Impedancia:	3000 Ohmios/voltio
Circuito de salida:	
Salida de tensión o corriente	0 ... 5, 10V 0 ... 10, 20mA
Salida desplazada:	0,2 ... 2V 2 ... 10 V 4 ... 20 mA
Imp. de carga, en corriente:	<500 Ohm
, en tensión:	>500 Ohm
T. de respuesta (0...99% Un):	< 300ms
Rizado RMS:	< 0.5 %
Alimentación auxiliar:	
Alimentación en C.A.:	
Valor nominal:	24 / 115 / 230 / 400V
Márgenes:	+20 % -15 %
Frecuencia:	40 ... 90 Hz
Consumo:	2.5 VA
Alimentación en C.C.:	
Márgenes:	9-18 / 18-36 V 36-72 / 90-140 V
Consumo:	2.5 VA
Precisión:	
Clase de medida:	0.19 % lectura + 0.01 % Final de escala
Coefficiente de Tª:	100ppm/°C
Aislamiento:	
Alimentación en C.A.:	
Tensión de prueba:	3 kV RMS 50 Hz 1min.
Test de impulsos:	4 kV (1.2/50 us)
Alimentación en C.C.:	
Tensión de prueba:	2 kV RMS 50 Hz 1min.
Test de impulsos:	3 kV (1.2/50 us)
Condiciones ambientales:	
Tª de almacenamiento:	-40° C ... +70° C
Tª de trabajo:	-10° C ... +55° C
Caja:	
Fijación:	sobre carril DIN 35 x 7,5 mm o fijación mediante tornillos en panel
Posición de montaje:	cualquiera
Tipo de protección:	caja: IP 40 Terminales: IP 20
Peso:	310 g
Normas:	
Seguridad:	IEC 1010
Protección:	IEC 529
Normativa de convertidores:	IEC 688

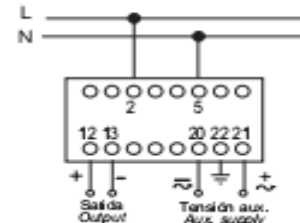
Dimensiones de la caja
Case dimensions



Technical specification

Input:	
Frequency range:	0... 10kHz
Voltage input Un:	10 ... 150V 30...300V 60...660V
Input voltage range: 0 ... 150% Un	
Overvoltage :	1000 V permanent
Impedance :	3000 Ohm / volt
Output:	
Output voltage or current:	0 ... 5, 10 V 0 ... 10, 20 mA
Shifted zero output:	0,2 ... 2 V 2 ... 10 V 4 ... 20 mA
Load, output current:	<500 Ohm
, output voltage:	>500 Ohm
Response time:	<300 ms
Ripple RMS:	< 0.5 %
Auxiliary supply:	
A.C. auxiliary supply:	
Nominal values:	24 / 115 / 230 / 400 V
Ranges:	+20% -15 %
Frequency:	40 ... 90 Hz
Burderz:	2.5 VA
D.C. auxiliary supply:	
Ranges:	9-18 / 18-36 V 36-72 / 90-140 V
Burderz:	2.5 VA
Accuracy:	
class:	0.19 % reading+ 0.01 % full scale
Temperature coefficient:	100 ppm/°C
Isolation:	
A.C. Auxiliary supply:	
Test Voltage:	3 kV RMS 50 Hz 1min
Impulse test:	4 kV (1.2/50 us)
D.C. Auxiliary supply:	
Test Voltage:	2 kV RMS 50 Hz 1min
Impulse test:	3 kV (1.2/50 us)
Environmental:	
Storage temperature:	-40° C ... +70° C
Working temperature:	-10° C ... +55° C
Case:	
Fixing:	Fixing with DIN rail 35x7,5mm or panel mounting with screws.
Mounting:	Any position
Enclosure code:	Case: IP 40 Terminals: IP 20
Weight:	310 g
Standards:	
Safety:	IEC 1010
Protection:	IEC 529
Transducer standard:	IEC 688

Diagrama de conexión
Wiring diagram

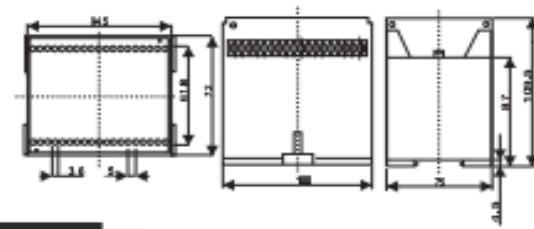


Anexo 3: Características del transductor de potencia CW-TAN.

Características técnicas

Circuito de entrada:	
Tensión U _{in} :	0 ... 660V
Corriente I _{in} :	1A o 5A
Rango de medida de tensión :	0... 150% U _n
Rango de medida de corriente:	0... 150% I _n
Sobrecarga de tensión:	1000 V permanentes
Sobrecarga de corriente:	300 % I _n permanentes
Rango de frecuencia:	45/65 Hz
Consumo entrada de corriente:	0.2 VA
Impedancia entrada de tensión :	3000 Ohmios/volt
Circuito de salida:	
Salida de tensión o corriente	0 ... 5, 10V 0 ... 10, 20 mA
Salida desplazada:	0,2 ... 2 V 2 ... 10 V 4 ... 20mA
Imp. de carga, en corriente:	<500 Ohm
, en tensión:	>500 Ohm
T. de respuesta (0 ... 99% U _n):	<300ms
Rizado RMS:	< 0.5 %
Alimentación auxiliar:	
Alimentación en C. A.:	
Valor nominal:	24 / 115 / 230 / 400 V
Márgenes:	+20 % -15 %
Frecuencia:	40 ... 90Hz
Consumo:	3 VA
Alimentación en C. C.:	
Márgenes:	9-18 / 18-36 V 36-72 / 90-140V
Consumo:	3 VA
Precisión:	
Clase de medida:	0.45 % lectura+ 0.05 % Final de escala 100 ppm/°C
Coefficiente de T°:	
Aislamiento:	
Alimentación en C. A.:	
Tensión de prueba:	3 kV RMS 50 Hz 1min.
Test de impulsos:	4 kV (1.2/50 us)
Alimentación en C. C.:	
Tensión de prueba:	2 kV RMS 50 Hz 1min.
Test de impulsos:	3 kV (1.2/50 us)
Condiciones ambientales:	
T° de almacenamiento:	-40° C ... +70° C
T° de trabajo:	+10° C ... +55° C
Caja:	
Fijación:	sobre carril DIN 35 x 7,5 mm o fijación mediante tornillos en panel.
Posición de montaje:	cualquiera
Tipo de protección:	caja: IP 40 Terminales: IP 20
Peso:	565 g
Normas:	
Seguridad:	IEC 1010
Protección:	IEC 529
Normativa de convertidores:	IEC 688
Compatibilidad electromagnética:	IEC 801, EN50081-2 EN50082-2

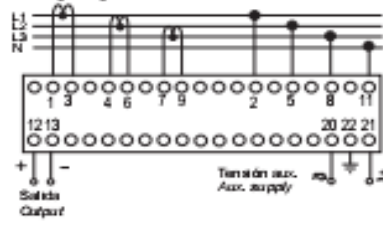
Dimensiones de la caja
Case dimensions



Technical specification

Input:	
Voltage input U _{in} :	0... 660V
Current input I _{in} :	1A or 5A
Voltage range of use:	0... 150 % U _n
Current range of use:	0... 150 % I _n
Overvoltage:	1000 V permanent
Overcurrent:	300 % I _n permanent
Frequency range:	45/65 Hz
Burden current input:	0.2 VA
Impedance voltage input:	3000 Ohm/volt
Output:	
Output voltage or current:	0... 5, 10 V 0... 10, 20 mA
Shifted zero output:	0,2 ... 2 V 2 ... 10 V 4 ... 20 mA
Load, output current:	<500 Ohm
, output voltage:	>500 Ohm
Response time:	<300 ms
Ripple RMS:	< 0.5 %
Auxiliary supply:	
A.C. auxiliary supply:	
Nominal values:	24 / 115 / 230 / 400 V
Ranges:	+20% -15 %
Frequency:	40 ... 90 Hz
Burden:	3 VA
D.C. auxiliary supply:	
Ranges:	9-18 / 18-36 V 36-72 / 90-140 V
Burden:	3 VA
Accuracy:	
class:	0.45 % reading+ 0.05 % full scale 100 ppm/°CA
Temperature coefficient:	
Isolation:	
A.C. Auxiliary supply	
Test Voltage:	3 kV RMS 50 Hz 1min
Impulse test:	4 kV (1.2/50 us)
D.C. Auxiliary supply	
Test Voltage:	2 kV RMS 50 Hz 1min
Impulse test:	3 kV (1.2/50 us)
Environmental:	
Storage temperature:	-40° C ... +70° C
Working temperature:	+10° C ... +55° C
Case:	
Fixing:	Fixing with DIN rail 35x7,5mm or panel mounting with screws.
Mounting:	Any position
Enclosure code:	Case: IP 40 Terminals: IP 20
Weight:	565 g
Standards:	
Safety:	IEC 1010
Protection:	IEC 529
Transducer standard:	IEC 688
Electromagnetic compatibility:	IEC 801, EN50081-2 EN50082-2

Diagrama de conexión
Wiring diagram



CW-TAN

Anexo 4: Características del relé OMRON G2E.

■ Coil Ratings

General-purpose Relays

Rated voltage	5 VDC	6 VDC	9 VDC	12 VDC	24 VDC
Rated current	89.3 mA	75 mA	50 mA	37.5 mA	18.8 mA
Coil resistance	56 Ω	80 Ω	180 Ω	320 Ω	1,280 Ω
Coil inductance (H) (ref. value)	Armature OFF	0.044	0.067	0.137	0.229
	Armature ON	0.091	0.136	0.297	2.1
Must operate voltage	70% max. of rated voltage				
Must release voltage	10% min. of rated voltage				
Max. voltage	120% of rated voltage at 23°C, 110% at 60°C				
Power consumption	Approx. 450 mW				

High-sensitivity Relays

Rated voltage	5 VDC	6 VDC	9 VDC	12 VDC	24 VDC
Rated current	41.7 mA	33.3 mA	22.5 mA	17.1 mA	8.6 mA
Coil resistance	120 Ω	180 Ω	400 Ω	700 Ω	2,800 Ω
Coil inductance (H) (ref. value)	Armature OFF	0.055	0.083	0.165	0.228
	Armature ON	0.092	0.129	0.303	0.504
Must operate voltage	80% max. of rated voltage				
Must release voltage	10% min. of rated voltage				
Max. voltage	140% of rated voltage at 23°C, 130% at 65°C				
Power consumption	Approx. 200 mW				

Note: 1. The rated current and coil resistance are measured at a coil temperature of 23°C with a tolerance of ±10%.
2. Operating characteristics are measured at a coil temperature of 23°C.

■ Contact Ratings

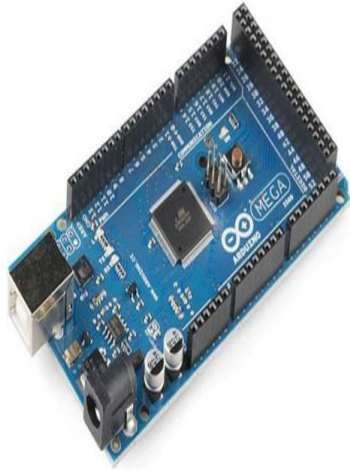
Item	Single crossbar		Bifurcated crossbar	
	Resistive load (cosφ = 1)	Inductive load (cosφ = 0.4; L/R = 7 ms)	Resistive load (cosφ = 1)	Inductive load (cosφ = 0.4; L/R = 7 ms)
Rated load	0.5 A at 110 VAC; 1 A at 24 VDC	0.2 A at 110 VAC; 0.3 A at 24 VDC	0.5 A at 110 VAC; 1 A at 24 VDC	0.2 A at 110 VAC; 0.3 A at 24 VDC
Contact material	AgPd (Au-clad)			
Rated carry current	2 A			
Max. switching voltage	125 VAC, 60 VDC			
Max. switching current	1 A			
Max. switching capacity	120 VA, 30 W	60 VA, 15 W	120 VA, 30 W	60 VA, 15 W
Min. permissible load	1 mA at 5 VDC		0.1 mA at 0.1 VDC	

■ Characteristics

Contact resistance	50 mΩ max.
Operate time	General-purpose type: 5 ms max. (mean value: approx. 2.5 ms) High-sensitivity type: 7 ms max. (mean value: approx. 3.5 ms)
Release time	3 ms max. (mean value: approx. 0.8 ms)
Bounce time	Operate: 0.8 ms max. (high-sensitivity type: approx. 0.6 ms) Release: 4.4 ms max. (high-sensitivity type: approx. 5.4 ms)
Max. operating frequency	Mechanical: 18,000 operations/hr Electrical: 1,800 operations/hr (under rated load)
Insulation resistance	100 MΩ min. (at 500 VDC)
Dielectric withstand voltage	500 VAC, 50/60 Hz for 1 min between coil and contacts 500 VAC, 50/60 Hz for 1 min between contacts of same polarity
Vibration resistance	Destruction: 10 to 55 Hz, 3.3-mm double amplitude Malfunction: 10 to 55 Hz, 3.3-mm double amplitude
Shock resistance	Destruction: 1,000 m/s ² (approx. 100G) Malfunction: 200 m/s ² (approx. 20G)
Life expectancy	Mechanical: 10,000,000 operations min. (at 18,000 operations/hr) Electrical: DC: 500,000 operations min. (1 A at 24 VDC resistive load) AC: 200,000 operations min. (0.5 A at 110 VAC resistive load) (at 1,800 operations/hr)
Ambient temperature	Operating: -25°C to 60°C (with no icing) (high-sensitivity type: -25°C to 65°C)
Ambient humidity	Operating: 35% to 85%
Weight	Approx. 3.7 g

Anexo 5: Características del Arduino Mega 2560.

LCA1010



ARDUINO MEGA 2560

Características:

El Arduino Mega 2560 es una placa electrónica basada en el Atmega2560

Cuenta con 54 entradas / salidas digitales pines (de los cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWM) y 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos de hardware de serie), un oscilador de cristal de 16 MHz, un puerto USB

de conexión, un conector de alimentación, una cabecera de ICSP, . y un botón de reinicio

Contiene todo lo necesario para apoyar a la micro, sólo tiene que conectarlo a un ordenador con un cable USB o el poder con un adaptador AC-DC o la batería para empezar. La Mega es compatible con la mayoría de los escudos diseñados para el Arduino Duemilanove o Diecimila

Especificaciones:

Microcontrolador: ATmega2560

Tensión de alimentación: 5V

Tensión de entrada recomendada: 7-12V

Límite de entrada: 6-20V

Pines digitales: 54 (14 con PWM)

Entradas analógicas: 16

Corriente máxima por pin: 40 mA

Corriente máxima para el pin 3.3V: 50 mA

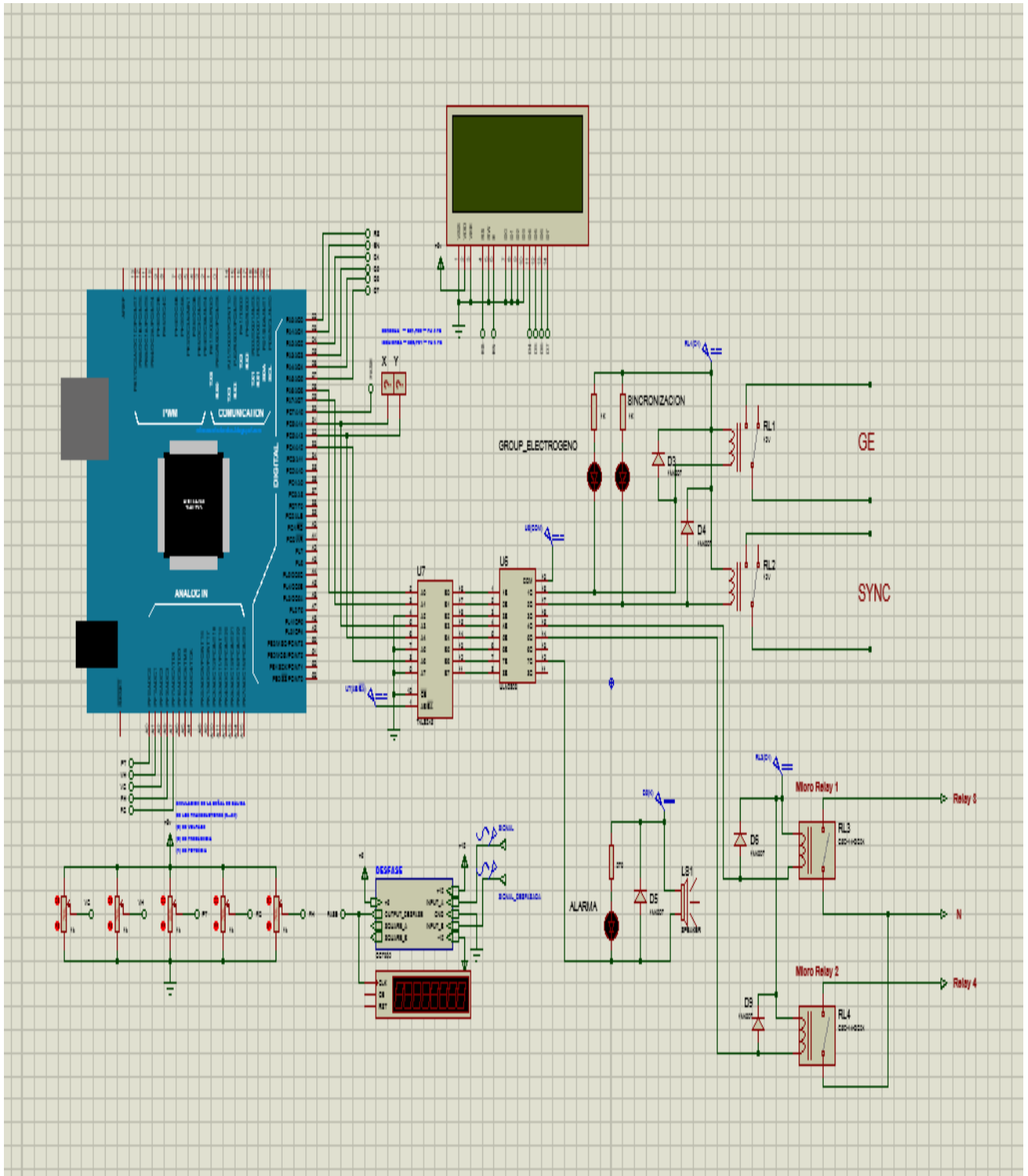
Memoria flash: 256 KB

SRAM: 8 KB

EEPROM: 4 KB

Velocidad de reloj: 16 MHz

Anexo 6: Circuito de simulación del Sistema de sincronización.



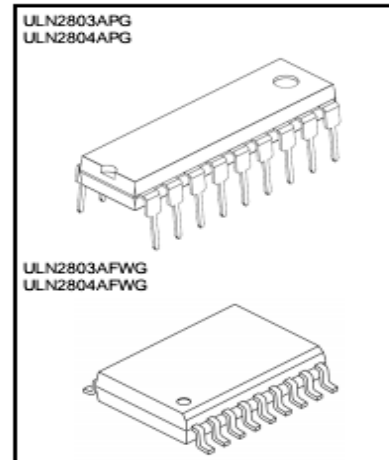
Anexo 7: Datasheet del ULN2803.

8ch Darlington Sink Driver

The ULN2803APG / AFWG Series are high-voltage, high-current darlington drivers comprised of eight NPN darlington pairs. All units feature integral clamp diodes for switching inductive loads. Applications include relay, hammer, lamp and display (LED) drivers.

Features

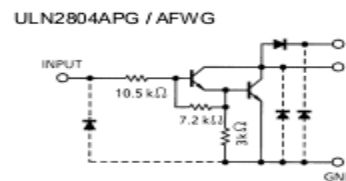
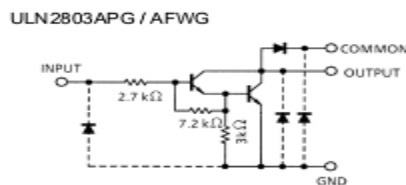
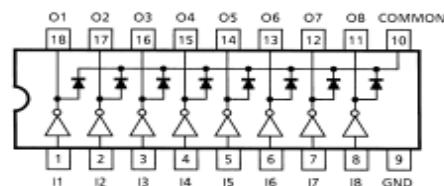
- Output current (single output)
500 mA (max)
- High sustaining voltage output
50 V (min)
- Output clamp diodes
- Inputs compatible with various types of logic.
- Package Type-APG : DIP-18pin
- Package Type-AFWG : SOP-18pin



Weight
P-DIP18-300-2.54-001: 1.478 g (Typ.)
P-SOP18-0812-1.27-001: 0.48 g (Typ.)

Type	Input Base Resistor	Designation
ULN2803APG / AFWG	2.7 kΩ	TTL, 5 V CMOS
ULN2804APG / AFWG	10.5 kΩ	6~15 V PMOS, CMOS

Pin Connection (top view)



Note: The input and output parasitic diodes cannot be used as clamp diodes.

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic	Symbol	Rating	Unit
Output sustaining voltage	$V_{CE(SUS)}$	-0.5 to 50	V
Output current	I_{OUT}	500	mA / ch
Input voltage	V_{IN}	-0.5 to 30	V
Clamp diode reverse voltage	V_R	50	V
Clamp diode forward current	I_F	500	mA
Power dissipation	PD	1.47	W
		0.92 / 1.31 (Note)	
Operating temperature	T_{OPR}	-40 to 85	°C
Storage temperature	T_{STG}	-55 to 150	°C

Note: On Glass Epoxy PCB (75 × 114 × 1.6 mm Cu 20%)