

# EXPERIENCIA DE ENDEV-HO/NI EN REGULACIÓN ELECTRÓNICA PARA MCH

José Abraham Blanco Morazán  
GIZ / ENDEV-HO  
(504) 3255-2135  
jose.blanco@giz.de

## INTRODUCCIÓN

El voltaje y la frecuencia eléctrica (120/240v, 60Hz) son los parámetros que definen la calidad de la energía eléctrica suministrada para consumo residencial. Dicha calidad en el servicio no debe ser una preocupación exclusiva de las áreas urbanas. En proyectos de electrificación rural, aislados o acoplados a la red eléctrica nacional, sin importar la fuente de energía, se debe contar con los mecanismos y equipos que regulen estos parámetros eléctricos.

Operar fuera de los rangos nominales de voltaje y frecuencia eléctrica produce alteraciones tanto de los aparatos que consumen la energía como en el equipo de generación. Estas alteraciones van desde funcionamiento inadecuado, reducción de la vida útil y, en el peor de los casos, daños permanentes que obligan a reemplazar aparatos y equipos.

La causa de las variaciones de tensión y frecuencia en un sistema de generación, es la variación de la carga que debe alimentar el generador. Conexiones de cargas tienden a desacelerar (frenar) el generador, causando una disminución del voltaje y la frecuencia. Por el contrario, desconexiones de carga tienden a acelerar (embalar) el generador, causando un incremento del voltaje y frecuencia.

La fabricación, venta y uso generalizado de aparatos eléctricos y electrónicos que hacen un uso más eficiente de la energía, pero requieren de un suministro eléctrico de calidad, ha sido también un factor que incrementa la necesidad de implementar los sistemas de regulación.

Para proyectos de micro centrales hidroeléctricas (MCH) existen dos métodos para la regulación de velocidad del generador: la regulación por carga y la regulación por caudal. La adopción de cualquier de estos métodos dependerá de la disponibilidad del recurso hídrico y del presupuesto disponible. En este trabajo nos centraremos en describir la experiencia en el uso de un Sistema de Regulador Electrónico de Carga, el cual puede fabricarse localmente.

La *Cooperación Alemana al Desarrollo* GIZ, a través del proyecto *Energías para el Desarrollo* EnDev cofinancia y brinda asistencia técnica a proyectos de MCH. El mejoramiento de estas MCH y la construcción de nuevos proyectos que sean cada más eficientes y sostenibles es uno de los retos de EnDev. Dicha sostenibilidad se logra formando capacidades humanas locales en distintos aspectos, por ejemplo, en el técnico.

En ese sentido, la implementación exitosa de los Sistemas de Regulación Electrónica fabricados localmente ha sido un reciente logro de EnDev tanto en Honduras como en Nicaragua; esto como resultado de la transferencia de conocimientos y esfuerzos realizados por GIZ, a través de EnDev-HO, EnDev-NI y la empresa APROTEC de Colombia.

En este trabajo, abordaremos aspectos técnicos del Sistema de Regulación Electrónica de Carga, y describiremos las etapas del proceso que conllevó a la implementación exitosa de estos sistemas en algunos proyectos pilotos de EnDev en Honduras y Nicaragua.

## **SISTEMAS DE REGULACIÓN DE FRECUENCIA PARA MCH**

Cuando no existe regulación de la velocidad de giro del generador eléctrico, cualquier variación en la demanda de energía producirá, simultáneamente, un cambio en dicha velocidad. Entonces, el eje del generador rotará a una velocidad diferente de la nominal, provocando un cambio en la frecuencia y voltaje generado. Estas variaciones de los parámetros eléctricos son perjudiciales tanto para el equipo de generación como para los aparatos que se sirven de éste.

La frecuencia eléctrica está directamente asociada a la velocidad de rotación del eje del generador síncrono; y a su vez, la tensión, es también función de la frecuencia. Esta relación mutua es tal que si regulásemos cualquiera de estos tres parámetros a su valor nominal, automáticamente habremos logrado regular los otros dos parámetros a sus valores nominales.

La variable más confiable como referencia para realizar la regulación es la frecuencia eléctrica, debido a que la medición de la velocidad de rotación o la tensión, pueden generar lecturas erróneas en determinadas circunstancias. Entonces, se acostumbra a medir y regular la frecuencia eléctrica, para lograr una velocidad de rotación estable en el generador.

Existen dos métodos para la regulación de velocidad (frecuencia) del conjunto turbina-generador: la regulación por caudal turbinado y la regulación por carga.

### **Regulación de frecuencia por caudal turbinado**

Este tipo de regulación consiste en turbinar exactamente el caudal de agua necesario para satisfacer la demanda de energía en determinado momento. Si se produjera un aumento o disminución en la demanda de potencia eléctrica, una válvula debe abrirse o cerrarse, respectivamente, y proporcionar el caudal necesario para generar la potencia eléctrica exigida con sus parámetros nominales de voltaje y frecuencia.

Este tipo de regulación puede realizarse de dos maneras: manual y automáticamente.

La regulación manual se utiliza principalmente en MCH de baja potencia, donde se presume que no existirán grandes fluctuaciones en la demanda y el costo del proyecto es relativamente bajo. Este método requiere de un operador que vigile y regule constantemente la turbina en sus válvulas, inyectores o álabes directores, según sea el tipo de turbina. Con la regulación manual es muy difícil garantizar que la frecuencia y el voltaje se mantengan constantes.

La regulación automática utiliza sistemas complejos oleo-mecánicos, oleo-hidráulicos y electromecánicos con servo motores y electro válvulas. Por su elevado costo, estos sistemas resultan accesibles sólo para MCH con una producción significativa de potencia.

Ventajas:

- Ahorro de agua. Sólo se turbinan el caudal necesario para satisfacer la demanda.
- Fácil operación y mantenimiento.

Desventajas:

- Costo elevado.
- Velocidad lenta de respuesta ante las variaciones de carga.

## Regulación de frecuencia por carga

Este método de regulación consiste en lograr que el generador siempre entregue una cantidad constante de potencia, con ello se asegura que no existirán variaciones en la velocidad del generador, ni variaciones en el voltaje y la frecuencia eléctrica.

Para lograr lo anterior, el equipo de generación deberá producir una potencia un tanto mayor que la potencia total que pueda demandar la comunidad. Entonces, el total de la energía generada se administra adecuadamente entre la comunidad y un banco disipador de potencia. Es decir, para un instante determinado, toda la energía no consumida por la comunidad es disipada en forma de calor por medio de un conjunto resistencias calentadoras de agua o aire. Podemos expresar el enunciado anterior mediante la ecuación (1):

$$P_G = P_C + P_D \quad (1)$$

Donde;  $P_G$ : potencia generada,  $P_C$ : potencia consumida,  $P_D$ : potencia disipada.  
En esta ecuación,  $P_G$  es una constante y  $P_C$ ,  $P_D$  son variables.

La potencia disipada puede aprovecharse con un uso productivo, en vez de simplemente desecharla en forma de calor. Para el caso, esta potencia puede usarse para iluminación pública, carga de baterías, bombeo de agua, etc., en horas de poco consumo de la comunidad.

Dado que la potencia del generador es constante y la potencia consumida varía según los hábitos de consumo de los usuarios de la comunidad, solo nos resta poder manipular a conveniencia la potencia disipada, de tal manera que se cumpla la ecuación (1). Para ello, se utilizan “válvulas” electrónicas, denominadas SCR (Rectificador Controlado de Silicio) controladas por un circuito electrónico, de tal manera que los SCR derivarán, al banco de disipación, la potencia necesaria para que se cumpla la ecuación (1).

Ventajas:

- Bajo costo
- Rápida velocidad en la respuesta a los cambios de carga.
- Ausencia de partes móviles
- Fácil operación y mantenimiento.

Desventaja:

- Desperdicio de agua. Se genera más potencia que la demandada, esto implica mayor gasto de caudal. La MCH debe contar con una presa que almacene suficiente agua para compensar el gasto.

Los sistemas reguladores de carga son los más utilizados para la regulación de frecuencia en MCH, debido a todas las ventajas que presenta en contraposición de la regulación por caudal.

A continuación presentaremos el Sistema Regulador Electrónico de Carga implementado en Honduras y Nicaragua, como resultado de la transferencia de conocimientos de la empresa APROTEC hacia EnDev-HO y EnDev-NI.

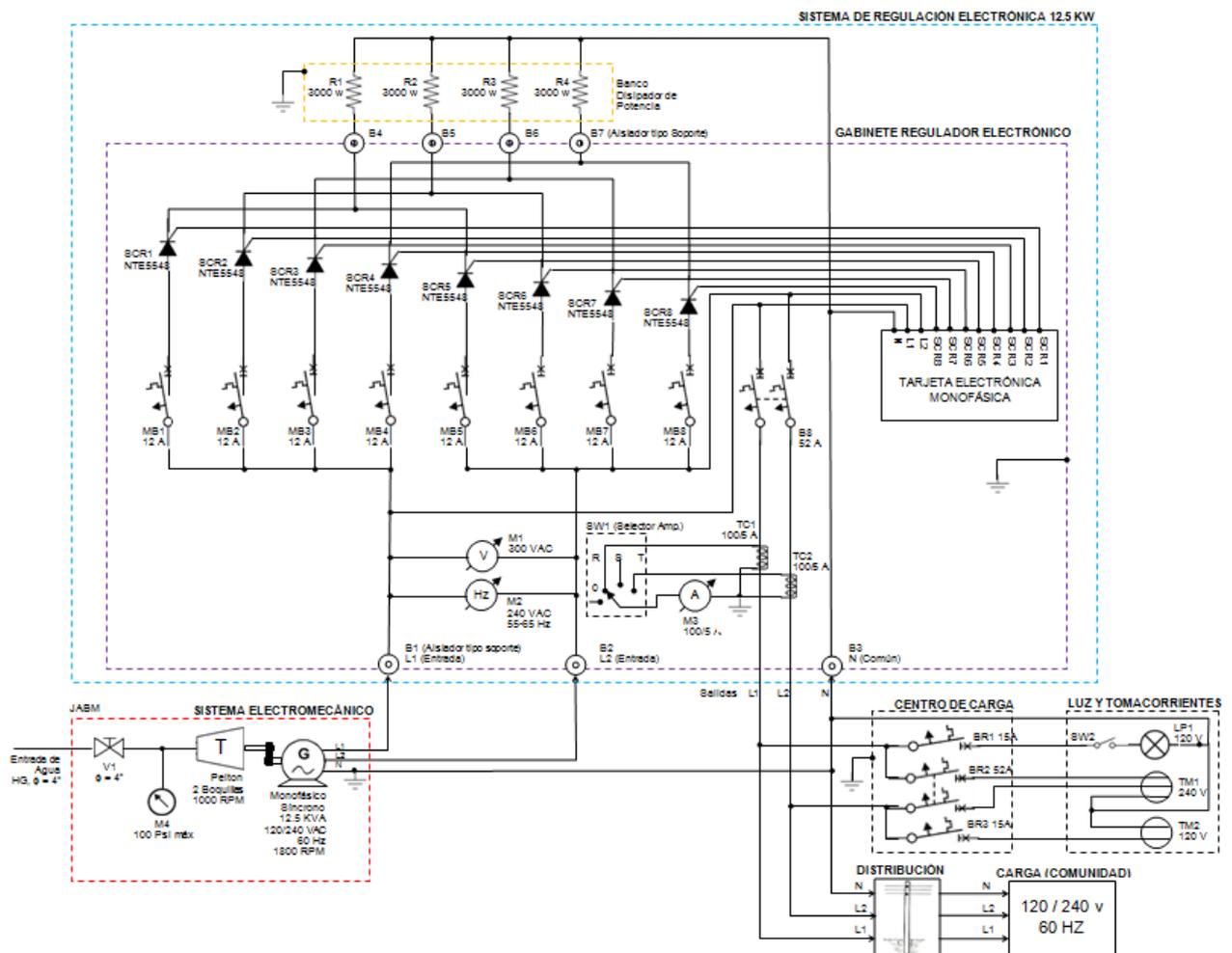
## SISTEMA REGULADOR ELECTRÓNICO DE CARGA

Los sistemas de regulación automática de frecuencia que está implementando EnDev-HO y EnDev-NI en proyectos de MCH son del tipo electrónico por regulación de carga. La aplicación de estos sistemas en Honduras y Nicaragua no es un tema nuevo, ya que es posible importarlos; no obstante, la posibilidad de poder fabricar localmente estos sistemas sí representan una reciente innovación en ambos países.

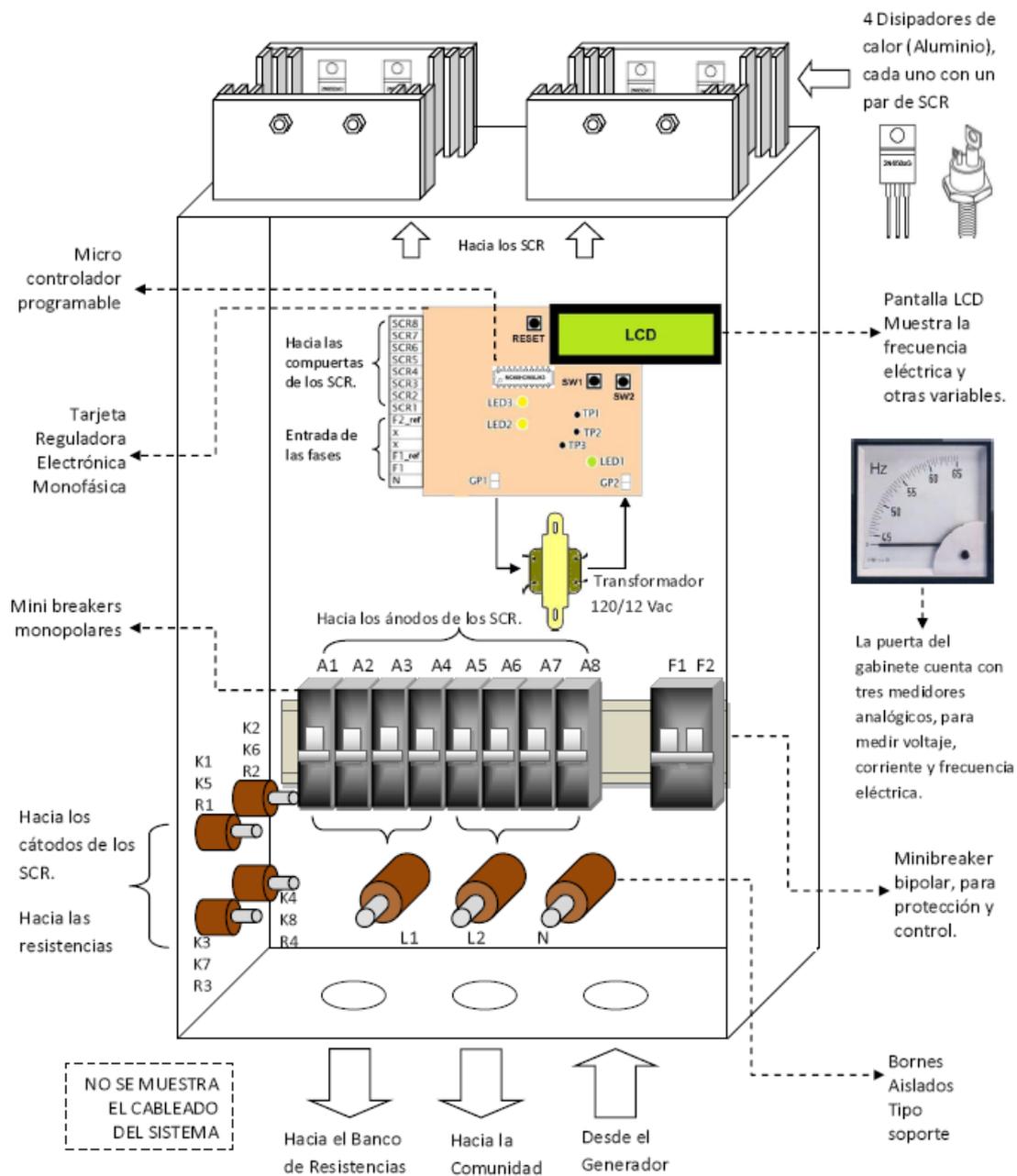
La *figura 1* muestra el diagrama eléctrico esquemático de una pequeña MCH que incorpora un Sistema de Regulación Electrónico. Para simplificar el diagrama, se representan algunos circuitos como bloques. Se observará que dicho sistema consta de un gabinete y un banco disipador de potencia.

El gabinete es un recinto metálico que contiene y protege de la intemperie a la tarjeta electrónica, instrumentos de medición, dispositivos de protección eléctrica, cableado, etc., también proporciona soporte mecánico a los componentes. En la *figura 2* se ilustra, mediante un diagrama pictórico, los elementos que conforman el gabinete.

Por su parte, el banco disipador consiste en un barril metálico con resistencias sumergibles en agua; en otro apartado se describirá su funcionamiento.



**Figura 1.** Diagrama esquemático de una pequeña MCH con Sistema Regulador Electrónico de Carga



**Figura 2.** Diagrama pictórico con los elementos del gabinete regulador electrónico

### Tarjeta Electrónica Reguladora de Frecuencia

Ésta tiene la función de monitorear permanentemente la frecuencia eléctrica del generador y un micro controlador, programado con el algoritmo que compara la frecuencia de referencia (60 Hz) con la frecuencia actual, envía la señal de disparo hacia los SCR para que éstos deriven la potencia necesaria al banco disipador. Aquí se utiliza el control de ángulo de conducción de la onda de voltaje para lograr la disipación de potencia requerida.

En la *figura 3* se muestra el diagrama esquemático de una tarjeta electrónica tipo monofásica. El micro controlador utilizado es el MC68HC908JK3 de *Freescale*, cuyas características son: procesador 8 bits, 4096 bytes flash, 128 bytes RAM, reloj 20MHz máx., 15 puertos I/O, +5V alimentación, bajo consumo de potencia, bajo costo económico.

La pantalla LCD es del tipo genérica 2x16 caracteres, en ella se muestran, en tiempo real, el valor de algunas variables importantes del sistema, como ser frecuencia eléctrica, porcentaje de potencia disipado y disparo de los SCR.

La tarjeta electrónica no requiere de alimentación independiente, toma su energía directamente del generador. Para la lectura de frecuencia y el control de disparo incorpora componentes optoelectrónicos: el fototransistor y le fototriac.

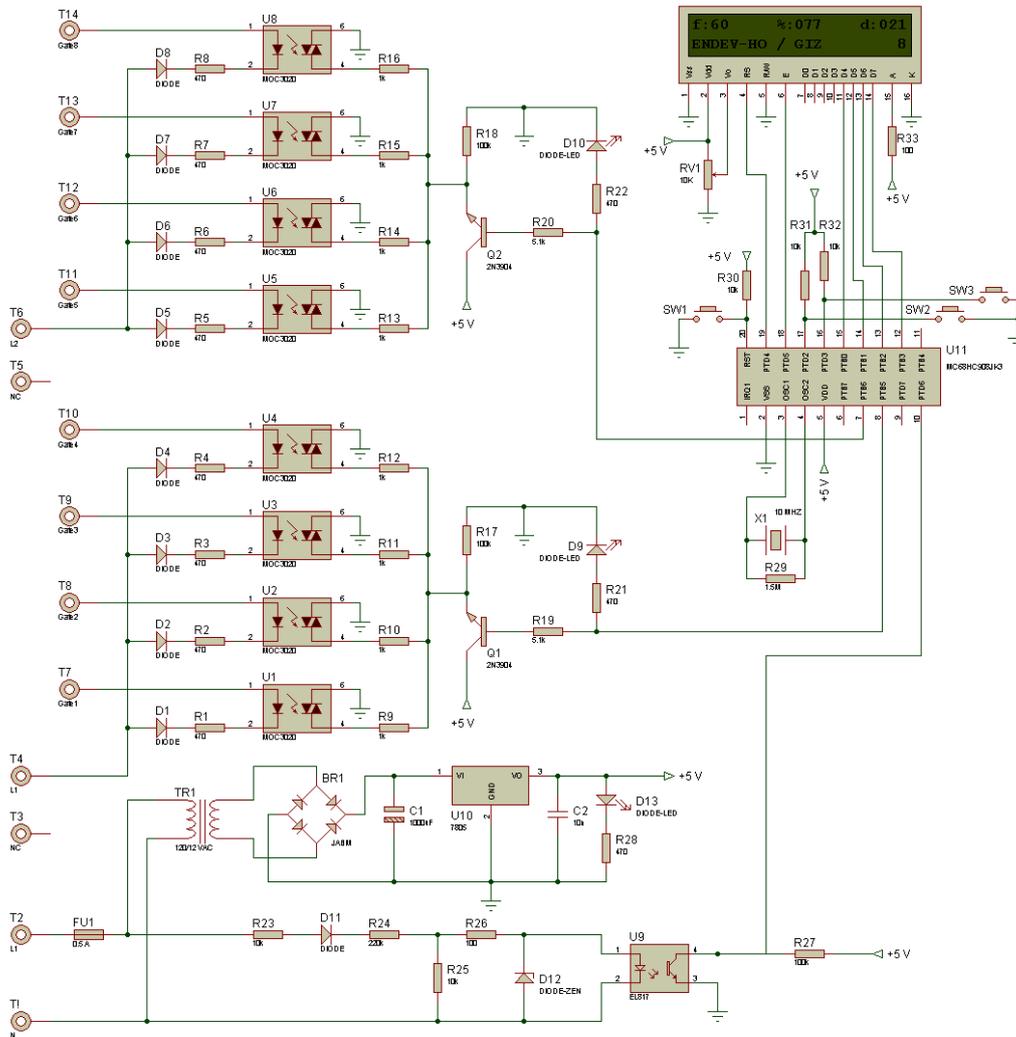


Figura 3. Diagrama esquemático la tarjeta electrónica monofásica.

### Algoritmo y Circuito Programador del micro controlador

El algoritmo está escrito en lenguaje de programación “C”, mediante un conjunto de variables, librerías, sentencias y funciones encaminadas a realizar, entre otros procesos, el indicado en la figura 4. Para la edición y compilación del programa en PC se utilizó el software de la empresa fabricante del micro controlador, denominado “CodeWarrior”.

Se requiere de un dispositivo para transferir el programa compilado en la PC hacia el micro controlador. Este componente puede comprarse (importado), e incluso fabricarse localmente. La figura 5 muestra el diagrama esquemático de un programador para micro controladores de la familia JK1/JK3. (Schiraldi, C. Programador JK1/JK3. 2004. schi@softhome.net)

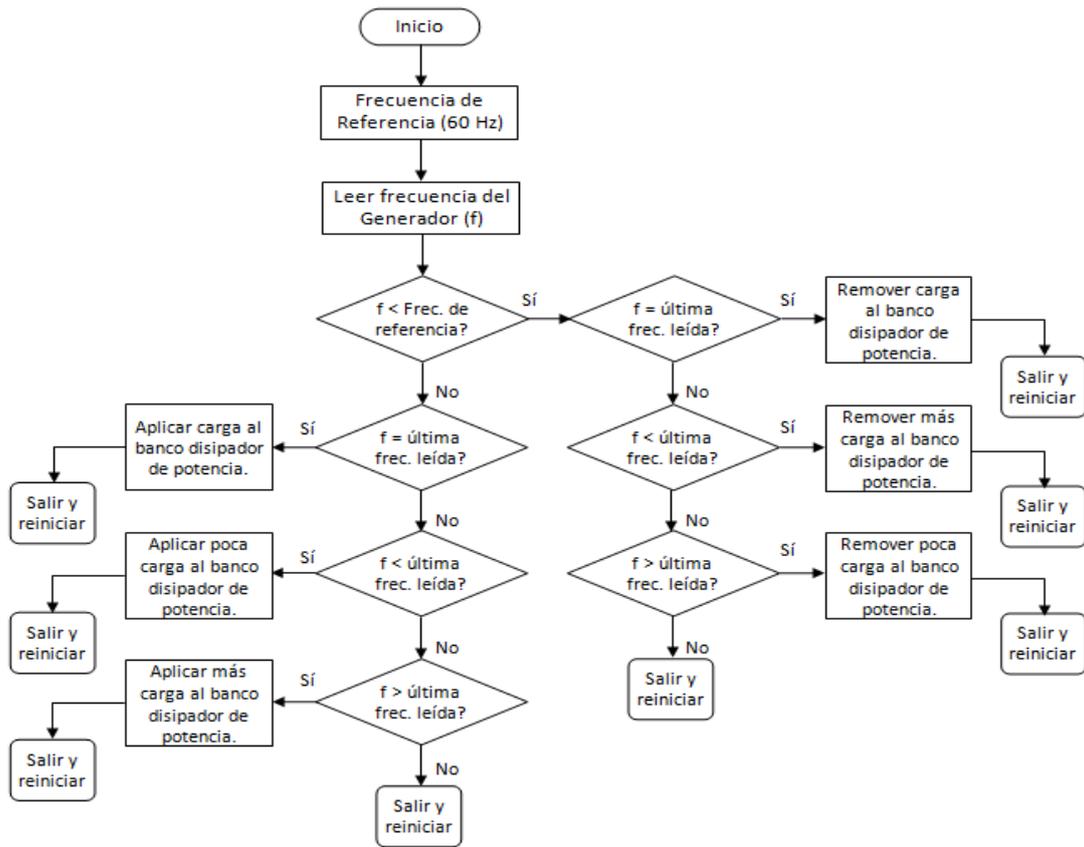


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de regulación de frecuencia.

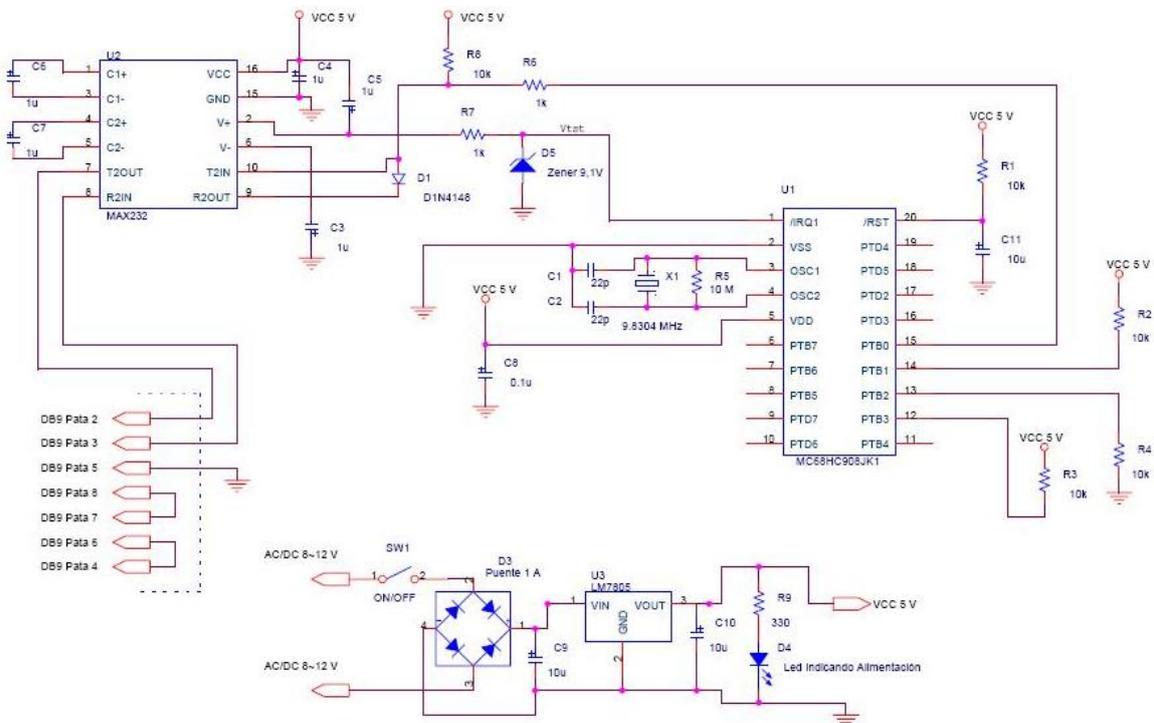
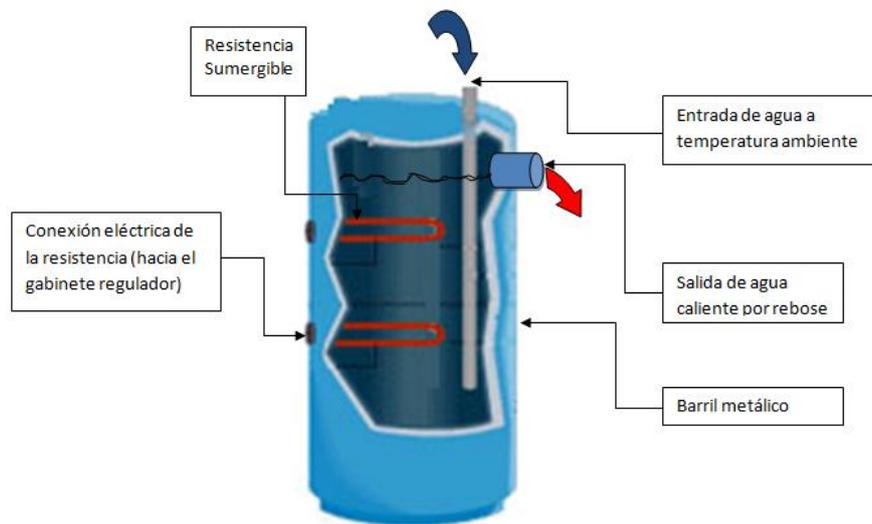


Figura 5. Diagrama esquemático del circuito programador

## Banco disipador de potencia

Para la disipación de potencia podemos utilizar dos tipos de resistencias, según el fluido donde disiparán el calor: resistencias para aire o resistencias para agua. En Honduras y Nicaragua resulta difícil encontrar en el comercio resistencias para aire, por lo cual se opta por utilizar resistencias para agua, esto además presenta la ventaja de ser económico y de fácil adquisición en el mercado.

El banco disipador de potencia utilizado en los sistemas de EnDev-HO consta de un barril metálico y un conjunto de resistencias sumergibles en agua (*figura 6*). El diseño del mismo es simple, y se basa en mantener un flujo permanente de agua dentro del barril que contiene las resistencias calefactoras; es decir, siempre existirá un caudal de agua a temperatura ambiente entrando al barril metálico y un caudal equivalente saliendo a mayor temperatura.



**Figura 6.** Esquema de funcionamiento del banco disipador de potencia.

## PROCESO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE REGULACIÓN ELECTRÓNICA DE CARGA EN MCH COFINANCIADAS POR ENDEV- HO/NI

Para implementar satisfactoriamente la regulación electrónica en algunos proyectos piloto de EnDev en Honduras y Nicaragua se cursaron las etapas que se describen en los siguientes apartados.

### Capacitación

Para formar el recurso humano local en el tema de regulación, EnDev-HO/NI financió la capacitación de profesionales técnicos e ingenieros en el “Curso de Transferencia de Tecnología en Regulación Electrónica para MCH” impartido por la empresa APROTEC de Colombia, en febrero de 2011. El instructor de la capacitación fue en Ing. Miguel Borbón, con el cual se ha mantenido la comunicación y recibido asesoramiento durante todo el proceso de implementación de esta tecnología.

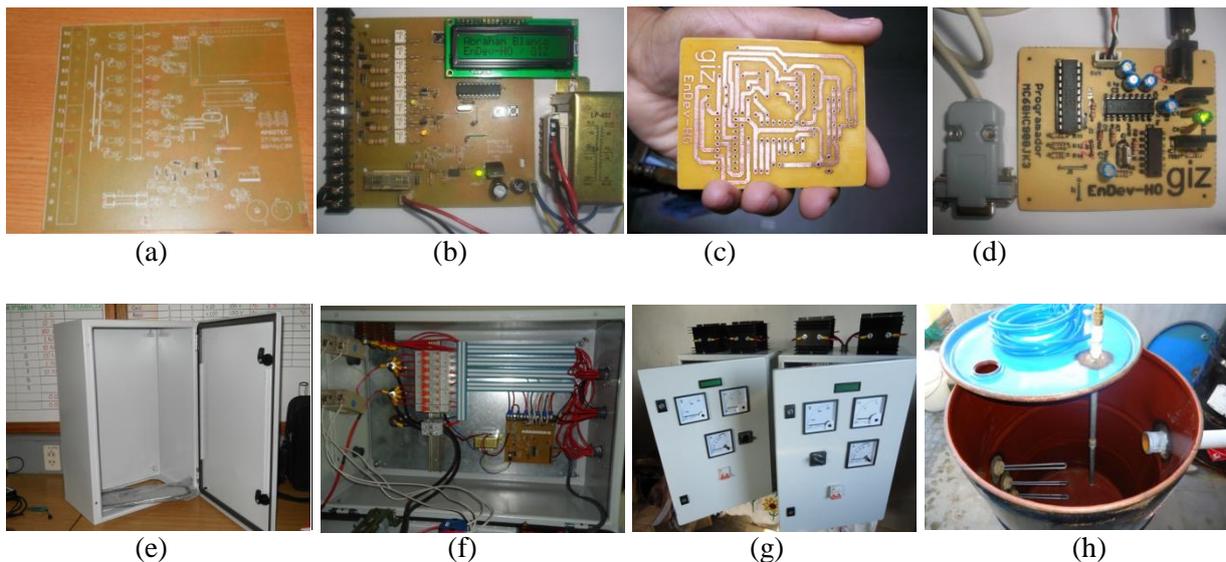
## Investigación de Mercado

Antes de fabricar los sistemas de regulación electrónica se debe investigar, en el mercado nacional e internacional, el costo y disponibilidad de todos los componentes. Como primer resultado de esta investigación obtendremos el presupuesto estimado para la fabricación del sistema; como segundo punto, conoceremos qué elementos son caros o difíciles de encontrar, permitiéndonos analizar la posibilidad de utilizar sustitutos.

En Centroamérica, son escasas las empresas dedicadas a la venta de componentes semiconductores electrónicos, esto obliga a importar algunos de estos componentes. El costo aproximado de cada sistema completo de regulación, que ha implementado EnDev-HO es de USD 1,500. (No incluye costos de instalación)

## Fabricación del Sistema de Regulación

Elaborar un sistema de regulación electrónica implica fabricar un conjunto sub sistemas: la tarjeta electrónica (*figura 7a y 7b*), el circuito para programar el micro controlador (*figura 7c y 7d*), el gabinete regulador electrónico (*figura 7e, 7f y 7g*) y el banco de disipación de potencia (*figura 8f*). Se emplean herramientas, materiales y equipo eléctrico/electrónico y software para el proceso de diseño de fabricación de los subsistemas antes mencionados.



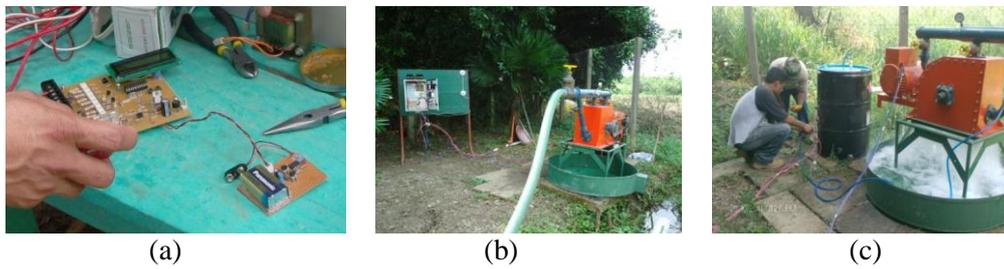
**Figura 7.** a), b) Tarjeta electrónica. c), d) Circuito programador.  
e), f), g) Gabinete regulador. h) Banco disipador de potencia.

## Pruebas de Laboratorio

Las pruebas de laboratorio son necesarias para asegurar que el sistema funcionará correctamente al momento de instalarlo en una MCH.

Se puede simular el comportamiento del sistema en la comodidad de un taller o laboratorio, mediante un pequeño circuito electrónico generador de señales (*figura 8a*) que “engañará” a la tarjeta electrónica inyectando una señal con la frecuencia eléctrica que deseemos. Un bombillo incandescente realizará la función del banco de disipación. Para una frecuencia seleccionada (mayor, menor o igual a 60 Hz), el sistema de regulación reaccionará, el brillo del bombillo representará cuanta energía se disipa.

También se realizaron ensayos más realistas del funcionamiento completo del sistema en el banco de pruebas de la FHIA (Fundación Hondureña de Investigación Agrícola), allí contábamos con una bomba de agua, turbina y generador (*figura 8b y 8c*).

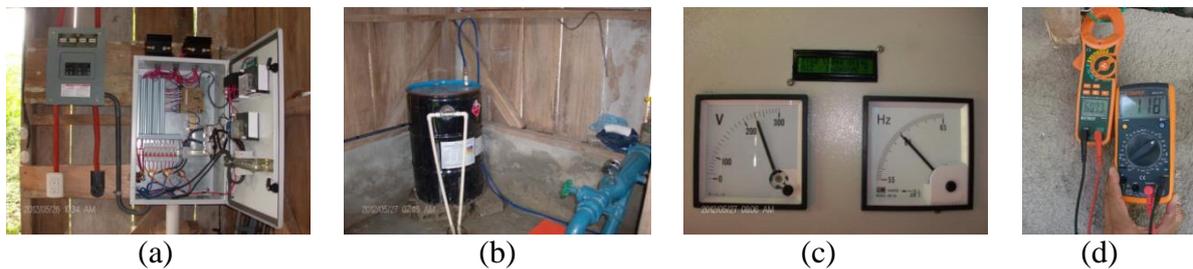


**Figura 8.** a) Pruebas con circuito generador de frecuencias.  
b), c) Pruebas con generador eléctrico, turbina y bomba de agua.

Con ambos métodos de prueba se logró encontrar algunos problemas, en especial del programa instalado en el micro controlador, los cuales fueron corregidos oportunamente.

### Instalación y monitoreo del sistema

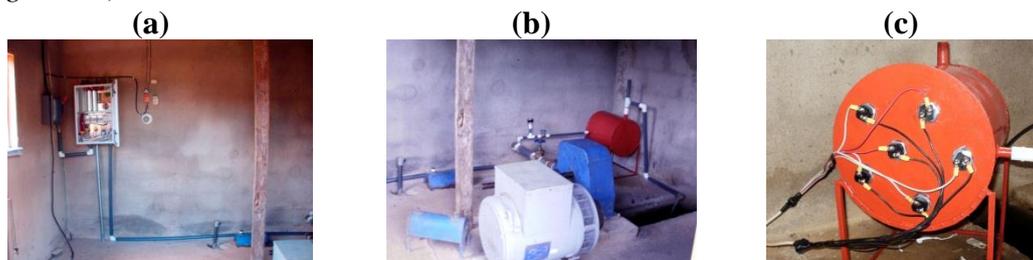
Una vez superado el proceso de pruebas, se procede a la instalación del sistema de regulación en la MCH. En la *figura 9* se muestra primer sistema de regulación electrónico instalado con éxito por EnDev-HO en una MCH potencia con de 12.5 KW ubicada en el litoral atlántico hondureño.



**Figura 9.** a) Gabinete de regulación instalado. b) Banco disipador de potencia instalado. c) Sistema en Funcionamiento d) Medición residencial del servicio eléctrico.

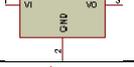
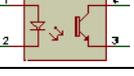
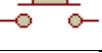
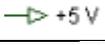
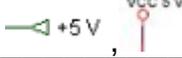
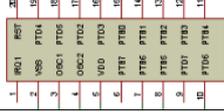
### Intercambio de Experiencias

Con base en las experiencias y resultados positivos en Honduras, EnDev-HO brindó apoyo técnico a colegas nicaragüenses, para la implementación de un sistema de regulación en ese país (*figura 10*).



**Figura 10.** a), b) Regulador electrónico instalado en una MCH de Nicaragua  
c) Banco disipador de potencia del sistema

## LISTA DE SÍMBOLOS USADOS

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
	Conexión a tierra		Puente de diodos
	Resistencia eléctrica		Diodo LED
	SCR (Rectificador controlado de silicio)		Diodo Zéner
	Breaker monopolar		Transformador
	Breaker bipolar		Fusible
	Voltímetro		Capacitor electrolítico
	Frecuencímetro		Capacitor cerámico
	Amperímetro		Regulador de voltaje
	Transformador de corriente		Transistor
	Selector de amperímetro		Fototransistor
	Turbina		Fototriac
	Válvula		Oscilador de cristal
	Manómetro		Resistencia variable
	Generador eléctrico		Microswitch
	Lámpara		Salida de voltaje
	Interruptor		Entrada de voltaje
	Tomacorriente		Circuito integrado
	Diodo		Pantalla LCD

## CONCLUSIONES

- Los sistemas de regulación automática de frecuencia deben ser un equipo indispensable en toda MCH. Aunque la inversión inicial en un sistema sistemas de estos parezca elevada (USD 1,500 para 15KVA), esto se compensa con la seguridad de contar con un equipo que ayudará a proteger todos los aparatos y equipos eléctricos/electrónicos del proyecto.
- En lo posible, y sin desmejorar la calidad del sistema de regulación, se recomienda utilizar productos existentes en el mercado local para su fabricación, esto reducirá costos y facilitará futuras reparaciones.
- El diseño y fabricación de sistemas de regulación de frecuencia, realizado por recurso humano local, mejora la sostenibilidad técnica de los proyectos, ya que asegura la disponibilidad de personal técnico capaz de instalar y dar mantenimiento a los mismos.
- En una comunidad con MCH donde se realiza el cambio de regulación manual a regulación automática, sus habitantes reportan la desaparición de las fluctuaciones del suministro eléctrico, un aumento en la vida útil de sus aparatos eléctricos/electrónicos, y reducción considerable de la intervención humana en casa de máquinas.
- El intercambio de experiencias y transferencia de tecnologías entre organismos, instituciones, empresas y personas, nacionales y extranjeras, involucradas con la generación de micro hidroenergía fortalece el desarrollo, eficiencia y sostenibilidad de este tipo de proyectos.