

SISTEMA PROTOTIPO DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE (SGEH)

INTRODUCCIÓN

El laboratorio de microcentrales hidroeléctricas modular y didáctico de Univalle, al cual llamamos *Sistema de Generación de Energía Hidroeléctrica* (SGEH), hace posible verificar el comportamiento de diversas variables involucradas en el proceso de conversión de energía. El SGEH es un sistema compuesto por diferentes equipos electromecánicos e hidráulicos tales como motores, bombas y turbinas hidráulicas (Figura 3.1), además de contar con equipos de medición y actuación que permiten medir variables del proceso tales como nivel, presión, caudal, entre otras variables físicas utilizando señales empleadas ampliamente a nivel industrial como señales de corriente 4-20 mA, voltaje -10/+10 VDC junto con elementos de instrumentación que emplean comunicación digital como los transmisores inteligentes con posibilidades de comunicación por medio del protocolo Hart y medidores con capacidad de comunicación usando el protocolo Modbus.

La Figura 3.2 muestra el diagrama del SGEH al cual se le adaptó un sistema automático de control. El principal recurso del proceso es el agua, que es almacenada en el tanque principal con una capacidad de almacenamiento de 2.000 litros, desde donde es impulsada por una bomba centrífuga de alta eficiencia de 1100 lpm movida por un motor trifásico de 25 H.P, con ello se simula la energía potencial del recurso. El agua es llevada a través de una tubería de presión de 3 pulgadas de diámetro hasta uno de los equipos hidráulicos de los que se dispone en el laboratorio como lo son una turbina Pelton y una bomba que opera como turbina. Como equipo de generación se tiene un motor asíncrono de 4 polos operando en régimen de generación acoplado a la turbina por medio de poleas y una correa de transmisión.

El flujo de agua hacia a la turbina puede ser variado por medio de la válvula de control VI instalada sobre una tubería de derivación de 2 pulgadas de diámetro. El posicionamiento de la válvula de control se realiza a través de una señal de corriente 4-20 mA, permitiendo regular la velocidad a la que gira el grupo turbina-generator antes de realizar la conexión a la red y regular la potencia generada después de hacer la conexión a la red eléctrica.

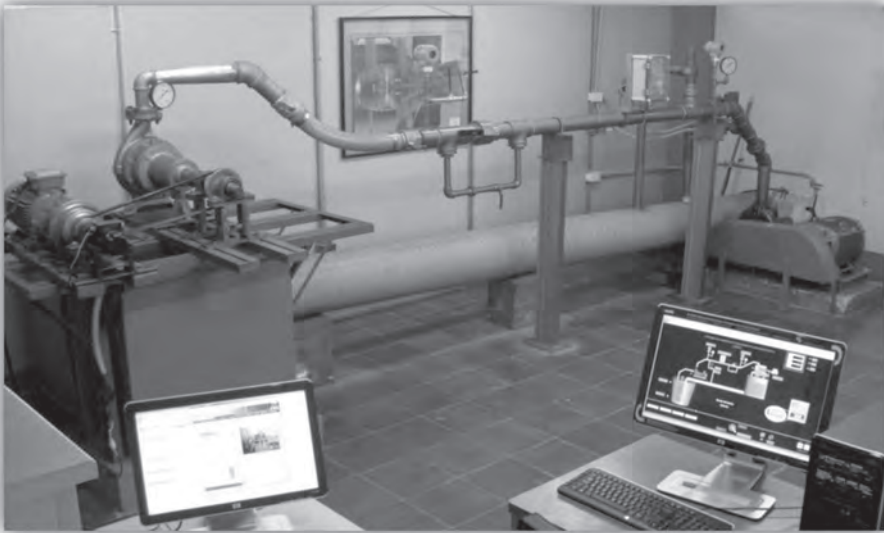


Figura 3.1 Vista general del laboratorio

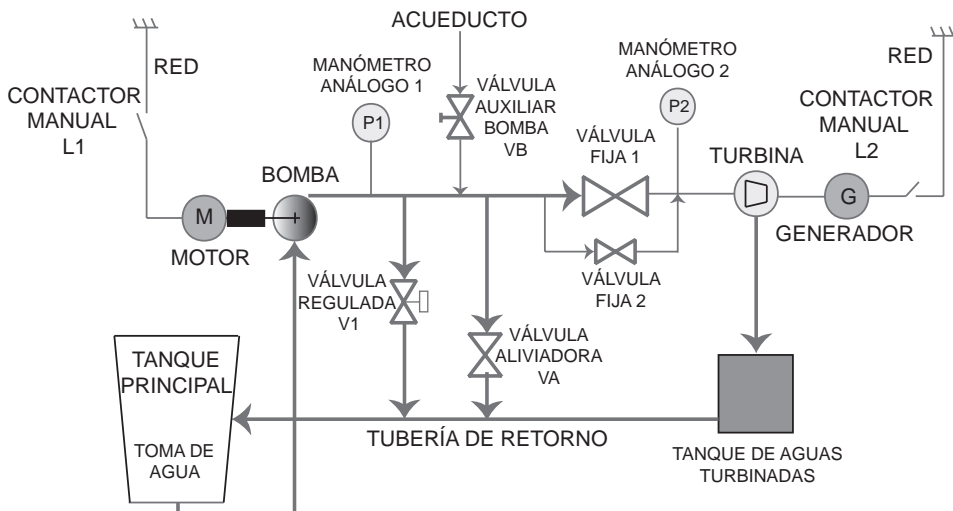


Figura 3.2 Diagrama del Sistema de Generación de Energía Hidroeléctrica

El agua utilizada para mover el grupo turbina-generator se deposita en el tanque para aguas turbinadas y va de regreso al tanque principal por medio de una tubería de retorno de 12 pulgadas de diámetro conformando así un circuito cerrado del agua utilizada durante el proceso. Adicionalmente sobre la tubería de presión se encuentra instalada una válvula auxiliar de alivio VA ajustada para abrirse al detectar una presión superior a 70 PSI, enviando el caudal de sobrepresión a la tubería de retorno y luego hacia el tanque principal. La válvula fija 1 con su respectivo bypass (Válvula fija 2) son válvulas manuales y por conveniencia se dejan completamente abiertas durante el funcionamiento del sistema. El grupo bomba-motor que suministran la energía potencial al agua da como resultado un caudal proporcional a 1000 lpm y una caída aproximada de 40 metros. En las Tablas 3.1 y 3.2 se registran las características de los equipos mencionados.

Tabla 3.1 Datos bomba (B)

UNIDAD	Valor
Potencia (hp)	15
Velocidad (rpm)	3.600
Altura (m)	40
Presión (psi)	75
Eficiencia (%)	68
Caudal (lpm)	1.100

Tabla 3.2 Datos motor (M)

UNIDAD	Valor
Potencia (hp)	25
Voltaje (V)	220 / 440
Factor de potencia	0.85
Velocidad (rpm)	1.800

El agua en la tubería se lleva a la turbina (turbina Pelton o bomba trabajando como turbina), la cual, por medio de un acople mecánico (poleas y banda), hace girar un motor asíncrono que trabaja en régimen de generador. Como el sistema cuenta con una serie de válvulas, con las que se puede variar el flujo de agua que llega a la turbina, se puede regular la potencia. El motor asíncrono no cuenta con variador de velocidad, por lo tanto la bomba gira a la velocidad del motor y no a su velocidad óptima. Los datos referentes a estos equipos se presentan en las Tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3 Datos de la bomba como turbina

Tipo	Velocidad (rpm)	Altura (m)	Eficiencia (%)	Caudal (lpm)
Centrífuga	1750	25	55	430

Tabla 3.4 Datos del motor asíncrono en régimen de generador

Marca	Siemens	
Potencia activa	7.5 H.P.	5.5 KW
Voltaje nominal	220 / 440 VOLT	
Corriente nominal	19.77 AMP	
Factor de potencia	0.73	
Velocidad	1780 R.P.M.	

MODOS DE OPERACIÓN

En general el sistema de control en una planta de energía hidroeléctrica provee una forma de seleccionar el modo de operación y un medio de arrancar y detener todo el sistema. La intervención del operario puede limitarse a oprimir un solo botón en un modo de operación totalmente automático o se puede requerir un alto grado de intervención del operario en una operación totalmente manual. Cualquiera que sea el grado de intervención del operario en el sistema el funcionamiento puede ser dividido en 4 etapas, como son:

- Chequeo de condiciones de arranque.
- Inicio de sistemas auxiliares.
- Arranque de la unidad y conexión.
- Parada de la unidad.

Los modos de operación de la central hidroeléctrica pueden ser manuales, automáticos o semi-automáticos. En el modo de operación automático ninguna acción manual es necesaria para realizar los chequeos antes del encendido. Cuando dichas condiciones antes de encendido se cumplen, el operador está habilitado para dar la orden de encendido de la unidad generadora, energizando los relés principales. El encendido de los sistemas auxiliares es verificado. La secuencia de correr la unidad generadora se inicia, la unidad acelera, velocidad y voltaje son igualados en el punto de sincronización y la unidad es conectada a la red. Si la unidad falla en alcanzar el 95% de la velocidad en cierto periodo de tiempo, se activa una alarma indicando que la secuencia de encendido ha fallado y está incompleta. Después de un encendido satisfactorio, el operador ajusta el valor de la potencia de salida y quizás ajuste el regulador de voltaje. Esto puede ser fijo o ser reprogramado para tener salidas de potencia diferente para una misma secuencia de encendido.

El modo de operación semi-automático requiere de comandos por parte del operador para realizar la transición de una fase a otra en el proceso de operación. El sistema realiza los chequeos antes del encendido al escoger

el modo de operación, deteniéndose una vez se cumple esto. La secuencia de encendido no continúa hasta que el operador proporcione la siguiente orden; una vez proporcionada se encienden los sistemas auxiliares y nuevamente se detiene a la espera de la orden para el inicio de funcionamiento de la unidad. Desde este punto el sistema es totalmente automático. Quizás sea necesaria otra orden por parte del operador antes de energizar los campos, excitar la máquina, sincronizarla y cerrar los contactores de la unidad para conectarla a la red. En este caso se adicionan temporizadores para chequear el progreso de la secuencia de encendido.

El apagado para ambos modos de operación es similar. La secuencia de apagado se inicia ya sea por orden del operador o por protección del sistema. En función del lugar desde el cual se realiza la acción de control ésta puede ser local cuando la acción de control se efectúa a pie de máquina por el operador del sistema o remoto cuando la acción de control se efectúa desde un punto distante.

Dadas las características del laboratorio y los equipos que lo conforman algunas de las etapas definidas en el STD 1010 no pueden ser implementadas en el SGEH. En este caso se han identificado las siguientes etapas en el funcionamiento del sistema SGEH:

- Chequeo de condiciones de arranque
- Arranque y conexión (Secuencia de arranque)
- Operación
- Desconexión (Secuencia de parada)

Chequeo de condiciones de arranque

En esta etapa se verifican las condiciones iniciales del estado de determinados equipos y señales, que se establecen como referente obligatorio para el inicio del funcionamiento del SGEH. En la Tabla 3.5 se aprecia el listado de los elementos o señales con su correspondiente condición inicial para el correcto arranque del sistema:

Tabla 3.5 Condiciones de arranque del SGEH

Condiciones de arranque	Estado
Nivel del tanque principal	Nivel máximo
Válvula de control V1	Abierta completamente
Válvula esférica fija 1	Abierta completamente
Motor 25 H.P.	Desconectado
Generador	Desconectado
Tensión de fases	Valores nominales
Estado instrumentos de medición	Operación normal
Velocidad grupo turbina-generador	Detenido (0 rpm)
Presión bomba	Normal (0 PSI)
Presión turbina	Normal (0 PSI)

Arranque y conexión

Una vez que todas las condiciones iniciales se han cumplido se procede al encendido de la motobomba centrífuga de alta eficiencia, la cual simula la energía potencial del agua con una capacidad de bombeo de hasta 1.100 lpm después de transcurrido el tiempo de cebado. Seguidamente, por medio de la válvula de control **V1** se regula la velocidad del grupo turbina-generator, hasta llevarlo a un valor menor a la velocidad sincrónica y se realiza entonces la conexión como motor a la red eléctrica cumpliéndose que:

$$n_{conex} < n_{sinc}$$

donde: n_{conex} es la velocidad de conexión al sistema eléctrico y n_{sinc} es la velocidad de sincronismo (1.800 rpm)

Realizar este tipo de conexión del sistema a la red evita llevar a cabo un procedimiento de sincronización. El proceso se resume en el diagrama de la Figura 3.3.

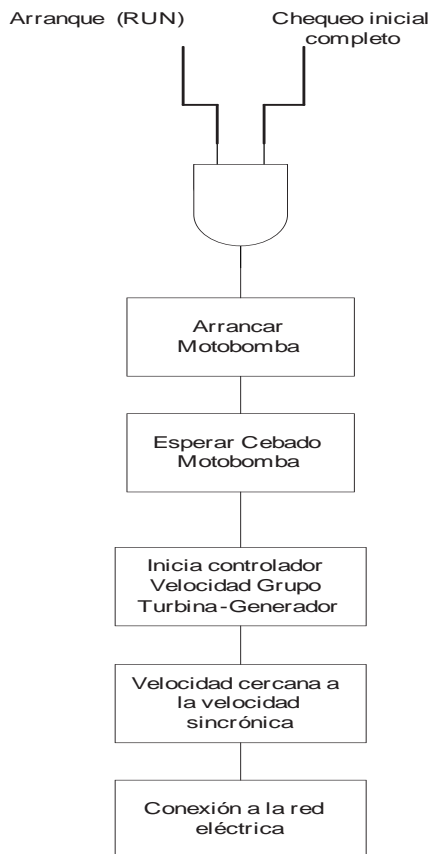


Figura 3.3 Diagrama de arranque y conexión a la red

Las acciones se resumen a continuación:

- Se cierra el contactor (L1) que energiza el sistema hidroenergético (motobomba).
- Se espera la detección de presión en la tubería (que se autocebe la bomba).
- Conexión del sistema a la red: después que los pasos anteriores se han dado, el sistema procede a cerrar la válvula de control V1 para regular la velocidad del grupo turbina generador, hasta alcanzar el 97% de la velocidad de sincronismo (1.750 rpm). La velocidad de sincronización para este sistema es de 1.800 rpm, porque el generador es de cuatro polos y en Colombia se trabaja a una frecuencia de 60 Hz.

En la conexión del SGEH a la red se debe tener en cuenta la protección de los elementos de medición, especialmente del medidor de corriente para evitar daños en éste, por el pico de corriente que se presenta cuando el motor de inducción se conecta al sistema eléctrico. Un ejemplo de cómo se realiza la conexión se muestra en la Figura 3.4.

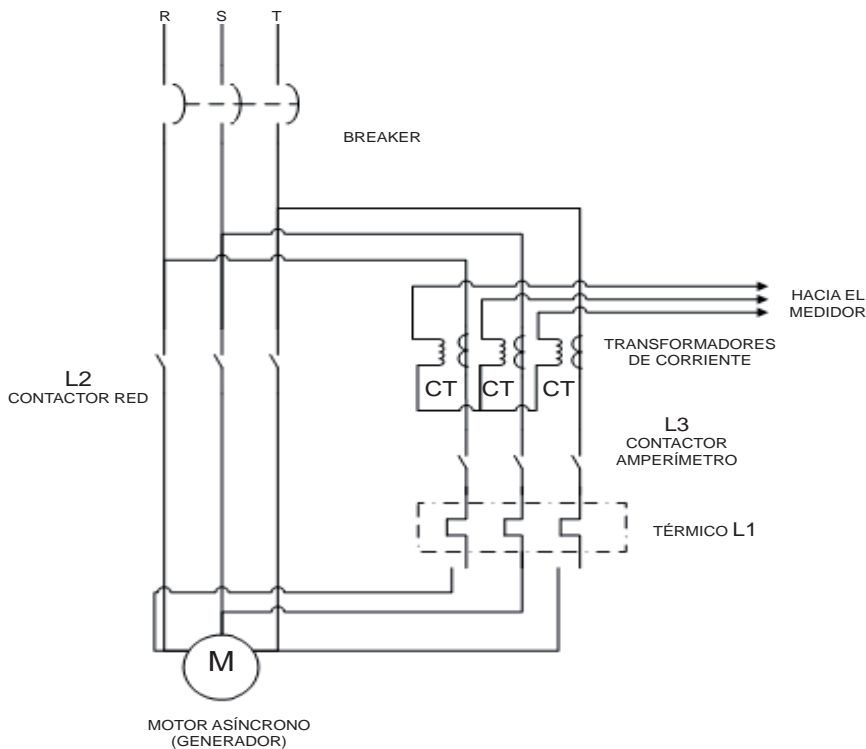


Figura 3.4. Conexión a la red eléctrica

En la conexión se realizan los siguientes pasos:

- Energizar el contactor L2
- Energizar el contactor L3
- Desenergizar el contactor L2

Funcionamiento de la unidad generadora (operación)

Con el sistema conectado a la red como motor se aumenta la velocidad de la turbina por medio de la válvula V1 de tal forma que la velocidad mecánica del motor de inducción sea mayor que la velocidad sincrónica, por lo que el par inducido en la máquina se invierte y ésta pasa a operar como generador, tal como se muestra en la Figura 3.5. Manteniendo la velocidad mecánica por encima de la velocidad sincrónica se realizan ajustes en la válvula de control V1 para alcanzar la potencia deseada y se verifican constantemente parámetros eléctricos tales como tensión, corriente, frecuencia y potencia.

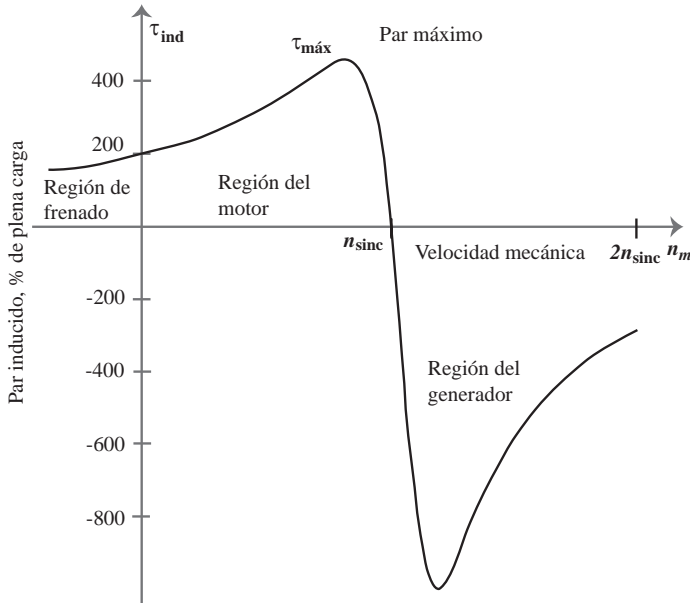


Figura 3.5 Curva característica par-velocidad de un motor de inducción-región [27]

Cuando se han alcanzado las condiciones antes expuestas se procede a realizar la conexión a la red de la siguiente forma:

- Se cierra el contactor L2, el cual conecta el sistema a la red; el generador trabaja en régimen de motor.
- Después que pasa el transitorio de corriente en el proceso de conexión, aproximadamente 2 segundos, se cierra el L3 para permitir que la variable de corriente pueda ser leída por el analizador de red,

y posteriormente L2 se abre (todo esto para proteger el instrumento de medida).

- Con las acciones anteriores se establece el voltaje y frecuencia de red; todo esto es posible porque el generador es asíncrono y permite entrar a la red como motor; seguidamente, controlando la válvula V1 se aumenta el flujo másico y en consecuencia la velocidad, pasando la unidad a régimen de generador.
- Para que el sistema tenga una respuesta de potencia solo se le debe dar un valor de referencia y lo que realiza la estrategia es:
 - Si la potencia deseada es superior a la generada, la válvula de control V1 se cierra para aumentar el flujo de agua que se va a turbinar.
 - Si la potencia deseada es menor a la generada en el momento, la válvula V1 se abre para que la turbina genere menor fuerza.

Apagado de la planta en forma normal (desconexión)

El sistema realiza el proceso inverso a la etapa de arranque, para esto inicialmente se abre gradualmente la válvula V1 disminuyendo de esta forma la velocidad del grupo turbina-generador hasta que el generador asíncrono se encuentre en régimen de motor, luego se abren los contactores del generador y finalmente se abre el contactor de la motobomba llevando todo el sistema a sus condiciones iniciales.

Para realizar esta acción se deben cumplir los siguientes pasos:

- La válvula V1 se abre hasta que la potencia generada sea la menor (cero watts).
- El contactor L2 se cierra para aislar al analizador de la red. Luego L3 se abre.
- L2 se abre, desconectando el generador de la red.
- La válvula de control se abre a su capacidad máxima para reducir a la velocidad mínima el grupo turbina-generador.
- Por último, el contacto L1 del motor de la motobomba se abre para que no haya más paso de caudal al sistema.

En la Figura 3.6 se muestra el diagrama que resume el proceso de desconexión del sistema.

INSTRUMENTACIÓN ASOCIADA AL PROCESO

El Sistema de Generación de Energía Hidroeléctrica que posee la Universidad del Valle consiste en un sistema no lineal con variables de entradas y salidas. Se identifican en el proceso diversas variables las cuales se agrupan como variables de tipo **hidráulico** como son el nivel en el tanque principal, el flujo y la presión en la tubería, variables de tipo **mecánico** como la velocidad del grupo turbina-generador y variables de tipo **eléctrico**

como la tensión, la corriente, potencia activa, potencia reactiva, factores de potencia, entre otras. Se cuenta entonces con una serie de equipos de medición que van desde sensores digitales, medidores que emplean señales analógicas de corriente o voltaje para dar una indicación del valor medido del proceso, hasta elementos que utilizan comunicación digital para la transmisión de la información mediante el manejo de protocolos de comunicación industriales.



Figura 3.6 Secuencia de control para parada del SGEH

A continuación se realiza una breve descripción de los equipos de medición asociados a cada una de las variables del proceso.

En el subsistema de circulación de agua tenemos el tanque principal, tanque para aguas turbinadas, tubería de presión, tubería de baja presión, con

los dispositivos asociados de la válvula tipo esférica (V2) con su respectivo bypass (V3), válvula de alivio o seguridad (Vs) y la válvula reguladora de caudal (V1).

Teniendo en cuenta los elementos que constituyen este subsistema se determinan las siguientes variables:

El caudal: Éste no sólo se va a medir sino también a controlar. Es producido por una motobomba que hace las veces de presa (aproximadamente una caída de 40 metros) y es controlado por una válvula motorizada ubicada en V1 y por un regulador de velocidad para la motobomba. La válvula nos proporciona una señal de control.

El nivel del embalse: En nuestro sistema es importante conocer este (nivel máximo y nivel mínimo) en el tanque principal para tener un arranque óptimo y seguro del sistema.

La presión en la tubería: Se requiere un constante monitoreo para poder conocer el comportamiento de las presiones en el funcionamiento del sistema, se necesita medir presión antes de la válvula de regulación V1 y a la entrada de la turbina o bomba como turbina, debido a que si se tiene alguna pérdida de presión o sobrepresión en algún punto del sistema, éste va a tener problemas presentando un posible deterioro de la planta y por esto es necesario que se realicen estas medidas a lo largo del proceso.

En el subsistema hidroenergético, formado por el grupo bomba motor que proporcionan la energía potencial al agua, la variable que podemos encontrar en este grupo es la velocidad del conjunto, que es controlada por un variador de velocidad, para que el grupo gire a diferentes velocidades y se realice control de caudal.

En el subsistema de generación encontramos el grupo turbina-generador (turbina Pelton o bomba trabajando como turbina y un motor asíncrono como generador). Teniendo en cuenta las características del grupo generador se pueden tener las señales relacionadas con el *funcionamiento mecánico* tales como velocidad en el eje del generador; esta señal proporciona la información necesaria para realizar la secuencia de sincronización del sistema a la red tanto en forma aislada como interconectada. Adicionalmente la fuerza en el eje (turbina o generador) proporciona la caracterización de los elementos en determinadas instancias de trabajo; se debe recordar que este sistema permite el estudio del comportamiento de los elementos en diferentes situaciones de trabajo.

Las otras variables se encuentran relacionadas con el *funcionamiento eléctrico* y tenemos las variables básicas de un sistema de generación tales como la frecuencia, voltajes, corrientes, potencia activa y reactiva y el factor de potencia. En la Tabla 3.6 se presenta un resumen de las variables expuestas.

Tabla 3.6 Variables y unidades básicas para la instrumentación del sistema

Variable	Unidad de medida
Nivel	Metros (m)
Caudal	Metros cúbicos / minuto (m ³ /min)
Presión	PSI
Velocidad	Revoluciones por minuto (rpm)
Torque	Newton-metro (N*m)
Frecuencia	Hertz (Hz)
Voltaje	Volt (V)
Corriente	Ampere (A)
Potencia Activa	Watts (W)
Potencia Reactiva	Vares (VAR)
Factor de Potencia	FP = 1,0

Instrumentación de campo

La instrumentación del laboratorio de pequeñas centrales hidroeléctricas permite medir, controlar y registrar las variables que intervienen en este proceso, con el fin de optimizar los recursos utilizados en él. El sistema de instrumentación electrónico usa dispositivos tanto analógicos como digitales y está basado en la técnica de microprocesadores, definido como instrumentación inteligente. Los transmisores de variables del proceso disponen de señales de S/E y están dotados de un indicador local. Las señales se integran en un equipo de tecnología digital PAC (“controladores de automatización programables”). Este instrumento de control (PAC) combina la robustez de un controlador lógico programable, con las funciones de un PC en una arquitectura de software accesible y flexible. Para la función anteriormente descrita en este proyecto, se decidió por el controlador SNAP PAC R1 OPTO 22 [28], el cual se observa en la Figura 3.7.

Teniendo en cuenta los siguientes criterios se hizo la selección de éste:

- La comunicación está basada en el estándar Ethernet la cual facilita el intercambio de información con otros sistemas en red, por medio del manejo de bases de datos (MySQL, Access y Server SQL).
- Este producto ofrece una hibridación del PC y del PLC.
- Los PAC combinan las mejores características de la PC, incluyendo el procesador, la RAM, y software potente, con la confiabilidad, dureza, y naturaleza distribuida del PLC.
- Los PAC combinan el empaque y dureza del PLC con la flexibilidad y funcionalidad de software del PC. Estas nuevas plataformas son ideales para control sofisticado y registro de datos en ambientes rudos.
- Emplea una plataforma de desarrollo única con una base de datos única para el desarrollo de tareas a través de un amplio rango de disciplinas.

- Integra muy estrechamente el hardware y el software del controlador.
- Funciona en arquitecturas modulares y abiertas.
- Utiliza diferentes estándares para interfaces de red, lenguajes y protocolos que le facilitan intercambiar información con sistemas de múltiples proveedores.
- Este equipo proporciona una herramienta conocida como el OptoDataLink, que da la posibilidad de acceder a la información del controlador desde la web.

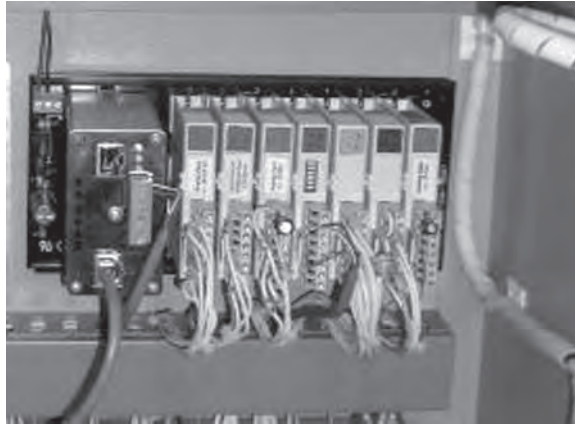


Figura 3.7 SNAP PAC OPTO 22

Desde este controlador se integran todas las señales, haciendo que los protocolos de comunicación (conexión 4 a 20 mA, -10/+10VDC, RS 485, RS 232) con los que se opera, midan y controlen el sistema. Esto hace que la cantidad de señales que se manejan (alrededor de 10), cuestione la posibilidad de usar un bus de campo, eso sin tener en cuenta los costos de éste, lo cual incrementaría en un valor apreciable el sistema.

Todas las señales participantes en el proceso usan instrumentos independientes para indicación y disparo; se considera señal aquella que pueda provocar la parada del proceso. Los instrumentos especificados y seleccionados para la medición y que se adaptaron a las características de comunicación delimitada por el controlador PAC se describen de forma sucinta (Figura 3.8).

Medición de flujo: El caudal es de tipo turbulento y con partículas en suspensión, para la medición del flujo de agua en la tubería se tiene el medidor DFM 5.0 que es un tipo de medidor ultrasónico que usa como principio de medición el efecto Doppler y el transmisor es de tipo electrónico con salida de 4-20 mA. [29]. Algunas características se listan:

- Rango de velocidad de flujo de -40 a 40 pies/seg (-12.2 a +12.2 m/seg)

- Exactitud de +/- 2% de la escala.
- Equipo especial para medición de fluidos con partículas en suspensión o burbujas con tamaño mínimo de 100 micras y una concentración mínima de 75 ppm.
- Salida aislada de 4-20mA a una carga máxima de 1000 ohm
- Para ser utilizado en tuberías que van desde ½” hasta 180” de diámetro.

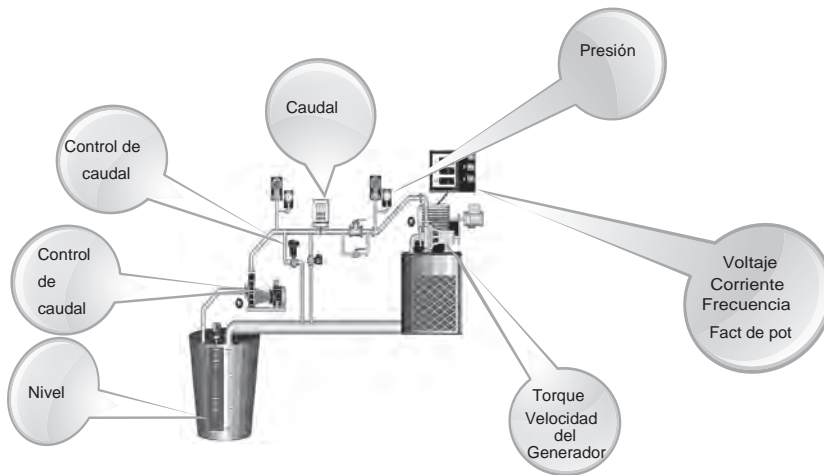


Figura 3.8 Diagrama del sistema con la ubicación de las diferentes variables

Medición de presión: La medición de la presión en la tubería se realiza por medio del transmisor SMAR LD291 el cual es utilizado para medir variables como nivel, presión y caudal. Utiliza como elemento primario de detección de presión sensores capacitivos y el transmisor de tipo electrónico entrega una salida de 4-20mA con posibilidades de comunicación mediante el protocolo HART [30]. Los rangos de ajuste de la presión están de acuerdo con las características del fluido y la tubería de presión en la cual estén instalados. El acople es roscado, de diámetro de ¼”. El cuerpo del sensor es de metal y cuenta con una pantalla para la determinación del valor local.

Algunas características del instrumento son:

- El fluido del proceso puede ser líquido, gas o vapor
- Alimentación del dispositivo de 12 a 45 VDC
- Rango de medición de 0 a 360 PSI.
- Exactitud de +/- 0.1% del span
- Exactitud de +/- 2% de la escala.

Medición de velocidad: La medición de esta variable permite tener control cuando el generador se conecte a la red, para nuestro caso no debe so-

breparar las revoluciones (1.800 rpm) para las que fue diseñado y construido el generador o si no presentará daños eléctricos y mecánicos. La velocidad es medida con un tacómetro generador RE0444R de la marca Radio Energie el cual consiste en un generador eléctrico que proporciona un voltaje de DC proporcional a la velocidad [31]. Se encuentra acoplado al eje del generador por medio de un acople mecánico. Características:

- Velocidad mecánica máxima de 12.000 rpm
- Error máximo de linealidad < 2%
- Exactitud de +/- 1%
- Constante de tiempo de 2.5 ms
- Gradiente de voltaje C_v de 0.006 V/rpm

Medición de nivel: La medición de nivel se realiza por medio de sensores digitales que dan una indicación del nivel máximo y mínimo del agua en el tanque principal. El indicador de nivel se dimensionó para cubrir los rangos que se obtuvieron en ensayos, en operación normal (0.8 metros y 1.2 metros) y no de aquellos en extremo anormales. El elemento primario de medición es magnético del tipo “reed switch” y utiliza flotadores para la detección de los niveles mínimos y máximos.

El cuerpo del sensor es de acero inoxidable para que soporte estar sumergido en el tanque principal, el cual tiene una profundidad de 1.45 metros. Este sensor se encuentra sujetado por una estructura de acero que fue clavada en el terreno al lado del tanque para proporcionarle un apoyo mecánico.

Medición de parámetros eléctricos: Todas estas variables son medidas por un analizador de red que las incorpore. Se caracteriza porque la medida de corriente es de forma indirecta, por medio de transformadores de corriente, por los grandes valores de ésta en el sistema y a su bajo consumo de potencia, además porque la medida de voltaje es de forma directa dado que se manejan valores de 0 voltios a 220 voltios. Para la medición de las variables eléctricas se tiene el medidor Lovato DMK 22, el cual está en la capacidad de entregar una gran variedad de información sobre un sistema trifásico como por ejemplo la potencia activa, reactiva y aparente, las tensiones y corrientes de fase y de línea, la frecuencia eléctrica del sistema, el factor de potencia, Modbus para el envío de la información obtenida en el sistema trifásico [32]. Características:

- Campo de medida de voltaje desde 60 hasta 830 VAC de fase a fase y 30 hasta 480 VAC de fase a neutro.
- Campo de frecuencia de 45 a 65 Hz.
- Entrada de corriente tipo shunt (conexión por medio de transformador de corriente externo).
- Rango de medición de corriente 0.05 a 6 A.
- Precisión en la medición de voltajes de +/- 0.35% full escala (830VAC).

- Precisión en la medición de corrientes de $\pm 0.5\%$ full escala (6 A).
- Precisión en la medición de potencia activa de $\pm 1\%$ full escala ± 1 dígito ($\cos\phi$. 0.7 - 1) y $\pm 1.25\%$ full escala ± 1 dígito ($\cos\phi$. 0.3 - 0.7).
- Puerto de comunicación serial RS485 aislado con velocidad de transmisión configurable entre 1200-19200 bps.

Este dispositivo tiene una entrada de corriente y una entrada de voltaje, además de la comunicación serial y las entradas de alimentación. Tanto a la entrada de voltaje como a la de corriente le llegan 3 cables, uno por cada fase. El esquema del cableado de las fases al instrumento se presenta en la Figura 3.9.

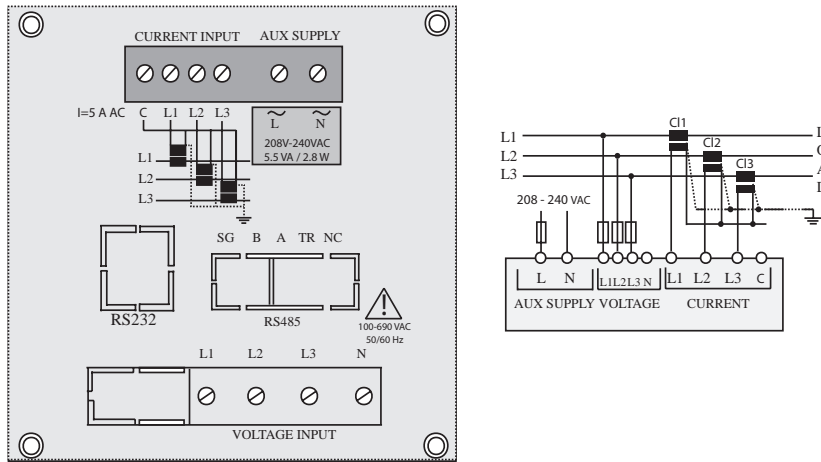


Figura 3.9. Diagrama de conexiones, analizador de redes Lovato DMK-22

Elemento actuador: Como elemento actuador se cuenta con una válvula TRIAC Control Serie EMI-300E con actuador eléctrico, la cual regula ciertas variables del proceso como por ejemplo la velocidad del grupo turbina-generator y la potencia generada por el sistema. La válvula recibe señales de 4-20 mA para su posicionamiento y además también cuenta con un transmisor electrónico con salida 4-20mA que indica la posición en que se encuentra la válvula [33][34].

La válvula de control cuenta con cuerpo de acero, montada sobre la tubería de bifurcación, caracterizada por ser accesible para el mantenimiento. Algunas características:

- Par ejercido 310 ln-Lbs - 35Nm.
- Recorrido de la válvula de 90 grados.
- Tiempo entre cierre y apertura de 12 segundos.
- Señal de entrada seleccionable entre: señal de voltaje 1- 5 VDC, corriente 4-20 mA, corriente 1-5 mA y entrada por potenciómetro externo.

- Salida de corriente de 4-20mA
- Relación no-lineal entre la posición del actuador y la señal de entrada configurable por medio de mini-interruptores.

Regulador de velocidad por frecuencia: Como elemento actuador sobre la velocidad del motor que impulsa la bomba (*grupo hidroenergético*), se cuenta con un regulador de frecuencia, modelo 3G3RX-A4185 de la marca OMRON, el cual es trifásico a un voltaje 200 V AC. Este regulador se encuentra instalado entre el contacto L1 y la motobomba, lo que hace que solo se energice cuando entre en funcionamiento la motobomba. Para el laboratorio éste cumple la función de regular la frecuencia (0 Hz hasta 65 Hz) permitiendo con esto cambiar la altura neta con la cual funciona el laboratorio.

Es de resaltar que los sensores, registradores, indicadores, reguladores cumplen con los requisitos:

- El error máximo de medida no superior al $\pm 0,5\%$ del alcance.
- Todas las señales participantes en el proceso usan conexión 4 a 20 mA.
- La histéresis no excederá del 0,5% del alcance.
- La banda muerta no superará el 0,25% del alcance.
- El cambio en la señal de salida por variación de la temperatura ambiente de 50 °C no excederá del 1% del alcance.

En las Figuras 3.10 a 3.16 se observan los diferentes instrumentos.



Figura 3.10
Medidor de flujo por efecto Doppler.
Greyline Instruments DFM 5.0



Figura 3.11
Reeds switches para medida de nivel



Figura 3.12
Transmisor inteligente de presión LD 291

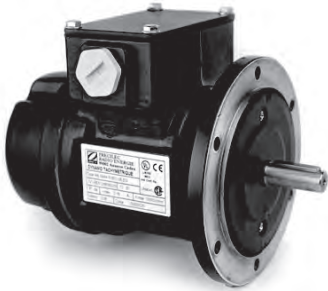


Figura 3.13

Taco generador eléctrico RE0444R de la marca Radio Energie



Figura 3.14

Medidor Lovato DMK 22

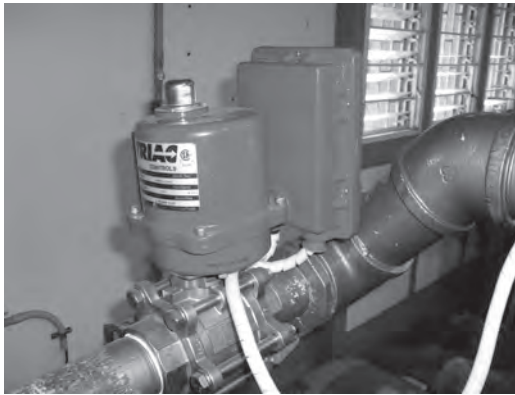


Figura 3.15

Válvula TRIAC Control Serie EMI-300E



Figura 3.16

Regulador de frecuencia, 3G3RX-A4185 OMRON

Manejo de entradas y salidas en el controlador SNAP PAC R1 OPTO 22:
Como se determinó en los criterios generales las señales normalizadas son conexión 4 a 20 mA y -10/+10VDC; estas señales son llevadas al controlador a través de módulos de entradas/salidas digitales y análogos. De acuerdo con la cantidad de señales manejadas en el SGEH se hizo necesario tener los módulos que aparecen en las Figuras 3.17 y 3.18, en donde se muestran los módulos con sus respectivos elementos asociados (sensores y actuadores).

0. Módulo de entradas análogas de corriente SNAP-AIMA-4
1. Módulo de salidas análogas D/A SNAP-AOA-23
2. Módulo de entradas análogas de voltaje SNAP-AIV-4
3. Módulo de comunicación serial RS-485 SNAP-SCM-485-422
4. Módulo de entradas digitales SNAP IAC5A

- 5. Módulo de salidas digitales SNAP ODC5-i
- 6. Módulo de entradas analógicas de voltaje SNAP-AIV-4

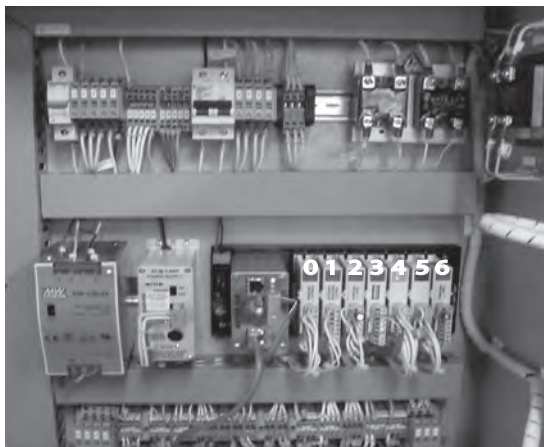


Figura 3.17 Módulos de entrada/salida del PAC

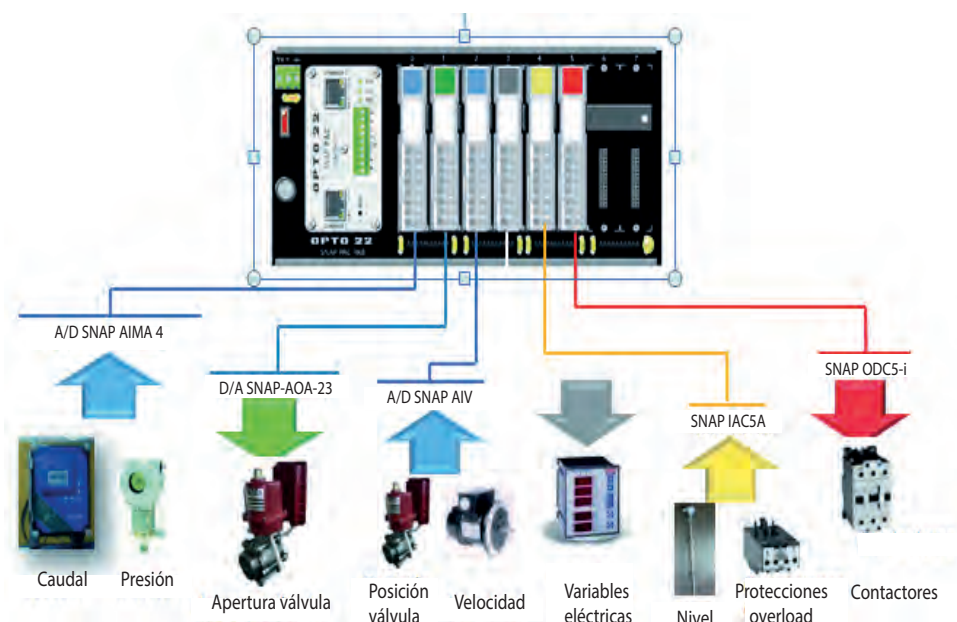


Figura 3.18 Conexión del PAC opto 22 a los instrumentos y elementos de control

En la Tabla 3.7 se indica cómo están conectadas las diferentes señales a los módulos de entradas y salidas del SNAP, que son proporcionadas por los equipos de campo, también aparece el tipo de señal.

Tabla 3.7 Módulos de entradas y salidas de SNAP PAC

Módulo snap	Slot	Variables	Dispositivo de campo	Tipo
A/D SNAP AIMA-4	0	Presión Bomba	Transmisor LD291	Entrada Análoga 4-20 mA
		Presión Turbina	Transmisor LD291	
		Caudal	Medidor DFM 5.0	
D/A SNAP- AOA-23	1	Apertura Válvula	Válvula TRIAC Control Serie EMI- 300E con actuador eléctrico	Salida Análoga 4-20 mA
A/D SNAP AIV	2	Velocidad Generador	Taco generador RE.0444R	Entrada Análoga 0 - 10 Volt
		Posición Válvula	Válvula TRIAC Control Serie EMI- 300E con actuador eléctrico	
SNAP- SCM-485-422	3	Parámetros Eléctricos	Medidor Lovato DMK22	Comunicación Digital RS 485
SNAP IAC5A	4	Nivel Agua Bajo	Indicador de nivel con Reed-Switch	Entrada Digital 120 VAC/VDC
		Nivel Agua Alto	Indicador de nivel con Reed-Switch	
		Sobre Corriente Generador	Contacto Auxiliar Contactor	
		Sobre Corriente Bomba	Contacto Auxiliar Contactor	
SNAP ODC5i	5	Control Contactor Motobomba	Contactor Lovato BF65	Salida Digital aislada 5 - 60 VDC
		Control Contactor Red	Contactor General Electric CR306CO	
		Control Contactor Medidor Lovato	Contactor Lovato BF32	

Ajuste de las variables de los instrumentos asociadas al sistema

En este apartado se hace una descripción general de los procesos de ajuste de las variables de cada uno de los elementos sensores y actuadores en el sistema de generación, obteniendo con ello un correcto funcionamiento.

Caudal (medidor de flujo DFM 5.0)

El medidor de flujo utilizado en esta aplicación cuenta con un panel frontal donde se realizan los respectivos ajustes del instrumento; para realizar esta función se debe acceder a los menús de configuración y proceder a introducir las unidades necesarias para determinar los parámetros de trabajo en el Units/Mode:

1. Units/Mode: Mode → Flow, este permite mostrar el flujo en unidades de ingeniería.
2. Units/Mode: Linear → in, introducimos la unidad de medida la tubería (pulgadas).
3. Units/Mode: Volume → L, unidad en que se mide el volumen (litros).
4. Units/Mode: Time → Min, unidad en la que se mide el tiempo (minutos).

Con lo anteriormente realizado procedemos a introducir los valores de calibración, como aparecen en la Tabla 3.8, que son necesarios para un correcto funcionamiento del sensor.

Tabla 3.8 Valores para calibración del sensor DFM 5.0

Calibración	Valor
Valor máximo	20 mA a 1000 L/Min
Valor mínimo	4 mA a 0 L/Min
Diámetro de la tubería	Pipe ID a 3 in

Nivel (*reeds switches*)

El sensor de nivel del tanque principal, como consta de dos flotadores de fin de carrera dando información de su estado (apagado - encendido), los ajustes se realizan de forma completamente experimental: el tanque fue llenado a su capacidad máxima y se puso a trabajar el sistema permitiendo de esta forma la determinación de las respectivas medidas para el nivel mínimo (0.8 metros) y máximo (1.2 metros).

Presión (Transmisor inteligente de presión LD 291)

Estos transmisores cuentan con indicador local (pantalla) y se encuentran configurados de fábrica para ser ajustados localmente por medio de un destornillador magnético, como se puede observar en la Figura 3.19, introduciéndolos en el menú de configuración, como aparece en el manual de instrucciones, operación y mantenimiento del instrumento [35].

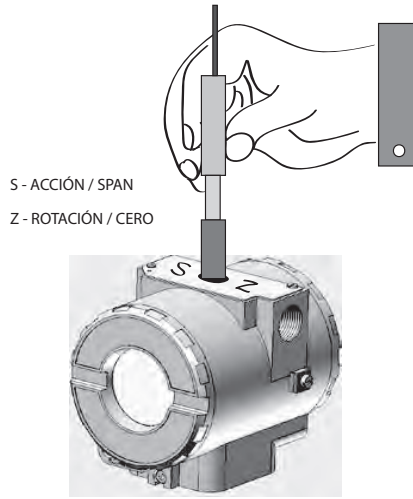


Figura 3.19 Ajuste local de cero y span [29]

Este ajuste local usa una estructura de árbol (Figura 3.20) donde ubicando el destornillador magnético en Z es posible observar las opciones de una rama y ubicando dicha herramienta en S, se obtienen detalles de la opción seleccionada.

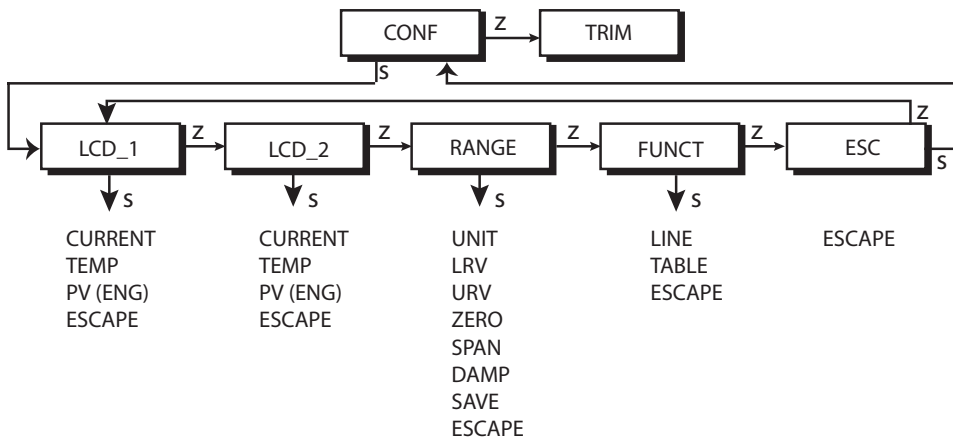


Figura 3.20 Rama CONF con las opciones para el ajuste [36]

En el menú de configuración se conmuta a la rama S, empezando con la función display 1 (LCD_1) y luego a la función display 2 (LCD_2), asignándoles un rango de trabajo, como aparece a continuación:

- Display 1 (LCD_1):
Rango de trabajo = 0 a 100 PSI sin referencia alguna.
CO (salida de corriente) = en mA
- Display 2 (LCD_2)
Rango de trabajo = 0 a 100 PSI sin referencia alguna.
PV (Variable del proceso) = unidades inglesas (eng. Unit)

Luego, oprimiendo Z se desplaza a la función rango (FUNCT de la rama CONF) y en éste ajustamos los siguientes parámetros:

- Unidad (UNIT) → PSI (libras por centímetro cuadrado), como unidades de medición.
- Función reduce (LRV) → 0, valor inferior sin referencia.
- Función reduce (URV) → 100, valor superior sin referencia.

Velocidad del generador (REO444R)

El ajuste de la señal de voltaje que proporciona el taco generador, según su fabricante y de acuerdo con las especificaciones del comportamiento de éste, la señal de salida proporciona 0.006 voltios por cada rpm. El sistema cuenta con un motor asíncrono de 4 polos, lo que proporciona que la velocidad sincrónica para trabajar en el régimen de generador es una velocidad de 1.800 rpm y por esto la salida de voltaje del taco generador será de 10.8 voltios, lo que supera el valor de medición para el módulo de adquisición SNAP-AIV (-10/+10 volt), por esta razón se realiza un acondicionamiento a la señal por medio de un divisor de voltaje de relación 2/3, dándonos la nueva señal un valor de 7.2 voltios cuando se trabaja a 1.800 rpm.

Variables eléctricas (Medidor Lovato DMK 22)

Dado que la corriente nominal para el motor es de 19.77 AMP y ésta supera el rango de trabajo del equipo (0 a 6 amperios), entonces para esta señal se hizo necesario la utilización de transformadores de corriente, los cuales presentan una relación de 10 a 1 por fase, con lo cual se modificó el valor del parámetro (P.X1). A continuación, en la Tabla 3.9 se hace un resumen de las variables que fueron modificadas.

Tabla 3.9 Variables modificadas en el Lovato DMK 22

Parámetro	Descripción	Rango	Valor
P 41	Dirección	1 - 255	8
P 42	Velocidad de transmisión	1200 - 2400- 4800 - 9600 -19200	19200

Finalmente, el equipo de control (SNAP PAC-R1 DE OPTO22) se conecta al PC o a una LAN existente a través de un cable de red cruzado de forma directa. Para realizar esta función se debe asignar una dirección IP, la máscara de subred y la puerta de enlace.