

## SISTEMAS DE GENERACIÓN

### INTRODUCCIÓN

En este capítulo se definen los conceptos más importantes relacionados con los Sistemas de Generación de Energía Hidroeléctrica (SGEH), se comenta sobre los equipos concernientes a la casa de máquinas como lo son la turbina y el generador, a su vez se discute sobre la arquitectura, jerarquía y funciones de los sistemas de control e instrumentación de los SGEH.

### ESTADO DEL ARTE

Entre los países con gran potencial hidroenergético y en crecimiento se destacan China y Brasil, los cuales disponen de Institutos para la investigación en el área de generación hidroeléctrica. Esta investigación ha alcanzado niveles que les permite en la actualidad producir equipos de generación para medianas centrales hidroeléctricas.

La República Popular de China, gracias a un programa conjunto con el Programa de Desarrollo de Naciones Unidas, creó en el año 1981 el Centro Regional para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) de Hangzhou (HRC) con el propósito de lograr desarrollos en este campo. A la fecha, el centro ha realizado más de 50 proyectos de PCH (menores de 300 MW) y ha capacitado a especialistas de diferentes países de mundo. Logros que le han representado recibir el reconocimiento de su gobierno y de entidades internacionales, como ONUDI, PNUD, FAO, entre otros [9]. Un nivel equivalente en investigación ha alcanzado Brasil a través del Centro Nacional de Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos - CERPCH, para potencias menores de 10 MW.

Un programa emergente de desarrollo hidroenergético en la región se ubica en Cajamarca - Perú, en donde la ITDG en conjunto con el gobierno Peruano, adelantan el Programa de Nuevas Tecnologías, encargado de investigar y ejecutar proyectos pilotos en zonas rurales; los cuales se difunden a través del Centro de demostración y capacitación de energías renovables. Dentro de sus logros más importantes se encuentra el desarrollo de una turbina Kaplan de alabes fijos de una potencia máxima de 50 KW [10].

En Colombia se tienen equipos para mostrar el principio de conversión de energía en una central hidroeléctrica, los más recientes se ubican en el museo interactivo de las Empresas Públicas de Medellín. Sin embargo, la finalidad del museo no permite que a través de estos equipos se pueda llegar a capacitar e investigar. Además de este equipo, al interior de las Empresas Públicas de Medellín se tiene una unidad de capacitación destinada a preparar sus operarios en el manejo de sus plantas y subestaciones a un nivel técnico.

En Colombia la mayoría de centrales hidroeléctricas son de baja y media caída, equipadas con turbinas Francis, condiciones que no pueden ser del todo simuladas en este laboratorio. Es por ello que es necesario diseñar y construir una unidad especializada para la experimentación e investigación en generación de energía hidroeléctrica de baja y media caída con aplicación de nuevas tecnologías, que le posibiliten estar a nivel de los desarrollos hidroenergéticos [11].

Wagner y asociados orientan sus esfuerzos en un laboratorio tele-operado para el desarrollo de prácticas de control discreto con estudiantes de ingeniería eléctrica. Estas prácticas incluyen un sistema de audio y video que muestra en tiempo real, los efectos de sus acciones. En adición, se desarrollaron programas en Java que le proveen al estudiante los conceptos teóricos y modelos gráficos de los controladores que pueden ser implementados en las prácticas. Para evaluar la efectividad del laboratorio tele-operado, se seleccionaron estudiantes que realizaron las prácticas en forma presencial y otros con el laboratorio tele-operado. Los resultados que publicaron indican que no hay diferencia notoria entre los dos grupos de estudiantes [12].

Tzeng presenta en su trabajo un laboratorio virtual de máquinas eléctricas. En su trabajo utiliza los conceptos de sistemas expertos para implementar un agente pedagógico virtual. Este agente posee la experiencia de un educador experto en el tema y puede guiar, evaluar y corregir al estudiante en el desarrollo de la práctica de laboratorio. Este laboratorio ha sido construido con herramientas de realidad virtual combinadas con Java.

## **SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA (SGEH)**

Desde principios del siglo XX la energía proveniente del agua ha sido de buena manera aprovechada para la generación de energía eléctrica. Desde 1920 con el desarrollo de los generadores eléctricos y las turbinas hidráulicas

cas se utilizó este mecanismo de generación de energía eléctrica para abastecer los requerimientos de la época. Una central eléctrica usa la energía cinética del agua para mover una turbina hidráulica que a su vez lo hace con un generador eléctrico el cual entrega la energía. Denominamos sistema de generación de energía hidroeléctrica a aquel que mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua —que adquiere un caudal  $Q$  al final de una caída  $H$ —, se transforma en energía mecánica a través de un elemento llamado turbina y posteriormente en energía eléctrica por un elemento llamado generador. La potencia del recurso que se puede obtener está expresada por la ecuación (2.1).

$$P = 9,81 * Q * H, \tag{2.1}$$

donde:  $P$  es la potencia del recurso en KW  
 $9,81$  es una constante  
 $Q$  es el caudal en  $m^3/seg.$   
 $H$  es la altura en m.

Por eficiencia de la instalación se entiende el porcentaje de potencia que se puede realmente obtener respecto al potencial técnico, teniendo en cuenta las inevitables pérdidas de la transformación [13].

Los sistemas hidroeléctricos pueden ser clasificados de diferentes maneras; por ejemplo, de acuerdo con la potencia instalada podemos hablar generalmente de centrales hidroeléctricas (CHE) con capacidades desde unos cuantos MW hasta varios GW, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) con capacidades que van desde unos 500 KW hasta aproximadamente unos 5.000 KW. Los prefijos “mini” y “micro” son frecuentemente usados para instalaciones con capacidades inferiores a 500 KW. En la Tabla 2.1 se observa la clasificación, de acuerdo con diferentes organismos.

**Tabla 2.1 Clasificación de las centrales hidroeléctricas en función de la potencia**

Organismo	Región	Micro C	Mini C	P.C.H.	Grandes
OLADE	América Lat	0 - 50 KW	51 - 500 KW	500 - 5 000 KW	> 5.000 KW
IDEA	España	0 - 50 KW	51 - 500 KW	500 - 10.000 KW	> 10.000 KW
HIC	R.P. China	0 - 50 KW	51 - 500 KW	500 - 25.000 KW	> 25.000 KW
BM		0 - 100 KW	100 KW - 1 MW	1 MW - 20 MW	> 20 MW

OLADE: Organización Latinoamericana de la Energía

IDEA: Institución de Diversificación y Ahorro de la Energía. España

HIC: Hanzhou International Center. República de China

BM: Banco Mundial

Unidades de generación con capacidades mayores a 5.000 KW, frecuentemente requieren medios de control y protección mucho más complejos. De acuerdo con la forma en que se toma el recurso hídrico se pueden clasificar en centrales de agua fluyente y centrales de agua embalsada como se muestra en la Figura 2.1 y en la Figura 2.2, respectivamente. En una central del tipo de agua fluyente se capta parte del caudal del río y se conduce hacia las turbinas de la central para su aprovechamiento. Se requiere de un caudal lo suficientemente constante en las diferentes estaciones del año para garantizar una potencia determinada. En una central de agua embalsada se almacena un volumen considerable de agua mediante la construcción de represas. Este tipo de represas requieren de sistemas de control que permitan regular el caudal de salida del embalse de manera que este permanezca en los niveles requeridos por la planta.

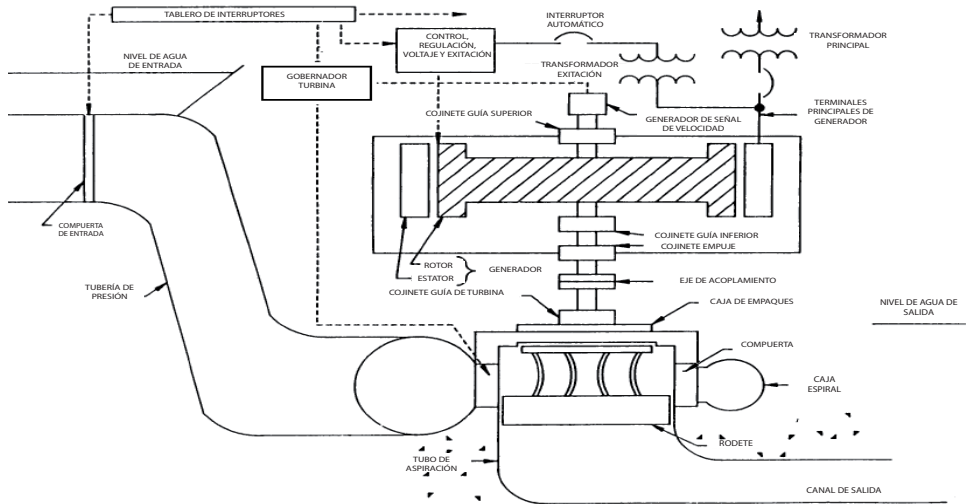


**Figura 2.1 Central hidroeléctrica de aguas fluyentes** [14]

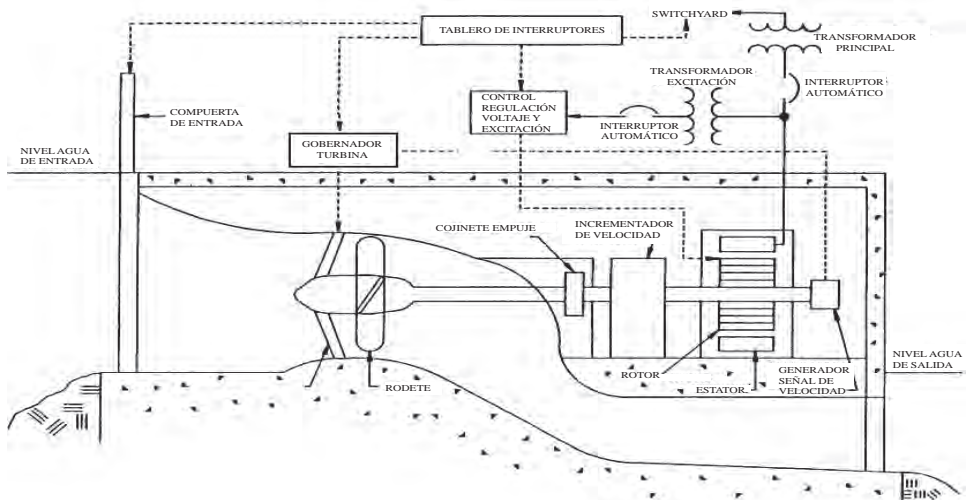


**Figura 2.2 Central hidroeléctrica de agua embalsada** [14]

En un sistema de generación hidroeléctrico, la unidad de generación puede tener su eje en forma horizontal, vertical o inclinado con el fin de satisfacer las condiciones físicas del sitio escogido para la construcción. En la Figura 2.3 se ve un ejemplo típico de un sistema de generación hidroeléctrico con un arreglo vertical, el cual utiliza una turbina Francis. En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo de una unidad de generación del tipo de eje horizontal que cuenta con una turbina de flujo axial.



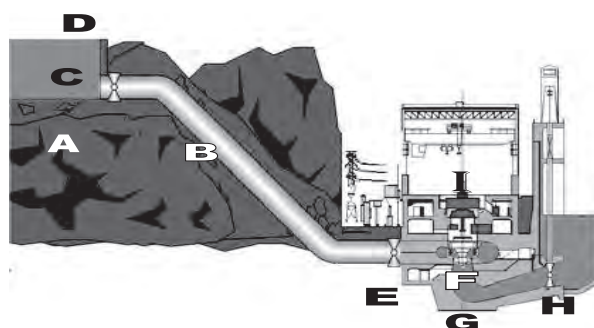
**Figura 2.3** Unidad de generación eje vertical. Turbina Francis [15]



**Figura 2.4** Unidad de generación eje horizontal. Turbina de flujo axial [15]

### ***Elementos de un sistema de generación de energía hidroeléctrica***

Los componentes que conforman un SGEH están divididos en dos grandes grupos, el primero lo integran los sistemas de captación y conducción de agua referentes a las obras de tipo civil que incluyen el embalse, canales de derivación de agua y tuberías principales. En el segundo grupo está la casa de máquinas donde se encuentran instalados los sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos de la central dentro de los cuales está el grupo turbina-generator, sistemas de excitación, sistemas auxiliares, la estación de servicio, el sistema de relés y contactores, así como los sistemas de control, instrumentación y protección de la central. Los elementos constructivos que constituyen una central hidráulica se muestran en la Figura 2.5.



***Figura 2.5 Elementos que conforman una central hidroeléctrica***

- |                                     |                        |
|-------------------------------------|------------------------|
| A. Presa.                           | F. Cámara de turbinas. |
| B. Tubería de presión.              | G. Tubo de aspiración. |
| C. Compuertas.                      | H. Canal de desagüe.   |
| D. Accionamiento de las compuertas  | I. Casa de máquinas.   |
| E. Órganos de obturación (válvulas) |                        |

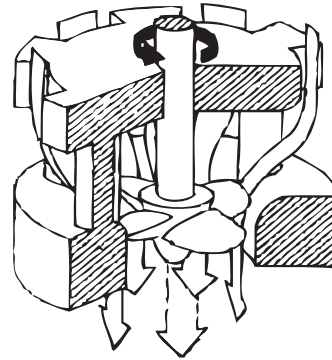
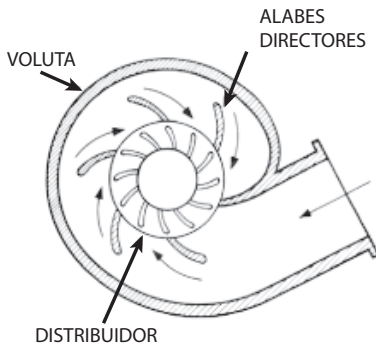
Dado el enfoque y los alcances de este trabajo se hace énfasis en la descripción de los equipos principales (turbina y generador), así como del grupo de contactores de conexión a la red eléctrica y el sistema de protecciones, más en detalle se explica la unidad de control, todo esto se hace con el fin de relacionar las características de funcionalidad de estos elementos con los diversos componentes y equipos que hacen parte del SGEH que posee la Universidad del Valle con los cuales se va a trabajar, principalmente. Para una mayor información acerca de los demás elementos de un SGEH consultar las normas Std IEEE 1010 de 2006 y Std 1020 de 1988.

### **Grupo Turbina-Generador**

**Turbina:** Es un elemento dedicado a transformar la energía cinética y potencial del agua en energía mecánica de rotación para mover el genera-

dor, el cual convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Dependiendo del sentido de giro del rodete de la turbina en relación con el sentido de propulsión y salida del agua, así como la presión de agua efectiva ejercida y la cantidad de flujo que llegan a esta permiten seleccionar el tipo y capacidad de la turbina que se debe emplear en una central hidroeléctrica. Con base en estos criterios las turbinas se clasifican en: turbinas de reacción y turbinas de impulso [16]. Los tipos de turbinas más utilizadas son:

*Turbina Francis:* Pertenece al grupo de las turbinas de reacción, es decir que el flujo se produce dentro de una cámara cerrada bajo presión. La Francis se caracteriza porque recibe el flujo de agua en dirección radial orientándolo hacia la salida en dirección axial, por lo que se considera como una turbina de flujo radial, como se observa en la Figura 2.6.



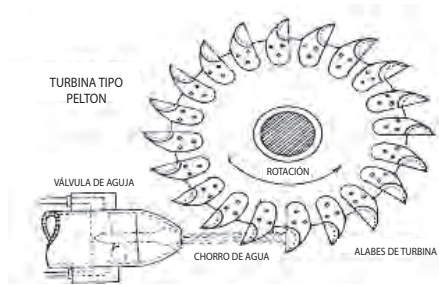
**Figura 2.6 Turbina Francis [17]**      **Figura 2.7 Turbina Kaplan [17]**

*Turbina Kaplan:* Una instalación con turbina hélice se compone básicamente de una cámara de entrada que puede ser abierta o cerrada, un distribuidor fijo, un rodete con 4 o 5 palas fijas en forma de hélice de barco y un tubo de aspiración. También hay otra variante de la hélice consistente en una turbina con distribuidor regulable y rodete de palas fijas (Figura 2.7).

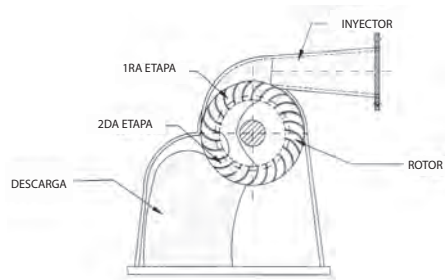
*Turbina Pelton:* Es la turbina de acción más utilizada. Consta de un disco circular o rodete que tiene montados en su periferia una especie de cucharas de doble cuenco o álabes. El chorro de agua dirigido y regulado por uno o varios inyectores incide sobre estas cucharas provocando el movimiento de giro de la turbina, como se observa en la Figura 2.8.

*Turbina Michell:* También es una rueda hidráulica de gran velocidad (Figura 2.9). Su diseño es muy parecido al de la turbina Pelton, aunque su rendimiento es inferior (80%), pero también es más barata. Generalmente no se utiliza para generar energía eléctrica, operando a alturas inferiores a los 30 m.





**Figura 2.8 Turbina Pelton** [17]



**Figura 2.9 Turbina Michell** [18]

**Generador:** El generador es una máquina basada en la inducción electromagnética, que se encarga de transformar la energía mecánica de rotación que proporciona la turbina en energía eléctrica. El principio de funcionamiento está basado en la ley de Faraday. Cuando un conductor eléctrico se mueve en un campo magnético se produce una corriente eléctrica a través de él. El generador está compuesto por dos partes fundamentales: el rotor (o inductor móvil), que se encarga de generar un campo magnético variable al girar arrastrado por la turbina y el estator (o inducido fijo), sobre el que se genera la corriente eléctrica aprovechable. Los dos tipos de generadores más comunes en el mercado se conocen como generadores síncronos y asíncronos.

*Generador síncrono:* Los generadores síncronos son los más usados en centrales hidroeléctricas. Su principal ventaja para aplicaciones en pequeñas centrales es su capacidad de operar con otros aumentando o disminuyendo el factor de potencia a través del control de su excitación. Los generadores síncronos requieren de campos de excitación de corriente directa. La excitación para unidades muy pequeñas y de alta velocidad es proporcionada generalmente por excitadores de escobillas de impulso directo. Para generadores más grandes y lentos generalmente utilizan excitadores estáticos con equipos de estado sólido que convierten la corriente alterna en directa. En la Figura 2.10 se muestra un generador síncrono.



**Figura 2.10 Generador síncrono** [19]



Para conectar un generador síncrono a la red eléctrica es necesario llevar éste cerca de la velocidad sincrónica y luego debe aplicársele la excitación. El voltaje y la frecuencia se sincronizan con los de la red antes de conectar el generador al sistema eléctrico con el fin de que no se presenten picos de corriente. La expresión de la velocidad de sincronización está dada por la ecuación (2.2).

$$\text{Velocidad de sincronismo: } V_s = \frac{60 * f_s}{n}, \quad (2.2)$$

donde:  $f_s$  es frecuencia de la red eléctrica y  $n$  el número de polos del generador.

Estos dos procesos de sincronización y conexión pueden realizarse de forma automática, donde todo es controlado sin la necesidad de un operario, o de forma manual donde es de vital importancia la presencia de personas con indicadores de voltaje, frecuencia y ángulo de fase y estar provistos de dispositivos que controlen el voltaje y la velocidad del mismo.

*Generador asíncrono:* Los beneficios que presentan los generadores asíncronos o de inducción son sus bajos costos de instalación y mantenimiento debido a la eliminación del excitador, el regulador de voltaje y el sincronizador. Pero posee las desventajas de no proporcionar potencia reactiva y tampoco de controlar su voltaje de salida de forma aislada, por esto es necesario el empleo de bancos de condensadores que brindan los reactivos al generador. Una característica importante del generador asíncrono es la de poder tomar su corriente de excitación a través del sistema eléctrico. Un motor estándar puede ser usado en algunas instancias como motor de inducción siempre y cuando el rotor pueda resistir la velocidad de giro de la turbina.

El método para arrancar el generador asíncrono es encender la turbina de la forma normal, como se realiza con un generador síncrono. El generador se lleva hasta la velocidad de sincronismo o ligeramente por debajo de ésta y luego se conecta al sistema eléctrico, limitado de grandes transitorios de corriente en éste. Ya conectado a la red eléctrica, el que determina el voltaje y frecuencia de los generadores asíncronos es el sistema eléctrico. En la Figura 2.11 se muestra un generador asíncrono.



**Figura 2.11 Generador asíncrono [20]**

En un sentido amplio, una central eléctrica es una instalación destinada a transformar la energía potencial en trabajo. Actualmente, la humanidad cuenta con varios tipos de plantas generadoras de energía, las cuales se clasifican de acuerdo con diferentes criterios:

- A la manera como la producen: Centrales térmicas de carbón, centrales nucleares, centrales hidráulicas o hidroeléctricas, centrales eólicas, centrales geotérmicas, etc.
- Por la capacidad de producción de energía: Las más importantes son las centrales principales y las centrales pico. Las primeras funcionan de manera permanente y compensan la mayor parte de la demanda de energía mientras que las centrales pico entran a funcionar en horas determinadas donde la demanda de energía se hace más grande.
- Si la fuente de generación de energía es renovable o no: Por ejemplo, tenemos que la fuente de generación de energía de las termoeléctricas es no renovable ya que éstas funcionan con carbón o con gas, mientras que las centrales eólicas funcionan con el viento, que es una fuente renovable.

En el mundo la mayor parte de la demanda eléctrica se sustenta mediante el uso de fuentes no renovables de energía, como centrales nucleares y termoeléctricas, pero cada vez se acrecienta más el uso de fuentes renovables de energía debido a sus beneficios como una forma de producción más limpia y a menores costos ya que no se necesita comprar la materia prima para la producción de la planta como es el caso de las termoeléctricas que funcionan a carbón o a gas, o el caso de las plantas nucleares que funcionan con uranio.

En Colombia, debido a su gran riqueza hídrica con un potencial hidroeléctrico calculado en 90.000 MW [21], el 64% de la demanda de energía es atendida por centrales hidroeléctricas y un 33% por centrales termoeléctricas.

### ***Centrales Hidroeléctricas (CHE)***

Las CHE funcionan aprovechando la energía potencial que posee el agua de un río al ser almacenada y posteriormente encauzada y controlada. Debido a la energía cinética desarrollada en su descenso, las turbinas, máquinas motrices diseñadas para aprovechar esta energía, son movidas, lo cual a su vez mueve una máquina generadora de energía eléctrica a través de un acople mecánico. Son muchas las ventajas que tienen este tipo de centrales, pues además de ser una energía renovable, no crea residuos, no contamina y es limpia. No se requieren combustibles y, en consecuencia, presentan menor contaminación. El proceso de conversión de energía mecánica en eléctrica permite obtener un rendimiento de 80% a 90%. Presentan adicionalmente flexibilidad para su conexión y desconexión, tareas que toman algunos minutos [22].

Entre los inconvenientes relacionados con hidroeléctricas tenemos la alta inversión y grandes obras civiles que demandan; de igual forma su dependencia del clima hace que su operación esté relacionada con la presencia de lluvias y la época del año. Desde el punto de vista ambiental se deben hacer grandes inundaciones de ciertas zonas geográficas. Por último, el costo por kilovatio instalado es muy alto dado que los sistemas de transmisión están generalmente lejos de las ciudades.

### **Operación general de una central hidroeléctrica**

Son muchas las variables o parámetros que intervienen en el proceso de generación de energía en una central hidroeléctrica. Estas variables o parámetros son de tipo hidráulico, mecánico, eléctrico y de otros tipos.

La operación de una central hidroeléctrica generadora se realiza por medio de una serie de pasos secuenciales, en donde para avanzar al siguiente, siempre se debe verificar ciertos estados de elementos y señales de la planta. En la Tabla 2.2 se muestran las variables o parámetros más importantes que intervienen en el proceso. En este protocolo de operación, está incluido el encendido y apagado de la central, y puede tener varios grados de intervención del operador, que va desde una operación automática, donde solo es dada una orden de encendido para llevar al sistema a su rutina normal de trabajo, hasta uno que puede ser semi-automático (manual) donde es requerida una orden del operador para avanzar de una etapa a otra, que pueden ser seleccionados de manera excluyente en el inicio de la operación [23].

**Tabla 2.2 Variables más importantes en la operación de una central hidroeléctrica**

<b>Tipo de señal</b>	
Flujo o caudal	Potencia activa
Nivel de presa, tanque de carga	Potencia reactiva
Nivel de descarga de la turbina o desfogue	Potencia aparente
Presión de columna de agua en la tubería o presión estática	Posición o apertura de álabes en la turbina
Presión diferencial	Velocidad de la turbina
Temperatura de agua de la tubería de presión	Sistemas de lubricación de las bombas
Voltajes	Sistema de achique de las bombas
Corrientes de fase	Temperatura del estator y rotor de los generadores
Factor de potencia	Temperatura de los cojines de los generadores

Sin hacer caso del tipo de selección, sea semiautomático (manual) o automático, el sistema debe seguir ciertas secuencias de eventos durante el encendido y el apagado. Los pasos en la secuencia dependen de la complejidad de la planta a operar. La secuencia de operación general de toda central hidroeléctrica generadora, es dividida en cuatro procesos, que son: chequeos realizados antes del encendido, encendido de sistemas auxiliares, inicio de funcionamiento de la unidad generadora y conexión a la red y por último apagado de la unidad. Los esquemas lógicos para operación automático y semiautomático (manual) con las respectivas fases de operación se muestran en la Figura 2.12 y las secuencias se describen a continuación.

#### *Chequeos antes del encendido*

En el primer paso de la secuencia, en el sistema se verifica que varias condiciones iniciales como ciertos niveles y presiones, normalidad en la turbina, y el correcto pre-posicionamiento de contactores, interruptores, válvulas y otros dispositivos pertenecientes a la planta. En este momento también se chequea condicionantes como el nivel del reservorio.

#### *Encendido de sistemas auxiliares*

Una vez el chequeo antes del encendido ha sido completado, los sistemas auxiliares tales como las bombas del agua de refrigeración, el sistema de engrasado de la turbina, las bombas de aceite a los cojinetes, etc., deben ser encendidos. En este momento también se posicionan las compuertas a la posición inicial del arranque del sistema.

#### *Inicio de funcionamiento de unidad generadora y conexión a la red*

Una vez los sistemas auxiliares han sido encendidos, se inicia el funcionamiento de la unidad generadora. En este momento las compuertas se abren, los reguladores de voltaje son activados y se acelera la unidad hasta alcanzar aproximadamente el 95% de la velocidad de sincronismo. Una vez en este estado, se enciende la excitación del generador y el potencial es aplicado al sincronizador automático. Las frecuencias y voltajes en generador se igualan a los de la red externa. Cuando ésta y cualquier condición pre-sincronismo se cumplen, se cierra el contactor de la unidad para conectarla a la red, colocando la unidad en línea. El controlador de la unidad (sea operador o el sistema) ajusta el valor de referencia para la potencia de salida deseada.

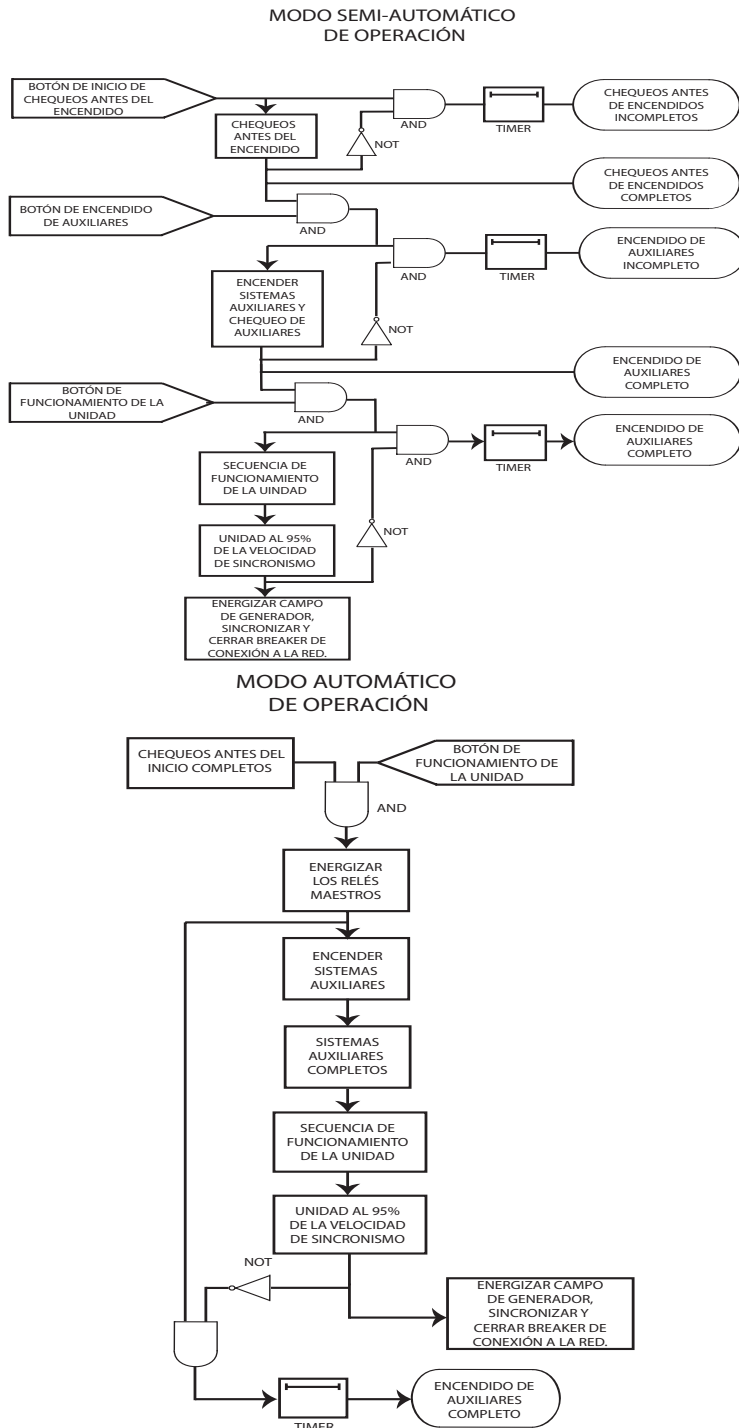


Figura 2.12 Modos y secuencia de operación de una CHE [23]

### *Apagado de la unidad*

El apagado de una unidad generadora se puede dar de tres maneras diferentes: El apagado de emergencia, que corresponde al medio más rápido para desconectar una unidad generadora. En éste, el relé de desconexión de la planta se dispara ya sea por protección automática o por orden del operador. El segundo es el apagado rápido, el cual se inicia generalmente por problemas mecánicos tales como baja presión de aceite, vibraciones, y altas temperaturas en los cojinetes y, finalmente, el apagado normal, que igual que el apagado rápido, descarga la unidad (la lleva a la velocidad de sincronismo con potencia cero a la salida) antes de desactivar el contactor de la unidad de conexión a la red.

### ***Control en sistemas de generación hidroeléctrica***

De acuerdo con la complejidad y funcionalidad del sistema de control, en un SGEH se definen criterios relacionados entre sí, los cuales se determinan según el tipo y grado de automatismo del sistema. A continuación se presentan los criterios más significativos [16]:

- Número, tamaño y tipo de grupos turbina-generador
- Tipo de planta
- Tipos de sistemas auxiliares
- Costos de operación, reparación y mantenimiento de equipos
- Naturaleza de la operación (manual o automática)
- Tipo de acceso (local o remoto)

A partir de estos criterios se determinan las funciones generales del sistema de control el cual permite obtener y monitorear la información del proceso, supervisar y proteger la planta y controlar las acciones de la misma [24].

### ***Funciones del sistema de control en un SGEH***

Las funciones de control y la instrumentación utilizada en una central hidroeléctrica dependen del tamaño de la planta, del método de operación y de aspectos económicos. Entre las funciones generales de un sistema de control hidroeléctrico podemos describir las siguientes [16]:

#### **Obtener y monitorear información del proceso**

Se realiza a través de sensores analógicos o digitales, indicadores sonoros, interfaces de monitoreo LCD, entre otros. Los datos brindados por estos elementos son en su mayoría parámetros de control, información de estados de operación o señales de realimentación del sistema. En un SGEH son usados distintos elementos de monitoreo de variables; podemos mencionar los medidores de potencia generada, indicadores de voltaje, de corriente, de frecuencia, de sincronismo, de niveles de agua en la represa, de niveles



presión del flujo de agua en las tuberías principales, dispositivos de posición para el control de flujo en la turbina (compuertas, álabes, inyectores y válvulas), indicadores del estado de válvulas de bypass, esclusas y aliviadero, como también indicadores de funcionamiento de los sistemas auxiliares.

### **Supervisar y proteger el proceso**

Los datos obtenidos a través del monitoreo del estado de los equipos y de las distintas variables de un SGEH son comparados con valores límite de operación y de mal funcionamiento para realizar acciones de control y protección del sistema. Los valores límite o de alarma más comunes presentes en un SGEH son las alarmas de ingreso a la planta en el momento de operación, la de incendio, de estado de emergencia, de la diferencia de presión en la rejilla de basuras, la de parado sin haberlo requerido, la de pérdida de lubricación o de enfriamiento, la de altos o bajos niveles de agua, la de secuencias de arranque o parada incompletas y finalmente la de pérdida de potencia.

### **Controlar el proceso**

En esta etapa se realizan las acciones de control que se ejecutan de acuerdo con la información obtenida del funcionamiento de la central hidroeléctrica; estas acciones se desarrollan automática o manualmente, donde se incluye la presencia de un operador. Dentro de las funciones de la etapa de control se encuentran: iniciar las secuencias de arranque y parada del sistema, realizar las secuencias de conexión y desconexión del grupo turbina-generador al sistema eléctrico, operar los arreglos de contactores de la central (abrir/cerrar), excitar las unidades de generación, regular los dispositivos de control de flujo (compuertas, álabes, inyectores y válvulas de admisión de agua) y controlar los sistemas auxiliares.

Tradicionalmente los sistemas de control en SGEH se han implementado usando una arquitectura vertical, este arreglo es aplicable a los SGEH de acuerdo con los criterios de ubicación del sistema de control (local, centralizado y remoto), modo de control (manual o automático) y de operación (supervisado o no). Con base en estos criterios los niveles inferiores y medios están comprendidos por los tipos de controles básicos caracterizados por la combinación de los ítems de ubicación local y centralizada con los modos de control manual y automático; ya en los niveles superiores se presentan los niveles de control remoto manuales y automáticos. Estos niveles de control no son excluyentes, por eso son usados generalmente en conjunto en diferentes secciones de los SGEH. Las secuencias de arranque, conexión, control de carga y parada del SGEH pueden ser controladas local o remotamente, sin embargo la operación de éstas sin la presencia de personal de supervisión no es aconsejable debido a las fallas de seguridad que puedan presentar los sistemas de control durante las secuencias.

Estas secuencias de operación del SGEH son diseñadas a través de sistemas de lógica cableada, controladores programables, sistemas basados en PCs o por la combinación de todos los anteriores. El sistema de control debe facilitar el desarrollo de secuencias bajo condiciones normales y anormales donde se puedan producir disturbios o no en el sistema. Para llevar a cabo con éxito las distintas secuencias, el sistema de control debe interrelacionarse con todos los equipos de supervisión, instrumentación y monitoreo de la planta. En las Figuras 2.13 y 2.14 se muestran los diagramas de las secuencias típicas de arranque, parada normal y parada anormal debido a problemas eléctricos en una pequeña central hidroeléctrica que utiliza una turbina Francis y un generador síncrono [16].

### ***Normas utilizadas para la operación***

Los organismos internacionales que contemplan los requisitos para la puesta en marcha, montaje y pruebas de algunos de los equipos principales de las centrales han establecido diversas normas de operación. Las normas utilizadas serán la norma IEEE 1010 de 1987, la cual describe los sistemas de monitoreo y control típicos que debe tener una central hidroeléctrica en general, sus jerarquías, requerimientos, secuencias de arranque y paro; la norma IEEE 1020 entrega una metodología para la puesta en marcha y control típico que debe tener una pequeña central hidroeléctrica; la norma IEEE 1547 —Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems—, tiene como propósito proveer una norma uniforme para la conexión de GD con los sistemas eléctricos, estableciendo requerimientos en cuanto a desempeño, operación, pruebas, consideraciones de seguridad y mantenimiento de las interconexiones [25]; la norma IEC 61850 —Communication Network and Systems in Substations—, se enfoca en los modelos de información y el intercambio de información entre los mismos,. Es posible generar una abstracción que permite identificar los componentes de una sub-estación como objetos pertenecientes a clases y cómo intercambiar información entre estos [15]; la norma IEC 60870-5 es un estándar abierto para la transmisión de información de datos y control en sistemas de telemetría SCADA; y finalmente la norma IEC 61968 —System Interfaces for Distribution Management—, establece un lenguaje común para la integración de distintos agentes como recursos humanos, EMS, automatización de sub-estaciones, almacenamiento de datos, etc. [26].

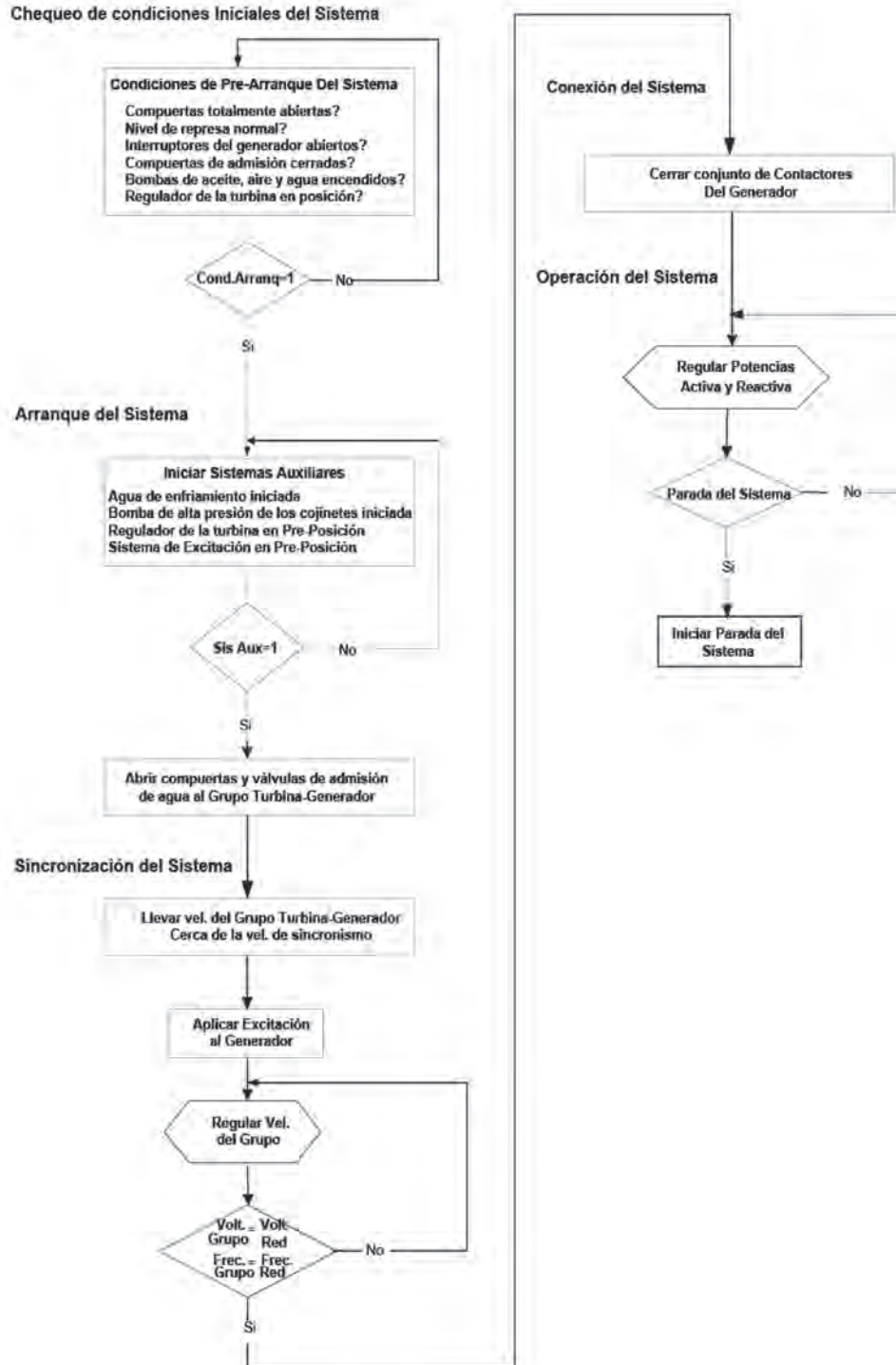
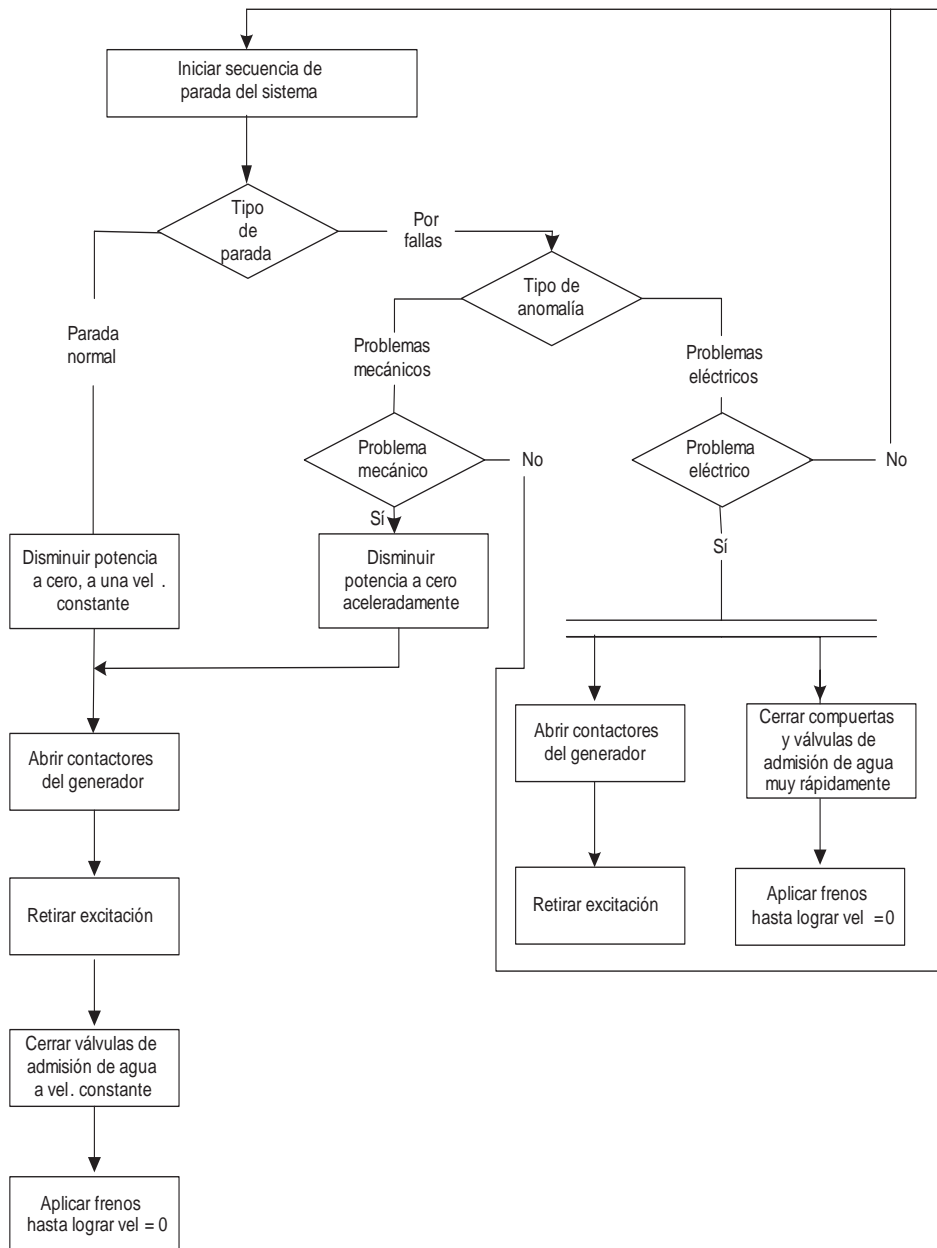


Figura 2.13 Secuencia de arranque del sistema en una PCH [16]



**Figura 2.14** *Secuencias de parada normal, parada por problemas mecánicos o eléctricos en un SGEH [16]*