

UNIVERSIDAD DON BOSCO

FACULTAD DE INGENIERIA



TEMA: DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACION DEL PROCESO DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA EN UNA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELECTRICA CON GENERADOR TIPO ASINCRONO.

**TRABAJO DE GARDUACION PARA OPTAR AL GRADO DE:
INGENIERO EN ELECTRONICA**

PRESENTADO POR:

EDGARDO JOSE CRUZ ZELEDON

RENATO DIAZ DELEON

CARLOS ANTONIO GUERRERO AGUILAR

MARZO 1998, SOYANPANGO, EL SALVADOR, C.A

UNIVERSIDAD DON BOSCO

FACULTAD DE INGENIERIA



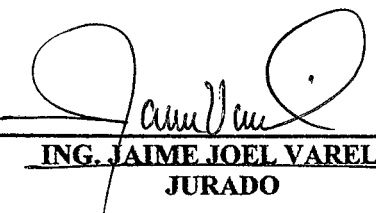
“ DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACION DEL PROCESO DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA EN UNA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELECTRICA CON GENERADOR TIPO ASINCRONO.”

F. 

ING. OSCAR CELÍN GÓMEZ
ASESOR

F. 

ING. RAÚL GARCÍA AQUINO.
JURADO

F. 

ING. JAIME JOEL VARELA
JURADO

DEDICATORIA:

Al fin!..... Terminamos este Trabajo, que parecia nunca acabar!

Bueno, en primer lugar quiero dedicar este triunfo, con el cual culmino este arduo camino académico, a Dios Todopoderoso ya que siempre ha estado a mi lado y me ha dado la fortaleza en los momentos que mas lo he necesitado. sin su presencia no hubiera podido ser posible nada de todo esto. Gracias..!

A la Virgen Santisima, por escuchar todos mis ruegos y por ser compañera en mi caminar, ya que siempre ha estado ahí en el momento justo, en el instante preciso, en el segundo exacto. Gracias..!

A mis padres, ya que gracias a ellos siempre tuve lo que más necesité: Amor, comprensión, Cariño y la oportunidad de ser alguien en la vida. En especial, gracias por tu sacrificio Madre, eres única!

A mis hermanas, por darme compañía, apoyo, comprensión y paciencia (a veces), gracias , no se que hubiera hecho sin ustedes.

A todos mis amigos por su presencia cuando los necesité y darme esas palabras de aliento que nunca están de más. En especial a mis amigos de Emaús (San José De la Montaña) ya que gracias a ellos he logrado acercarme más a Dios.

Por decirme un día: "*Quédate con nosotros por que cae la tarde*"... Gracias!

A Alberto Cea, por habernos ayudado a que este trabajo se hiciera posible. Gracias..!

A la gente de la Compañía Eléctrica Cucumacayán, por la confianza depositada en nosotros.. Gracias..!

Al ingeniero Roberto Carlos Alvarenga (El Padrino), por el apoyo académico brindado a lo largo de la carrera y su amistad sincera.

A toda la "Family" Zeledón, por estar siempre pendientes y brindarme apoyo, cariño y ser ejemplo viviente de unidad.

A Karina por tener tantas cosas en común y por ser así... Gracias!

Al exceso..., ya que "*El Camino del exceso, fuente de saber*"..

¡Eso es todo amigos... Gracias!!!.

Ing. Edgardo José Cruz Zeledón.

DEDICATORIA.

A DIOS : Que mueve toda la energía, centro de sabiduría y amor, que sin su presencia no sería posible nuestra existencia , imaginación y corazón(sentimientos); para seguir en el arduo camino a su reencuentro.

A La Virgen María Auxiliadora y San Juan Bosco : Presencias espirituales que motivan a los jóvenes (de corazón) a creer en si mismos, brindando el constante apoyo, para el continuo aprendizaje, cultivo de buenas costumbres y bondades.

A mis Padres : Francisco Renato y Ana Esther, Cuna de mi vida, por su infinita paciencia, forjándome continuamente en el camino correcto a seguir, sin su fe, comprensión y amor, no hubiesen sido posible él culmino de mi carrera y logros, les debo toda sensación de felicidad que me acontecen y los futuros por suceder (ojalá), siendo el ejemplo perenne a seguir. Gracias, infinitas gracias.

A mi Esposa: Luz de María, por su amor, inmenso amor, que sustenta y motiva toda acción y sentimiento que emana de mi ser (me tenes poseído), enseñándome a luchar y seguir luchando, dejándome saborear con toda su magnitud el calor de su corazón y el sentimiento de paternidad. Ojalá que cuando llegue el final de nuestras vidas sea como el primer día del resto de nuestras vidas.

A mi Hija: Lucy Pamela, gracias mamasita por dejarme conocerte y sentirte durante 9 meses y ver en tu rostro el amor que té profeso y siento para toda la eternidad y que basto solo un momento saber que te encontraremos nuevamente en este camino largo, siempre te llevare en mi corazón.

A mis Hermanos: Francisco José, Ana María, Marco Antonio y Roberto, gracias por soportar tantas molestias, desvelos, que préstame tanto,..y por creer y apoyar el camino elegido, todos los nunca llegan.

A mis Primos, Tios y demás Familia: Que me apoyaron directa o indirectamente, resolviendo mis inquietudes o necesidades en cuanto a suministro de implementos como: Computadoras, transporte, cámaras de vídeo,... etc. utensilios necesarios para él termino de esta tesis, gracias por todo.

A mis compañeros de tesis : Días de borrasca, vísperas de resplandores.

A la familia Guerrero Aguilar : Por su hospitalidad, apoyo y comprensión, soportándonos días enteros. Muchísimas gracias.

A los Amigos , compañeros profesionales y por los grandes hombres de la ciencia: Por esa mano de amistad necesaria en momentos de desafortuno, levantándonos a cada caída, "adonde esta la música... en los cables loco", Einstein, Newton, Maxwell.. haciendo magia, la pura ciencia". Lo que nos mantiene vivos, gracias por todos esos momentos, y no se olviden de vivir la vida en el eterno presente, "no leas el cartel que casi sin querer estamos en camino de fin de siglo en el camino entre los espejismos". Gracias por esa ayuda desinteresada. "Al inocente lo linchan al son de la calumnia....."

DEDICATORIA.

A DIOS TODO PODEROSO por habernos dado sabiduría y entendimiento de realizar este trabajo.

A MIS PADRES Y A MI HERMANA. Por darme la oportunidad de concluir mi carrera y darme animo y apoyo en los tiempos más difíciles.

A MIS AMIGOS. Que me impulsaron a seguir adelante.

Y a todos aquellos que de una u otra manera me motivaron para coronar este triunfo.

INTRODUCCION

La necesidad de optimizar y volver más competitivos los procesos industriales, ha impulsado a buscar diversas soluciones técnicas con el fin de mejorar la productividad y disminuir los costos operativos que implica un determinado proceso. Una solución viable tanto tecnológica como económica, es la automatización, ya que mediante esta se aprovechan al máximo tanto los recursos humanos como técnicos disponibles, aumentando la productividad de la planta, disminuyendo los costos de mantenimiento y mejorando la disponibilidad operativa de la misma.

El presente trabajo de tesis esta enfocado a la automatización del proceso de generación de energía eléctrica dentro de una Pequeña Central Hidroeléctrica (P.C.H.), La generación hidroeléctrica a pequeña escala es una de las formas de producir energía eléctrica más económicas y que menor daño produce al medio ambiente, debido a esto, actualmente las tendencias apuntan a la reactivación de este tipo de centrales, como una solución alternativa a la crisis energética actual. Al controlar en forma automática cada una de las etapas operativas de dicho proceso, se logra optimizar la generación de energía, aprovechando al máximo los recursos existentes y reduciendo las fallas y daños en la maquinaria, asegurando la factibilidad de inversión en tales sistemas, con lo cual se garantiza minimizar los costos de operación, volviendo así rentables este tipo de centrales.

Cabe destacar que dentro del presente documento se hace mención a la Pequeña Central Hidroeléctrica de Sonsonate, ya que esta central ha sido tomada como base con el fin de darle un carácter práctico a este diseño.

El presente trabajo de graduación esta organizado en 10 capítulos en los cuales se desarrollan los lineamientos a seguir para la realización del diseño de automatización en una P.C.H. con generador asincrono . Dichos capítulos son los que se describen a continuación:

Capitulo I: Este capitulo contiene el marco teórico en que se fundamenta esta tesis.

Capitulo II: Aquí se desarrolla la descripción tanto del lugar de trabajo (planta) como del

proceso de generación de una P.C.H. con generador asincrono. Capitulo III: Este

capitulo trata sobre nociones de control automático. Capitulo IV: En este se describen

los principales lazos de control inherentes al proceso de generación y se realiza la

deducción del modelo matemático de la planta. Capítulo V: Aquí se desarrolla el análisis secuencial del sistema de control así como también se determinan los puntos de consigna y las restricciones de las acciones de control a aplicar. Capítulo VI: En este capítulo se determina la estrategia o el tipo de control a utilizar, sobre la base del modelo matemático obtenido y al análisis secuencial del proceso. Capítulo VII: En este capítulo se realiza la selección de los dispositivos de instrumentación y control según las características técnicas requeridas por el proceso. Capítulo VIII: Este capítulo contiene los diferentes diagramas de flujo correspondientes a cada una de las etapas de control a realizar por el autómata programable. Capítulo IX: Aquí se desarrolla el programa de usuario que manejará al autómata programable. Capítulo X: En este capítulo se realiza el análisis económico del diseño, con el cual se determinan los costos que implicarían la implementación de este proyecto.

INDICE

CAPITULO I. MARCO TEORICO.....	1
1.1 Modernización de plantas industriales antiguas.....	1
1.2 Nociones sobre generación hidroeléctrica.....	5
CAPITULO II. DESCRIPCION DEL CAMPO DE TRABAJO.....	20
2.1 Descripción constitutiva de la PCH de Sonsonate.....	20
2.2 Descripción del proceso de generación de la PCH de Sonsonate.....	27
CAPITULO III. AUTOMATIZACION DEL PROCESO.....	35
3.1 Reseña histórica de la automatización.....	35
3.2 Necesidad de un control automático en un proceso industrial.....	37
3.3 Generalidades de control automático.....	38
3.4 Clasificación del control automático de procesos.....	39
3.5 Controladores digitales.....	44
3.6 Controladores lógicos programables.....	45
CAPITULO IV. LAZOS DE CONTROL Y MODELADO DE LA PLANTA.....	54
4.1 Lazos de control requerido en el proceso de generación en una PCH.....	54
4.2 Determinación del modelo matemático.....	58
CAPITULO V. ANALISIS SECUENCIAL DEL PROCESO.....	76
5.1 Identificación de entradas y salidas involucradas en el proceso.....	76
5.2 Esquematación secuencial.....	80
5.3 Determinación de los puntos de consigna de la variables.....	83
5.4 Condicionantes del proceso.....	87
CAPITULO VI. ANALISIS SECUENCIAL DEL PROCESO.....	88
6.1 Control de velocidad.....	88

6.2 Control de nivel.....	97
CAPITULO VII. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONTROL.....	106
7.1 Tipos de señales requeridas.....	106
7.2 Selección del autómeta programable.....	110
7.3 Selección de módulos de entrada y salida del PLC.....	121
7.4 Selección de los elementos periféricos.....	127
7.5 Selección de los dispositivos actuadores de control.....	159
CAPITULO VIII. ALGORITMO DE CONTROL.....	161
CAPITULO IX. DESARROLLO DEL PROGRAMA.....	178
9.1 Parametrización de entradas y salidas marcas y temporizadores.....	179
9.2 Elaboración del programa.....	184
9.3 Organización del programa.....	186
CAPITULO X. ANALISIS ECONOMICO.....	226
10.1 Determinación de los costos.....	226
10.2 Cálculo de costos.....	230
CONCLUSIONES.....	232
ANEXO A.....	235
ANEXO B.....	246
ANEXO C.....	261
ANEXO D.....	263
ANEXO E.....	267
BIBLIOGRAFIA.....	270
GLOSARIO.....	271

CAPITULO I

MARCO TEORICO

Este capítulo trata temas de suma importancia para el desarrollo del presente trabajo de tesis, como lo son: la modernización aplicada a plantas antiguas y la generación de energía hidroeléctrica, los cuales son los campos de aplicación del diseño a realizar.

1.1 MODERNIZACION DE PLANTAS INDUSTRIALES ANTIGUAS

La implantación de control de procesos en la industria puede aplicarse tanto en plantas antiguas como también en nuevas plantas. Estos son casos muy distintos, cada uno con sus peculiaridades y partes comunes. Para el presente proyecto se tomará el caso específico de la modernización de una planta antigua como lo es la P.C.H de Sonsonate, para lo cual es necesario considerar los aspectos que se presentan a continuación.

1.1.1 ASPECTOS A CONSIDERAR PARA LA MODERNIZACION DE LA PLANTA.

Para que la modernización de la planta tenga éxito es necesario resolver muchos problemas, que a pesar de ser parecidos a los que se encuentran en el proyecto de una nueva planta, presentan algunas diferencias. La más importante es el hecho de que la modernización debe ser realizada en un periodo determinado, aprovechando los periodos de paro anuales de la fabrica y con una planta que ya este en funcionamiento.

La modernización de las plantas industriales de proceso es necesaria debido al crecimiento global de las empresas, por lo que la necesidad de sustitución y modificación de los procesos industriales se ha visto forzada por un sin número de factores, entre los cuales figuran como los más importantes; La demanda de productos con especificaciones cada vez más restrictivas y la producción barata y repetitiva de grandes cantidades de materias finales. Estos factores o necesidades son posibles de solventar con la sustitución y modificación de los procesos manuales y mecánicos en la industria en general, por procesos de carácter automático.

Una planta industrial que no se este renovando pierde terreno rápidamente en cuanto a la producción repetitiva, barata y masiva de bienes, con lo cual se corre el riesgo de perder terreno en el mercado.

Ante el hecho de determinar si es justificable realizar la modernización de la planta, pueden plantearse inicialmente pequeños cambios que pueden mejorar sustancialmente el funcionamiento de la planta, tales cambios pueden ser:

- 1- Instalación de un panel de control: En el cual se centraliza el control, permitiendo a los operarios utilizar eficazmente su experiencia y mejorar el proceso sin aplicar técnicas avanzadas de control, a la vez que se capta mejor el estado y los cambios que se presentan en el proceso.
- 2- Cambios locales de instrumentos de lazos críticos de control, por elementos o sistemas que mejoren la velocidad de actuación y control de las variables involucradas en el proceso.
- 3- Fomentar en el personal la necesidad de cambios en la planta.

De esta forma se transformarían las características del proceso, modernizándose hasta cierto punto la forma de producción de la planta.

En una planta en vías de modernización se necesita determinar la forma de como rebajar los costos de producción, como obtener mas flexibilidad en la producción, como mejorar la seguridad de la planta así como las condiciones de trabajo y, como incorporar las nuevas tecnologías a la planta.

Si bien pueden existir muchas soluciones a estas necesidades la solución mas inmediata y mas clara es, realizar la modernización de la planta por vía de la instrumentación y control del proceso, es decir, modernizar la planta a través de la sustitución puntual o global, incluso de la transformación o sustitución total del equipo de instrumentación y control que posee la planta.

En lo que respecta a instrumentación y control es importante considerar los siguientes aspectos:

a) La normalización de los instrumentos: Cualquiera que sea el tamaño de la planta es conveniente considerar dentro de la modernización, la anulación de algunos instrumentos y sustitución por otros nuevos, de otros fabricantes, con el fin de estandarizar y reducir el número de los proveedores de los instrumentos más importante a dos o tres, disminuyendo así el costo de almacenamiento de piezas de repuesto y facilitando el entrenamiento de los operarios.

b) Examen del estado actual de los instrumentos de la planta: Es necesario comprobar cual es el estado en que se encuentra la maquinaria y equipos, con que cuenta la planta a fin de determinar que equipos pueden continuar operando y cuales serán reemplazados, así como también, si alguno de estos necesita ser modificado para que cumpla con los requisitos de la modernización de la planta.

c) Valoración del paso del control manual al control automático: Aunque la inversión que se necesita realizar en la transformación de la planta puede ser elevada, los resultados desde el punto de vista de mantenimiento y producción compensan todo esfuerzo dedicado a la modernización. Como por ejemplo: La sola aplicación de los controladores programables, permite sustituir los armarios clásicos de relees por armarios y pantallas que ocupan un menor espacio y son mucho más versátiles ya que se pueden cambiar la secuencia de operaciones de enclavamientos de los equipos, con solo cambiar los programas correspondientes, operación que en el caso de accionamiento con relees es difícil, cara y tediosa.

1.1.2 PLANIFICACIÓN EN LA MODERNIZACIÓN DE UNA PLANTA.

Para asegurarse de tomar en cuenta todos los aspectos importantes para llevar a cabo la modernización de una planta es necesario realizar una planificación correcta de esta, con el fin de evitar cualquier situación anómala que se pueda dar en el transcurso del proyecto.

Durante la planificación es conveniente definir los siguientes elementos:

- **Objetivos de la modernización:** Es decir la definición de forma clara y concreta de lo que hay que realizar en el proyecto. Deben fijarse los límites de costo y de tiempo de que se dispondrá para la realización del proyecto y, de esta forma asignar los recursos técnicos, humanos y materiales, necesarios.

Algunos de los objetivos referentes a la instrumentación y control de la planta son los siguientes:

- Normalización de los instrumentos, reduciéndose el número de proveedores y modelos.
 - Sustitución de instrumentos que estén discontinuados.
 - Incorporación de sistemas de control avanzado, como lo son: los autómatas programables.
 - Mejora de la seguridad de operación de la planta.
-
- Debe tomarse en cuenta también, las restricciones que se puedan presentar en el proyecto, en lo que respecta al tipo de equipo a modificar o cambiar.
 - **Alcances del Sistema de Control:** Deben fijarse los instrumentos que deben sustituirse o modificarse. En este estudio se debe valorar la decisión de cambiar todo el tipo de control, pasando de la instrumentación clásica convencional a los controladores digitales y adoptar así, sistemas de control avanzado y técnicas de optimización.

La modernización a gran escala de toda la planta puede ser aplicada realmente al estudio de una sola planta completa, como lo es el caso de la P.C.H. de Sonsonate, considerando lógicamente que muchos de los equipos con que esta cuenta se conservaran y que el cambio radical se experimentara en los instrumentos de medición y control.

1.1.3 LINEAMIENTOS TECNICOS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACION EN UNA P.C.H

En el presente trabajo de tesis se tiene como objetivo principal la realización del diseño del sistema de automatización de una P.C.H. Para llevar a cabo tal objetivo es necesario seguir ciertos pasos o lineamientos los cuales tiene un orden lógico determinado y que son indispensables para el diseño de un sistema de control automático en general,

A continuación se mencionan en su orden específico cada uno de los pasos o lineamientos técnicos en los cuales se fundamentara el diseño propuesto:

- Conocimiento de la planta
- Definición del proceso.
- Establecimiento de los lazos de control
- Determinación de las variables de entrada y salida y rangos de operación de estas.
- Deducción del modelo matemático de la planta.
- Establecimiento del tipo de control a utilizar
- Determinación de los tipos de señales adecuadas
- Selección del controlador y equipos de instrumentación
- Establecimiento del algoritmo de control
- Diseño del programa de control

Cada uno de estos pasos serán desarrollados individualmente en el presente trabajo de tesis con el fin de dar forma al diseño de automatización propuesto.

1.2 NOCIONES SOBRE GENERACION HIDROELECTRICA

Debido a que el presente diseño de automatización esta involucrado en el campo de la generación hidroeléctrica, es necesario conocer los tópicos más importantes acerca de esta forma de generación de energía, lo cual se presenta a continuación:

1.2.1 APROVECHAMIENTO HIDRAULICO.

Desde la invención de la rueda hidráulica y su explotación inicial con el uso del molino para elevación o transporte de aguas, hasta las turbinas hidráulicas se inicia o comienza la era de la explotación de los recursos naturales, para el caso el agua, como medio de generación de energía eléctrica, lo cual posibilitó, la invención de los motores eléctricos, en los cuales al invertir el proceso, o sea, por medio del movimiento giratorio de su rotor, se genera o induce energía eléctrica en los elementos conductores que le componen, dicho movimiento giratorio puede ser efectuado por las turbinas hidráulicas.

El desarrollo y aprovechamiento de estos recursos hidráulicos requiere de la concepción, planeación, diseño, construcción y operación de las instalaciones para controlar y utilizar el agua.

A la vez cada proyecto hidroeléctrico se enfrenta a un grupo especial único de condiciones físicas a las cuales debe adaptarse y por tanto los diseños estandarizados o tipificados que lleven a soluciones simples de un manual operativo rara vez son utilizados. Por esto el sistema de automatización no puede ser generalizado a todo proyecto de aprovechamiento hidráulico, siendo enmarcado en un proyecto específico con características de operación definidas como lo es la automatización del proceso de generación de energía eléctrica en una P.C.H con generador tipo asincrono.

Tal aprovechamiento radica en la utilización de la energía cinética o potencial del agua, la cual puede ser aprovechada por la turbina hidráulica, bajo circunstancias o condiciones específicas para tal fin.

La energía hidroeléctrica es uno de los recursos cuantitativamente más importante dentro de la estructura de energías renovables, ya que esta se caracteriza por ser una fuente limpia y autónoma. La naturaleza nos ofrece este recurso de forma gratuita, con solo la construcción de la infraestructura necesaria, se aprovecha el potencial disponible a un costo nulo de combustible.

En Centro América las condiciones climáticas y características topográficas son favorables para la explotación hidroeléctrica. El Salvador, es una zona tropical, que aun

cuenta con una significativa cantidad de recursos hidráulicos, la problemática de explotar estos recursos radica en la imposibilidad de aprovechar el 100% de ellos por varios factores de carácter técnico - económicos, en general:

- Pérdidas de escorrentías inevitables.
- Rendimientos hidráulicos, mecánicos y eléctricos limitados.
- Oscilaciones de caudal que rebasen los límites de turbinación.
- Caudales ecológicos y de servidumbre necesarias para otros usos.
- Imposibilidad de construir centrales de gran envergadura ya que proveen de un impacto ecológico severo en la zona, además de factores técnico - económicos.

A la par de estos factores y la crisis energética actual en El Salvador, se debe hacer aun así, una mejor explotación de este recurso, para alcanzar un equilibrio entre la oferta y demanda de energía eléctrica. En la actualidad existe gran dependencia de los derivados del petróleo y la leña, siendo el primero costoso y el segundo con gran incidencia negativa hacia la ecología. En vista de lo anterior y para la disminución de tal dependencia deben explotarse los recursos energéticos renovables, entre los cuales tenemos:

- Pequeñas caídas de agua
- Energía solar
- Energía eólica.

Estos pueden ser explotados con tecnología accesible, adecuada a la región, material local y mano de obra propia. En el presente trabajo de tesis, se estudiara, como una vía de solución las, pequeñas caídas de agua, ya que existen estudios realizados sobre el tema, tecnología adecuada para su implementación y además de que la utilización de los recursos hidráulicos no explotados poseen distintas vías de aplicación; Entre las cuales tenemos: La Construcción de P.C.H incorporando nuevas tecnologías, poniéndolas en operación en condiciones económicas óptimas, otra aplicación es la rehabilitación de P.C.H, este es el caso de la pequeña central hidroeléctrica de Sonsonate, la cual tuvo que dejar de operar por el envejecimiento de sus instalaciones, sensibles pérdidas de producción e inestabilidad económica, otra alternativa de aplicación en esta área es la automatización de pequeñas centrales

hidroeléctricas en funcionamiento, optimizando su operación, además en este tipo de centrales resulta factible la ampliación de la potencia instalada, desde el punto de vista modular, así el desarrollo de estos recursos con un potencial de futura instalación, no solo tendría un punto de vista importante desde lo energético sino que su puesta en operación, tendría una favorable repercusión en las economías regionales y locales, y en los sectores de la construcción y los bienes de equipo.

1.2.2 CENTRALES HIDROELECTRICAS.

Conjunto de toda instalación formada por máquinas motrices y aparatos de maniobra que utilizan la energía de un caudal de agua, para ser transformada en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica, por un proceso particular. En otras palabras es un sistema de generación que utiliza la energía latente en un caudal de agua determinado, dicho caudal debe de ser procesado o llevado a un estado ideal, debido a que la fuente principal de este, son los ríos o vertientes naturales, que en su recorrido sobre la superficie (terreno), pierden gran parte de su energía cinética, en superar las obstrucciones o barreras que impiden el libre curso del líquido (agua).

Los factores que influyen directamente sobre la reducción de dicha energía, son la reducción de la velocidad de las capas de agua del caudal, que a su vez guarda una relación directa con la pendiente de la superficie en la cual se desplaza y la rugosidad de esta superficie (terreno).

Dicha energía es posible transformarla a energía potencial, derivando o desviando el caudal normal del río hacia un canal con pendiente y rugosidad mucho menor a la del río.

A medida que el canal crece, se logra una diferencia de alturas entre este y el río, la cual crece de forma paralela a la anterior, esto conlleva a que la energía cinética del agua se transforme en gran medida en energía potencial, debido a la altura conseguida, logrando la fuerza necesaria a ejercer sobre las máquinas motrices hidráulicas, convirtiéndose así la energía potencial, a energía mecánica y posteriormente al objetivo final, energía eléctrica, a través de un proceso particular

1.2.3 CLASIFICACIÓN DE LA CENTRALES HIDROELECTRICAS.

Estas se pueden clasificar de la siguiente forma.

A) Según sus fines:

- I) Centrales que suministran directamente trabajo mecánico.
- II) Centrales que suministran energía eléctrica.
- III) Centrales que suministran energía eléctrica y cuyo embalse cumple finalidades, como regadío o suministro de agua, etc.

B) Según el sistema de explotación.

- I) Centrales aisladas o independientes: alimentan una red de consumo particular sin conexión a una red general alimentada por otras centrales.
- II) Centrales Coordinadas: Alimentan una red general de consumo junto a otras centrales ya sean hidráulicas o térmicas.

C) Según el tipo de Embalse :

- I) Centrales sin embalse :Poseen una capacidad relativamente limitada de almacenamiento y solo pueden usar el agua conforme esta llega, derramándose por el aliviadero el agua no turbinada.
- II) Centrales con embalse : Tienen un tamaño suficiente para permitir el almacenamiento de reserva, para la transición de la estación húmeda a la estación seca y desarrolla así un escurrimiento firme, substancialmente mayor que el escurrimiento natural mínimo. Los embalses pueden ser destinados por su capacidad de acumulación a regulación mensual.
- III) De acumulación por bombeo : Su funcionamiento esta basado en el bombeo de agua de nivel de aguas abajo al nivel de aguas arriba, para ello se utiliza la energía sobrante de la red, proveniente de otras centrales conectadas eléctricamente con la central de bombeo. Su mérito estriba en su eficiencia económica, porque convierten energía de bajo valor de tiempo normal, en energía de alto valor para tiempo de demanda máxima.
- IV) Centrales mareomotrices :Aprovechan la energía del mar, utilizando la amplitud de la marea, es decir la diferencia de niveles entre marea alta y marea baja. Aquí se almacena el agua cuando la marea esta alta y se turбина cuando esta baja.

D) Según la Altura Neta y la Potencia.

Esta clasificación es importante ya que es el salto más que ninguna otra característica la que determina el tipo de instalaciones del aprovechamiento hidroeléctrico, obra civil, tipo de turbina, velocidad del grupo y el tipo de alternador. Así se tienen:

- Saltos de pequeña altura : $H \leq 14.99$ m
- Saltos de mediana altura : $15 \leq H \leq 49.99$ m
- Salto de gran altura. $H \geq 50$ m

Según la potencia clasificación convencional y relativa a las posibilidades hidroeléctricas de cada país. En lo que respecta a pequeños aprovechamientos hidráulicos, la clasificación según el salto y la potencia se muestra a continuación. (Ver tabla 1.1)

Clasificación propuesta por la Organización Latinoamericana y del Caribe, según la potencia y el salto.

TIPO DE CENTRAL	RANGO DE POTENCIA (KVA.)	Baja (Mts)	Cabeza Media (Mts)	Alta (Mts)
MICRO	HASTA 50	< 15	15 a 50	> 50
MINI	50 a 500	< 20	20 a 100	> 100
PEQUEÑA	500 a 5000	< 25	25 a 130	> 130

Tabla 1.1. Clasificación según el salto y la potencia.

Las cabezas baja, media y alta corresponden al empleo típico de turbinas axiales, FRANCIS, MICHELL - BANKI y PELTON respectivamente. Los tres tipos de centrales anteriormente mencionados se denominan en general **PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS (P. C. H)**.

Las Grandes Centrales Hidroeléctricas, sobre la base de su capacidad de generación, se ubican o identifican desde 30 MVA hasta 500 MVA.

1.2.4 PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS (P.C.H.).

Este tipo de centrales es de particular interés para el presente trabajo de graduación, ya que el diseño del sistema de automatización va orientado a P.C.H. con generador asíncrono.

Las P.C.H. desarrollaron un papel de relevante importancia en el factor demanda de energía eléctrica en nuestro país. A principios de este siglo, aparecen tales minicentrales hidroeléctricas, las cuales fueron construidas por compañías privadas o particulares.

En 1907 entra en servicio la P.C.H. de “Agua Caliente”, siendo la primera en este genero, en total hasta la fecha, se han instalado 26 P.C.H’s, con una capacidad oscilante entre 30 y 16,000 Kw, situadas en 10 de los 14 departamentos. Otro ejemplo real es el de la Compañía Eléctrica Cucumacayan, S.A. que en el año de 1936, fue puesta en línea su central, con 2 megawatts de potencia, la cual era considerada como una de las más grandes de Centro América, por esta razón cabe mencionar, que las que hoy son llamadas P.C.H, a principios de siglo fueron consideradas como centrales grandes; Dicha central proporcionaba energía a las zonas de Sonsonate, Acajutla, Santa Ana, los municipios de Armenia, Ateos y una parte de la zona de San Salvador.

Por los años 50’s se construyen centrales de gran capacidad como : 5 de Noviembre (1954), Guajoyo (1963), Cerron Grande (1977) y San Lorenzo (1983), este factor desplaza a las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, a la par de factores políticos, económicos y sociales generados por una mala administración, procesos manuales de producción, mantenimiento de maquinaria y equipo no adecuado, y excesivo personal. Causando costos elevados de operación y la no-optimización de los recursos naturales y humanos.

Por otro lado, las Grandes Centrales Hidroeléctricas, en su fase de implementación y desarrollo, necesitan de una gran inversión y presentan ciertas desventajas, acompañadas de un impacto ecológico severo, como los que se nombran a continuación: Frena las corrientes de limo empobreciendo a las tierras, al hacer uso de fertilizantes, aumenta la salinidad del agua, proliferación de enfermedades e inundación

de terrenos. A su vez la creciente necesidad de energía eléctrica, altos costos de generación, dependencia de combustibles (derivados del petróleo). Estos han sido algunos de los factores que entre otros motivan el resurgimiento de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, las cuales presentan un efecto ecológico menor, atienden a zonas pequeñas y cercanas por lo cual los costos de transmisión son neutralizados, y bajo los actuales avances tecnológicos, el uso progresivo de equipos normalizados y el empleo de automatismos y telemandos, contribuye a la racionalización del diseño, de la construcción, rehabilitación y explotación de este tipo de centrales, reduciéndose en gran medida sus costos de explotación. En la siguiente Tabla 1.2 se muestran las P.C.H.'s existentes en nuestro país.

PLANTA	UNIDAD	TIPO DE TURBINA	KVA. GENERADO	CAPACIDAD PLANTA(KW)	CAIDA (Mts)	CONDICION DE SERVICIO
COMPANIA DE ALUMBRADO ELECTRICO DE SANSALVADOR						
RIO SUCIO	1	FRANCIS Vertical	2000	1600	35	OPERACION
	2	//	450	450	35	//
	3	//	450	450	35	//
MILINGO	1	FRANCIS horizontal	300	300	33	//
	2	//	400	300	33	//
	3	//	400	300	33	//
CHORRERON	1	//	137.5	110	47	//
SAN ESTEBAN	1	//	219	175		//
	2	//	200	150		//
ACAHUAPA	1	//	75	60	30	//
	2	//	75	60	30	//
ZAPUYO	1	//	37.5	30	21	//
COMPANIA DE LUZ ELECTRICA DE SONSONATE						
SONSONATE	1	FRANCIS vertical	200	150	8	FUERA DE SERVICIO
BULULU	1	FRANCIS horizontal	250	200	18	OPERACION
	2	//	250	200	18	//
COMPANIA ELECTRICA DE CUCUMACAYAN						
CUCUMACAYAN	1	FRANCIS vertical	1500	1200	83	OPERACION
	2	//	1000	800	83	//
COMPANIA DE LUZ ELECTRICA DE AHUACHAPAN						
ATEHUACILLA	1	FRANCIS horizontal	600	520	57	OPERACION
SOCIEDAD DE MATHEU Y CIA DE C.V.						
LA CALERA	1	FRANCIS horizontal	1000	690	91	OPERACION
	2	//	1000	690	91	//
	3	BANKI expererimen	12.5	10	91	//

Tabla 1.2 P.C.H's existentes en nuestro país.

Además de las antes mencionadas se encuentran las centrales San Luis 1, San Luis 2 y Cutumay en el departamento de Santa Ana, las cuales se encuentran fuera de servicio al haber sido destruidas durante el conflicto armado.

Ventajas De Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

I. Desde el punto de vista económico.

- Son impulsoras del desarrollo y modernización de la producción agrícola, así como la industrialización en las zonas de su instalación
- Debido a sus reducidas dimensiones, su instalación es de bajo costo de construcción, operación y mantenimiento.
- Su instalación cercana a la zona de consumo de energía, produce un ahorro sustancial en cuanto a la transmisión y distribución de los mismos.

II. Desde el punto de vista social :

- Si son destinadas a operar en un ambiente rural, se tiende al desarrollo económico de la zona, mejorando las condiciones de vida de los habitantes.
- Disminuye la inmigración hacia las ciudades

III. Desde el punto de vista técnico :

- Con la implementación de P.C.H automatizadas se adaptarían y se aprovecharían los recursos tecnológicos, a los recursos naturales existentes en el país.
- Fomento de la modernización de plantas antiguas e implementación de nuevas en el ámbito industrial.
- Nivelación o actualización del personal con la nueva tecnología a utilizar, enriqueciéndose la mano de obra, y por ende las condiciones de vida.

IV. Desde el punto de vista ambiental. (ver anexo A)

- En general la generación de energía hidroeléctrica, no hace uso de combustibles fósiles, presentando así un mínimo impacto ambiental.
- No emiten CO₂ a la atmósfera y por tanto evitan el calentamiento terrestre como consecuencia del efecto invernadero.
- No contribuyen a la formación de lluvia ácida
- No dan lugar a la formación de NOx

- No producen residuos tóxicos de difícil o imposible, tratamiento o eliminación.
- Se suprimen radicalmente los impactos originados por los combustibles durante su extracción, transformación, transporte y combustión, lo que incide beneficiosamente en la atmósfera, el suelo, el agua, la fauna, la vegetación, .. etc.

Limitaciones de las P.C.H

- I. La producción de energía puede verse afectada por condiciones meteorológicas y estacionales
- II. La posición geográfica de muchos de los puntos seleccionados para el proyecto presentan difícil acceso.
- III. Impactos principales residuales en el medio ambiente, debidos a la construcción y explotación de la instalación, siendo ellos :
 - Pérdidas de suelo productivo, cobertura vegetal, fauna, .. etc.
 - Disminución de caudal de ríos y arroyos.
 - Impactos sobre el paisaje

1.2.4.1 CLASIFICACION DE LAS P.C.H-

Según su construcción o estructura las P.C.H. se clasifican de la siguiente manera:

a) P.C.H Con Embalse De Acumulación O Pie De Presa

Aprovechamientos hidráulicos que tienen posibilidad de almacenar las aportaciones de un río, mediante la construcción de un embalse. Los caudales de salida son regulados para ser turbinados en el momento que se precisen. También se incluyen las centrales que se sitúan en embalses construidos para otros usos, como son riego o abastecimiento en poblaciones.

Dependiendo de la capacidad del embalse, la regulación puede ser horaria, diaria o semanal. En general esta capacidad de regulación se emplea para proporcionar energía durante las horas pico de consumo.

Las obras e instalaciones necesarias para construir una minicentral al pie de una presa existente son :

- Adaptación de las conducciones de la presa a la minicentral, o construcción de otras nuevas.
- Toma con compuerta y reja.
- Tubería forzada hasta la central.
- Edificio de la central con su equipamiento electromecánico.

Las centrales de acumulación poseen una doble misión:

1. Contribuir a cubrir las puntas de carga.
2. Acumular energía potencial en los periodos de poco consumo.

Ventajas:

- Se adaptan a variaciones diarias de consumo de energía eléctrica.
- Las horas nocturnas son aprovechadas para llenar el deposito de acumulación restituyendo a la red, durante las horas pico, una valiosa energía.
- Protección en caso de avenidas de agua, reteniendo en el vaso las avalanchas producidas por abundantes lluvias, esto es logrado con la debida regulación del nivel.
- Asegura abastecimientos de agua potable, servicios sanitarios o industriales de las ciudades y pueblos que atraviesa el río.

Desventajas:

- La característica de implementación a largo plazo, repercute en la demanda a satisfacer por la capacidad instalada, ya que al momento de concebir el proyecto a una demanda específica, esta no concuerda en el momento de su instalación.
- Alta inversión debida ala construcción del embalse de acumulación, dependiendo tal capacidad de la demanda a cubrir.
- El costo de la obra también depende de la naturaleza del terreno, ya que estos deberán ser impermeables y de gran extinción.

- Inundaciones masivas de terrenos, no convenientes a países de pocos recursos naturales y mucho menos agricultores, además de afectarse el ecosistema al destruir o construir sobre terrenos vírgenes.

b) P.C.H De Hilo De Agua O Agua Fluyente

Las centrales de Hilo de Agua, son aquellas cuyos aprovechamientos constan de una obra de toma, en la cual captan una parte del caudal circulante del río y lo conducen hacia la central para ser turbinado. Posteriormente dicho caudal se devuelve al cauce normal del río.

Dentro de este tipo, hay distintas formas de realizar el proceso. Dependiendo del emplazamiento, puede ser necesario la construcción de todos o de algunos de los siguientes elementos: Azud, toma, canal de derivación, cámara de carga, tubería forzada, edificio de central y equipamiento electro - mecánico y canal de descarga.

Estas centrales se caracterizan por tener un salto útil prácticamente constante y un caudal turbinado muy variable, dependiendo de la hidrología. Por lo tanto en este tipo de aprovechamiento la potencia instalada esta relacionada con el caudal que pasa por el río.

Ventajas:

- Utilizan gran caudal y poca altura
- No poseen embalse de acumulación; por lo tanto la inversión de dicha obra es menor a las de embalse de acumulación.
- Son construidas en el curso mismo del río o en un canal desviado, por tanto no necesitan extenso terreno de construcción, evitando inundaciones en terrenos aledaños, no dañando el ecosistema.
- Su implementación es a corto plazo, por tanto cubren la demanda de energía para la cual fueron diseñadas, y con características modulares pueden incrementar su capacidad en forma proporcional a la demanda.

- La potencia desarrollada por la planta es función de la cantidad disponible de agua del río, aprovechándose al máximo este recurso.
- El diseño de estas debe de ser insensible a variaciones de carga que el sistema al que esta conectado experimente, con lo cual hace factible la adquisición de un gobernador menos costoso, y la implementación de un sistema de control no muy complejo.

Desventajas:

- Capacidad relativamente limitada de almacenamiento y solo pueden usar el agua conforme esta llega, derramándose por el aliviadero el agua no turbinada.
- Hasta cierto punto son adaptables para corrientes que poseen un flujo sostenido durante la estación seca o donde otros embalses aguas arriba proporcionan el almacenamiento necesario.
- Son eficientes solamente interconectadas a la red nacional, siendo hasta cierto punto una limitante para tales sistemas.

Según el tipo de generador, estas pueden utilizar la generación sincrónica o asíncrona, en la generación asíncrona las velocidades de trabajo del grupo turbina generador puede ser mayor o igual a la velocidad de sincronismo y este tipo de generadores son capaces de producir energía eléctrica cuando su estator recibe una tensión determinada, a la vez su acoplamiento a la red (sincronización), no es muy compleja, además de que tal generador es mucho mas barato que el de tipo sincrónico.

En cuanto a la generación sincrónica, estos generadores giran a una velocidad determinada por el número de polos del generador y la frecuencia de la red, la velocidad a la que debe girar el generador es a velocidad sincrónica ya que a dicha velocidad se obtiene la frecuencia nominal requerida (50 a 60 Hz), este tipo de generador provee potencia activa y reactiva a la red, por ello se debe proporcionar la potencia nominal con un factor de potencia aceptable (0.8 a 0.95). De acuerdo a lo

anterior la generación sincrónica implica mayor regulación al momento de lograr la sincronización, por tanto un control más complejo.

Ante el hecho de realizar el diseño de un sistema de automatización para reactivar Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, tal diseño, debe de ir orientado a P.C.H.'s que se acomoden a las características de la red nacional eléctrica, condiciones geográficas del país, capacidad económica de empresas estatales o privadas, condiciones técnicas factibles (que permitan la realización de sistemas de control y monitoreo), de fácil implementación y construcción a corto plazo, satisfaciendo demandas de energía real y futuras, siendo un soporte a las centrales ya existentes.

De esta forma la P.C.H que se tomara como modelo para este diseño será de Hilo de Agua, debido a que estas son fáciles de implementar a corto plazo, al no poseer embalse de acumulación; además dicha inversión no es muy elevada y no consume extenso terreno, lo cual puede repercutir en un país con alto índice demográfico y nivel ecológico deteriorado por mucha deforestación, contaminación ambiental y pocos recursos naturales. Aunque este tipo de centrales algunas veces no poseen mayor capacidad, aprovechan al máximo el agua ya que su potencia depende de tal efecto, esto al automatizar tales sistemas no será más un inconveniente, siendo desde este punto rentables y de soporte a la red eléctrica nacional; al diseñar tales centrales que no sean afectadas por variaciones de carga hace posible gobernadores de menor costo y sistemas de control no muy complejos, por tanto se hace factible su automatización.

El tipo de generación a ocupar, la más adecuada es la asíncrona, ya que también se hace factible su automatización al presentar regulaciones y monitoreo no complejo en cuanto a la sincronización del sistema, además de que tal generador es mucho más barato que el sincrónico, dicha generación a su vez se incorpora con mayor facilidad, sirviendo a la red nacional eléctrica, llegando a lugares no muy accesibles por otro tipo de centrales.

CAPITULO II

DESCRIPCION DEL CAMPO DE TRABAJO

Desde el punto de vista funcional, para que un determinado diseño tenga credibilidad y consistencia practica, este debe estar basado en un modelo real al que pueda aplicarse de forma particular. Para el caso de este proyecto el diseño del sistema está orientado a Pequeñas centrales Hidroeléctricas de hilo de agua que funcionen con generador asíncrono, por lo que es necesario basarse en una P.C.H. especifica que reúna estas características.

En el país existen actualmente varias P.C.H. de las cuales algunas están en funcionamiento y otras se encuentran fuera de servicio. (ver Tabla 1.2)

De estas P.C.H existentes la Pequeña Central Hidroeléctrica de Sonsonate cumple con las características operativas en las cuales se basara el diseño.

Por consiguiente con el fin de ubicar en un contexto real la aplicación de este trabajo, se tomara como referencia practica a esta P.C.H. la cual se describe a continuación:

2.1.DESCRIPCION CONSTITUTIVA DE LA P.C.H DE SONSONATE.

La P.C.H. de Sonsonate es una central de Hilo de Agua, operando con un generador asíncrono. Esta central comenzó sus operaciones a principios del presente siglo utilizando como fuente, el río Sensunapan con un caudal total aproximado de 2150 litros por segundo. Las instalaciones se encuentran localizadas en el centro de la ciudad de Sonsonate a 64 kilómetros de la ciudad de San Salvador.

Esta central es propiedad de la Compañía Eléctrica Cucumacayan S.A. (C.E.C.S.A) la cual financia su rehabilitación, automatización y puesta en operación de la misma.

Esta pequeña central hidroeléctrica esta constituida por equipos y sistemas que se dividen en :

2.1.1 EQUIPOS Y SISTEMAS MECÁNICOS.

- Turbina Francis vertical de cámara abierta.
- Acoplamientos mecánicos
- Compuertas
- Rejillas
- Grúa y teclee para montaje y desmontaje
- Gobernador de los alabes

2.1.2 EQUIPOS Y SISTEMAS ELÉCTRICOS.

- Generador asincrono
- Subestación eléctrica
- Líneas de transmisión
- Bomba de lubricación
- Equipos de protección
- Sistemas de conexión
- Equipos de medición
- Electrovalvulas

2.1.3 OBRAS CIVILES

En el ámbito general se incluyen 4 tipos de obras :

A) Obras de retención

AZUD.

Consiste en un muro dispuesto transversalmente al curso del agua y que no produce una elevación notable del nivel, su función es provocar el remanso en el río para desviar parte del caudal hacia la toma. El agua que no es derivada, vierte por el aliviadero y sigue su curso normal.

El Azud puede ser construido de:

- Hormigón
- Ladrillo
- Escollera o tierra

PRESAS.

Estas provocan una notoria elevación del nivel del río mediante la creación de un embalse. Dependiendo del tamaño del embalse creado se podrán regular las aportaciones. La presa puede ser de varios tipos, clasificadas según la forma de resistir el empuje hidrostático.

1. Presas de gravedad : Cuando el empuje del agua es contrarrestado por su propio peso. En función del material empleado, estas pueden ser de hormigón o de materiales sueltos (de escollera o tierra).
2. Presas de Arco : Cuando se transmite el empuje del agua al terreno a través de los estribos.

Para evitar el peligro que pudiesen causar las avenidas, las presas disponen de los siguientes elementos de seguridad para la evacuación de caudales:

- Aliviaderos de superficie
- Desagües de fondo y medio fondo.

En los primeros, aliviaderos de superficie ; se puede disponer como órganos de regulación y control de nivel, tres tipos de compuertas :

1. De sector
2. De segmento
3. Verticales.

Compuerta de sector : La apertura de estas compuertas se realiza hacia abajo, y el agua vierte por encima de ellas. Por lo que necesitan disponer de un hueco en la presa para alojarse.

Compuerta de segmento : También llamadas compuertas Taintor. Están formadas por una estructura metálica en forma de superficie cilíndrica que gira alrededor de un eje al que esta unido a través de brazos radiales. La apertura se realiza hacia arriba.

Compuertas verticales : Consisten en un tablero de chapa reforzado que es el elemento de cierre y se mueve verticalmente guiado por unas ranuras en los pilares adyacentes. El deslizamiento en las guías ha de vencer el rozamiento que puede ser fuerte debido al empuje hidrostático, en este caso se utilizan “compuertas de vagón” cuyos bordes verticales están provistos de ruedas con rodamientos que apoyan en carriles.

Para los desagües de fondo o medio fondo, se utilizan dos tipos de elementos de cierre que son las válvulas y las compuertas. Las válvulas son propias de desagües para caudales moderados o medios y las compuertas se pueden utilizar para todo tipo de caudales.

La P.C.H de Sonsonate posee un dique o presa. La presa a diferencia del Azud provoca una notoria elevación del nivel del río, cuyo objetivo es :

1. Regular el caudal del río.
2. Asegurar el abastecimiento de agua para la generación
3. Garantizar el volumen del liquido aun en épocas de escasa lluvia.

La P.C.H de Sonsonate posee esencialmente una presa derivadora que consta de rejillas para filtrar los desperdicios sólidos arrastrados por el río y compuertas verticales.

OBRAS DE TOMA.

Toma o ensanchamiento al inicio del canal, facilita la entrada del agua retenida por el Azud o Presa, y esta diseñada para que las pérdidas de carga producidas sean mínimas. La toma dispone de unas rejillas que impiden la entrada de elementos sólidos (que podrían dañar a las compuertas direccionales y a los alabes de la turbina) al canal, y una compuerta, para interrumpir la entrada de agua y proceder al vaciado, limpieza o reparación de las conducciones.

OBRAS DE DERIVACION.

■ CANAL O CONDUCTOS DE AGUA.

EL caudal derivado debe ser conducido hasta la cámara de carga, esto se realiza a través de un canal abierto o cerrado. En la P.C.H de Sonsonate dicho canal es abierto y mide aproximadamente 264 metros de largo, por lo general estos tipos de canales constan de 2 partes :

1. Transporte de agua presión atmosférica. (Canal)
2. Transporte de agua a presión.

Este canal por lo general sigue las líneas de nivel con una ligera pendiente (aproximadamente de 0.5 mm), en un trazado se debe procurar el mínimo movimiento de tierras posible, adaptándose al terreno.

La sección transversal a adoptar dependerá de la clase del terreno : Habitualmente, para canales en roca se utiliza la sección rectangular y para canales en tierra se utiliza la sección trapezoidal.

En algunas ocasiones antes de la cámara de carga se puede localizar un desarenador, depósito de dimensiones adecuadas para producir la decantación de arena y otros elementos extraños que puedan ser arrastrados por el agua del canal, por una parte, además este sirve de unión entre la tubería de presión y el canal, por ser un conducto diferente, este debe cumplir las siguientes condiciones:

Debe ser:

- Bastante ancho y profundo, para que la velocidad del agua baje.
- Bastante largo para que una partícula en suspensión posea tiempo para caer hasta el fondo del tanque.
- Amplio en la parte central para que las arenas depositadas en un periodo de operación continua (ya sea una semana, un mes, etc.), no reduzcan apreciablemente el área transversal y se produzca un aumento de velocidad.
- Provisto de un dispositivo que permita la limpieza y evacuación del vaso.
- Capaz volumétricamente hablando, para suministrar el déficit de agua cuando las maquinas necesitan un caudal mayor que el conducido, procurando que el nivel del tanque no descienda abajo de la marca de seguridad.
- Provisto de un vertedero lateral para dar salida al agua, en caso de cierre de las compuertas de las turbinas por perdida de carga y evitando que el agua del canal baje en su velocidad y se dificulte su adaptación al régimen normal posterior.

CAMARA DE CARGA.

Dispositivo localizado al final del canal, en algunos casos se utiliza como dispositivo final de regulación, aunque normalmente posee solo capacidad para suministrar el volumen necesario para el arranque de la turbina sin intermitencia.

Cuando la central no esta generando, el agua no turbinada es vertida por la cámara de carga, por lo cual esta debe poseer una zona de aliviadero y ensanchamiento hasta su reintegración al río.

La geometría de la cámara de carga debe diseñarse para minimizar las perdidas de carga y evitar los remolinos tanto si se inician aguas arriba o en la propia cámara de carga. La cámara de carga de la P.C.H. de Sonsonate posee forma cilíndrica con una altura de 6 metros y capacidad de 150 metros cúbicos, para habilitar el paso de agua hacia esta, se conecta a una compuerta mecánica operada manualmente. Ya que esta central posee una turbina Francis de cámara abierta, se prescinde de tobera de presión.

OBRAS DE LA CENTRAL.

Casa de maquinas, es la instalación o edificio donde se alojan los equipos hidráulicos y eléctricos de la P.C.H.

La casa de maquinas de la P.C.H. de Sonsonate es una edificación de 15 metros de altura aproximadamente con una superficie de 150 metros cuadrados, localizada junto a la cámara de presión, se encuentran alojados el grupo turbina - generador los cuales se describen a continuación :

Turbina: El tipo de turbina existente en la central es una turbina Francis Vertical de cámara abierta la cual trabaja a una velocidad de sincronización de 720 r.p.m. , la caída bruta de agua en la turbina es de 4mts y el caudal de diseño es de 4.5m^3 .

Generador: El generador que posee la P.C.H de Sonsonate es de tipo asíncrono con eje horizontal el cual está acoplado directamente a la turbina y trabaja a la misma velocidad de esta. La potencia nominal entregada por este es de 150KW a un voltaje de 440V y una frecuencia de 60Hz.

El hecho de que el generador de esta P.C.H. sea tipo asincrono presenta ciertas ventajas de carácter técnico como económico; entre las cuales se pueden señalar:

- El acoplamiento a la red se efectúa sin ningún riesgo de oscilaciones debido a que es la misma red la que fija la frecuencia de la corriente activa que el generador asincrono le proporciona
- El generador asincrono posee un funcionamiento no autónomo ya que su corriente de magnetización la toma directamente de la red.
- El control directo sobre la velocidad del generador asincrono es bastante económico y muy poco complicado ya que solo basta detectar una velocidad superior y cercana a la del sincronismo para asegurar que el sistema esta generando y no consumiendo potencia de la red.

- El costo del generador asincrono es mas bajo que el sincrono.

Desventajas:

- Cuando ocurre un fallo en la red ya sea por descenso de carga o desconexión, en el generador asincrono bajo carga, se puede dar el caso o el peligro de que la máquina actúe como un motor y no como un generador (motorización).
- Para efectuar la generación es necesario que exista una tensión determinada en la red a la que va hacer conectada.

En la figura 2.1 se muestra el diagrama de bloques de los elementos que conforman la P.C.H de Sonsonate.

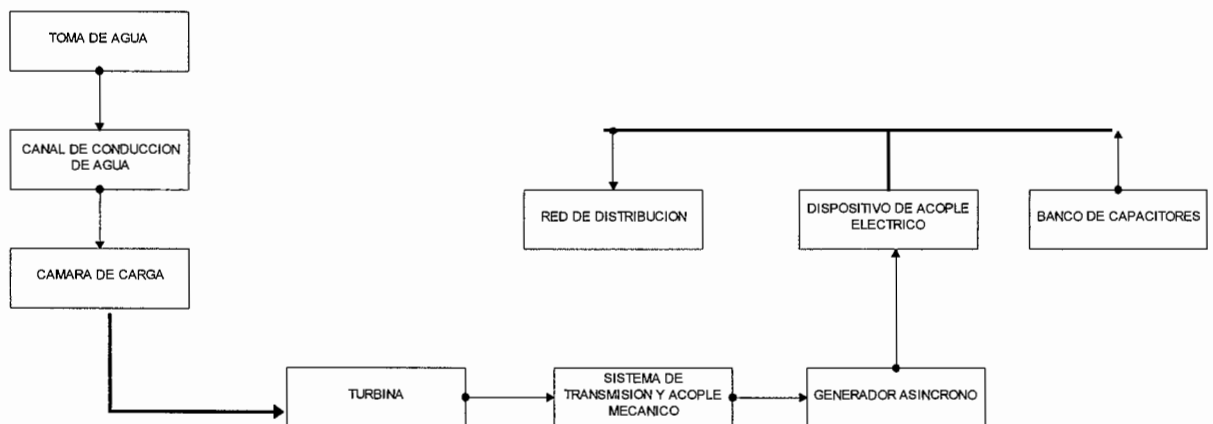


Figura 2.1 Elementos que conforman la P.C.H. de Sonsonate.

2.2 DESCRIPCION DEL PROCESO DE GENERACION DE LA P.C.H.DE SONSONATE

Ya descritas las partes constitutivas de la central, se describirá a continuación el proceso de generación de energía eléctrica en la P.C.H. de Sonsonate.

Para poder realizar el diseño del sistema de control automático de un determinado proceso es necesario conocer con certeza, todos los procedimientos o actividades que deben de llevarse a cabo en cada una de las etapas que a este compone.

Para el caso específico de la Pequeña Central Hidroeléctrica de Sonsonate el proceso de generación de energía eléctrica consta de las siguientes etapas:

- Etapa preparación para el arranque del sistema
- Etapa de sincronización
- Etapa de conexión
- Etapa de Plena Carga
- Etapa de operación o generación.

Las cuales se describen a continuación:

2.2.1 PREPARACION PARA EL ARRANQUE DEL SISTEMA: En esta etapa se realizan las acciones de preparación requeridas para que el sistema pueda comenzar a operar. Para arrancar el sistema primero se debe proceder a abrir la compuerta que da paso al agua hacia la cámara de carga.

En esta etapa es necesario verificar que todas las condiciones de las variables del proceso se encuentran en sus valores normales.

Por lo que es necesario chequear:

- Que el nivel en la cámara de carga este en el rango de operación
- Que las temperaturas en la turbina y generador estén en sus valores normales.
- Que los alabes del distribuidor estén completamente cerrados.
- Que exista voltaje en la red de distribución.
- Nivele de aceite en la turbina adecuado.

Luego de haber verificado todas las condiciones anteriores, se procede a la activación de las electrovalvulas que dan paso al agua de enfriamiento de la turbina y a la

activación de la bomba de aceite de lubricación de la turbina la cual hace recircular el aceite en el interior de esta.

Habiendo realizado estos procedimientos se puede pasar a la siguiente etapa que es la de sincronización.

2.2.2 ETAPA DE SINCRONIZACION: En esta etapa el objetivo principal es llevar la velocidad del eje turbina generador hasta la velocidad de sincronismo (720 r.p.m.). Esto se logra de la siguiente forma:

Primero se deben tomar las precauciones siguientes:

- Chequear de que la bomba de aceite este activada.
- Revisar que exista flujo de agua en las tuberías de enfriamiento de la turbina.
- Chequear que los alabes del distribuidor estén cerrados completamente.

Habiendo chequeado esto se procede a la apertura de forma pausada (no continua) de los alabes del distribuidor de tal forma que la velocidad en el eje de la turbina aumente poco a poco hasta alcanzar la velocidad de sincronización (720 r.p.m.), hecho lo anterior se puede pasar a la etapa de conexión.

2.2.3 ETAPA DE CONEXION: En esta etapa se realiza la conexión del generador con la red de distribución. Esta conexión se lleva a cabo una vez que la velocidad en el eje turbina-generador ha alcanzado las 720 r.p.m.

Para realizar la conexión deben de revisarse las condiciones siguientes:

- La existencia de voltaje en la red de distribución
- Nivel óptimo de operación en la cámara de carga.
- Nivel de aceite suficiente.
- Temperaturas en la turbina y generador en su rango permisible.
- velocidad del eje de la turbina de 720 r.p.m.

Dadas estas condiciones se activa el contactor principal de conexión a la red.

Realizada la conexión se pasa a la etapa de plena carga.

2.2.4. ETAPA DE PLENA CARGA: Una vez conectado el generador a la red de distribución este se encuentra entonces en condiciones de iniciar el proceso de tomar carga. Por lo que se procede a aumentar la potencia generada por esta abriendo paulatinamente los alabes del distribuidor.

En esta etapa los alabes se continuaran abriendo pausadamente (se continuara incrementando la potencia) hasta el punto en que se produzca cualquiera de las condiciones siguientes:

- Al producirse el nivel de agua mínimo de operación en la cámara de carga.
- Al llegar el sistema a plena carga o sea a la máxima potencia que este puede generar (150Kw).
- Al producirse la máxima apertura en el distribuidor sin haber llegado a la máxima potencia que el sistema puede generar

Al pasar esta etapa, el sistema se encuentra en operación generando a la máxima carga permisible por las condiciones operativas del proceso.

2.2.5. ETAPA DE OPERACION: En esta etapa el sistema se encuentra generando, por lo que debe chequearse permanentemente que las condiciones de las variables estén en los rangos de operación requeridos por la central. En esta etapa la idea es que el sistema genere a la máxima potencia permisible por las condiciones de proceso.

Al presentarse alguna anomalía, debe de procederse a realizar la acción de control respectiva o la desconexión total o parcial del sistema dependiendo de las circunstancias del caso.

2.2.6 DESCONEXION DEL SISTEMA

Durante el proceso de generación en la P.C.H. existe la posibilidad de que se necesite realizar una desconexión total o parcial del sistema debido a que por alguna anomalía la central no puede seguir generando.

A continuación se presentan las dos rutinas de desconexión que pueden ocurrir en el proceso de operación de la P.C.H.:

- PARO TOTAL DEL SISTEMA
- DESCONEXION PARCIAL DEL SISTEMA POR FALTA DE VOLTAJE EN LA RED

2.2.6.1 PARO TOTAL DEL SISTEMA

Este es realizado cuando es necesario parar el sistema completamente y puede ser provocado ya sea por alguna condición crítica en el sistema (paro de emergencia) o por que se debe realizar alguna rutina de mantenimiento preventivo en la central (paro de mantenimiento).

El procedimiento a seguir para lograr parar completamente el sistema es el siguiente:

Estando la P.C.H. en operación se procede a cerrar de forma continua los alabes del distribuidor hasta un valor de apertura igual o ligeramente mayor a la apertura en que se realizó la conexión del sistema, con esto se asegura que al desconectar el generador de la red, la velocidad de la turbina no sobrepase demasiado la velocidad de sincronía, esta acción se realiza debido a que al quedar el generador operando en vacío se produce un sobreimpulso o incremento de velocidad el cual es proporcional al porcentaje de apertura de los alabes.

Luego de haber cerrado los alabes del distribuidor hasta el valor de apertura requerido se procede a la desconexión del interruptor de transferencia el cual desconecta al generador de la red de distribución; desconectado el generador se continúan cerrando los alabes hasta su cierre total.

Hecho esto se espera el tiempo necesario para que se estabilice la velocidad de la turbina a una velocidad relativamente baja, transcurrido ese tiempo se aplica un freno al volante de la turbina para detener totalmente la maquina.

Causas que originan el paro total del sistema:

- Nivel crítico del agua en la cámara de carga
- Alta temperatura en las chumaceras de soporte del eje de la turbina o en los soportes del generador.
- Nivel de aceite de la turbina bajo

NIVEL CRITICO DEL AGUA EN LA CAMARA DE CARGA: En una turbina se logra obtener una buena eficiencia cuando la carga con la que trabaja se mantiene el mayor tiempo posible en su valor nominal de operación y con una apertura del distribuidor de tal forma que la velocidad relativa sea tangente a la geometría de los alabes.

Cualquier cambio en la carga de agua hace variar tanto la magnitud como la dirección de la velocidad relativa, disminuyendo la eficiencia de la máquina. De lo anterior se deduce que independientemente del grado o porcentaje de apertura que tenga el distribuidor, se debe mantener el nivel en la cámara de carga en un rango de operación óptimo para asegurar así la eficiencia del sistema.

Por lo tanto el descenso del nivel en la cámara de carga de la P.C.H. puede llegar hasta un punto tal en el que la potencia resultante del proceso de generación sea obtenida con una eficiencia tan baja en la que ya no conviene mantener en operación la P.C.H.

Al valor de nivel de la cámara de carga en el que se origina este problema se le llama nivel crítico y es a partir del cual se produce el paro total del sistema.

TEMPERATURA EXCESIVA EN CHUMACERAS: Las chumaceras son los elementos de apoyo en los cuales una superficie se mueve apoyada en otra superficie realizando un movimiento desplazante.

En una P.C.H. su aplicación es la de apoyar el eje de transmisión turbina-generador. Entre los requisitos que debe cumplir un buen cojinete son los siguientes:

- Sostener cargas de apoyo
- Ser resistentes al desgaste y a las deformaciones

-Reducir la fricción

-Alojar un lubricante para aislar las 2 superficies de su contacto directo.

Debido al movimiento rotatorio de la turbina, el cojinete siempre está sujeto a la generación de calor interna. Cuando se exceden las temperaturas de diseño de las chumaceras, las propiedades de los lubricantes utilizados comienzan a cambiar por efecto de la actividad química del mismo.

Alcanzada la temperatura excesiva del lubricante las partículas menos pesadas de este, logran escapar hacia el exterior, reduciéndose cada vez la cantidad de lubricante dentro del cojinete y posibilitando la fricción directa con el eje rotativo; por lo cual al ocurrir esta situación es necesario tomar las acciones requeridas para evitar el deterioro del cojinete y en el peor de los casos que pueda ocurrir algún daño físico en el eje de transmisión o en la turbina.

Por lo tanto cuando la temperatura en la chumacera alcanza un valor tal que supera los límites de operación es necesario realizar el paro total del sistema de la P.C.H.

ALTAS TEMPERATURAS EN TURBINA O GENERADOR: Pueden ser producidas por fricción en los engranajes, rozamiento en las partes giratorias, falla en la bomba de lubricación. Las altas temperaturas pueden hacer que las partes involucradas presenten un desgaste severo.

NIVEL DE ACEITE BAJO: Esta situación puede ocurrir si la bomba de lubricación no trabaja correctamente o por la existencia de fugas de aceite en la turbina.

2.2.6.2 DESCONEXION PARCIAL POR FALTA DE RED

Esta desconexión se realiza en el caso de producirse la ausencia de voltaje en la red de distribución, cuando la P.C.H. esta generando.

Al producirse la ausencia de voltaje en la red es imposible que la máquina asíncrona siga generando, esto es debido a lo siguiente:

Cuando la P.C.H. se encuentra operando normalmente el generador se encuentra acoplado a la red de distribución. Debido a este efecto de acoplamiento entre la red y el grupo turbina-generador, la turbina se mantiene a una velocidad cercana a la de sincronismo, aun cuando se varíe la posición de los alabes del distribuidor, arriba de la apertura de conexión.

Al ocurrir la ausencia de voltaje en la red de distribución el generador queda operando en vacío ocasionando que la turbina se acelere a una velocidad mucho más alta que la de sincronismo, pudiendo ocasionar esto el desboque de la turbina lo cual produciría daños considerables del sistema de la P.C.H.

Al producirse la falta de voltaje en la red cuando la central esta generando se debe realizar el procedimiento siguiente:

Primero se debe desconectar el interruptor de transferencia el cual conecta al generador con la red de distribución, esto se realiza por seguridad del sistema, para evitar que se motorice el generador al normalizarse la falta de energía en la red.

Habiendo realizado la desconexión del generador se procede a cerrar completamente los alabes del distribuidor con el fin de desacelerar la turbina y llevarla hasta una velocidad menor a la velocidad de sincronismo, a la que permanecerá hasta que se de la normalización del voltaje de la red y se pueda activar nuevamente el sistema

Todos los procedimientos anteriormente expuestos deben de ser llevados a cabo en su orden cronológico, para llevar a cabo la puesta en marcha de la P.C.H.

Anteriormente para que todo estos procedimientos operativos se pudiesen realizar de una forma manual la P.C.H de Sonsonate contaba con un personal constituido por: 16 trabajadores, cuya distribución por puesto era:

- 4 Operarios de maquina (maquinista)
- 4 Ayudantes de maquinista
- 4 Operarios de subestación.
- 4 Parrilleros.

CAPITULO III AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS

3.1 RESEÑA HISTORICA DE LA AUTOMATIZACION.

La revolución industrial en 1780, comenzó con un aumento de la producción a través del “automatismo” de los procesos de fabricación, tratando de depender cada vez menos de la productividad humana.

La estructuración de la disciplina “automatismo” se concreta o establece en los años 30 y 40 de este siglo; ya que en 1934 Hazen introdujo el termino servomecanismo, ocupándose tal concepto por esta época, de forma exclusiva en sistemas de control realimentado, en el cual la salida del sistema es un elemento mecánico sea posición, velocidad o aceleración. Con este tipo de dispositivos se cristaliza el concepto de retroalimentación. Lazo o bucle de control, base de la automatización.

Esta técnica basada en servomecanismos, pronto encuentra su aplicación a diversos tipos de procesos, bajo un denominador común tecnológico, todas estas técnicas comparten un modo peculiar de codificar la información. Esta se representa mediante magnitudes físicas (electricidad, señales neumáticas o hidráulicas) de forma que el valor tomado por una magnitud representa el de la señal que se trata de representar; a este tipo de representación se le denomina “Analógica”.

Durante la década de los 40's los métodos de respuesta en frecuencia posibilitan el diseño de sistemas lineales de control de lazo cerrado capaces de lograr un comportamiento requerido. A principio de la década de los 50's Evans desarrollo el método del lugar de las raíces, a estas técnicas basadas en el dominio de la frecuencia se le llamo teoría de control clásico.

Hacia 1940 aparece el controlador neumático permitiendo el control del proceso, el operador se ausentaba de esta forma de la vigilancia continua de los valores de las variables y accionamiento manual de las válvulas.

Entre los años cincuenta y sesenta se desarrollan instrumentos electrónicos a válvulas, llegándose a la miniaturización de los mismos. Esto comienza a presentar problemas al operador debido al elevado número de las variables y válvulas a monitorear y controlar, y a la longitud del panel de control. Colapsando paulatinamente la era analógica. Ya por esos años, alternativamente se desarrolla una nueva tecnología para la implementación y tratamiento de la información: Las técnicas digitales.

A finales de la década de los años 50 y principio de los 60's aparecen los primeros computadores prácticos digitales, en 1959 un grupo de ingenieros de la empresa Thompson Ramo Woolridge y Texaco diseñaron un sistema de control por computador de una unidad de polimerización, en la cual se controlaban 26 flujos, 72 temperaturas, 3 presiones y 3 composiciones. Se trataba de determinar una distribución óptima de las alimentaciones de 5 reactores, minimizando la presión en los reactores, controlando los suministros de agua caliente a partir de medidas de la actividad de los catalizadores y determinando la recirculación óptima.

Aunque hacia los años 60's, aparecen en el mercado los ordenadores digitales que empiezan a aplicarse en la industria, inicialmente en el control digital discreto (D.D.C), el ordenador sustituye al instrumento controlador efectuando cálculos, de acuerdo con las acciones de control deseadas y enviando las correspondientes señales de salida a las válvulas de control.

El problema presentado por el D.D.C es el fallo de sus componentes perdiéndose el control total sobre la planta; por esto era necesario la instalación de otro ordenador ante tal percance, solución cara que podía ser efectuada solo por grandes empresas.

A mediados de años 60's y para lograr una seguridad en el control digital directo, el computador calcula puntos de consigna más convenientes para el proceso y los envía a controladores individuales, así si el computador falla el controlador puede continuar regulando en el último punto de consigna, este tipo de control se denominó control de puntos de consigna (S.P.C).

La adición de los microprocesadores a los instrumentos permite añadir el término inteligente a los equipos de control y monitoreo permitiendo funciones de medición precisa, registro o control.

En los últimos años ha experimentado un gran auge los sistemas de control descentralizado y jerarquizado, implementándose sistemas de transmisión de datos.

La Robótica constituye un campo de aplicación con enormes posibilidades, en general este y otros tipos de movimientos representa un impulso considerable al desarrollo de la Teoría de Control.

3.2 LA NECESIDAD DE UN CONTROL AUTOMATICO EN UN PROCESO INDUSTRIAL.

La implementación del control automático de procesos industriales es hoy en día una actividad que posee cada vez mas un carácter multidisciplinario ya que puede ser aplicada a cualquier tipo de industria y en la que intervienen además aspectos técnicos, científicos y económicos.

Por consiguiente ,la continua evolución de la tecnología ha logrado en la actualidad un notable desarrollo de los instrumentos y aparatos utilizados para el control de procesos, produciendo sistemas y formas de control cada vez mas perfeccionados los cuales pueden ser aplicados a las diferentes necesidades de los procesos en la industria; un caso de aplicación específico puede ser en el proceso de generación en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

Para el caso de una P.C.H la medición y el control de las variables del proceso son muy importantes tanto desde el punto de vista del perfecto funcionamiento de operación del proceso como también del punto de vista del aprovechamiento de los recursos utilizados en este.

De lo anterior para lograr producir energía eléctrica con un alto rendimiento en una P.C.H es necesario la continua vigilancia de las variables del proceso y mantener dichas variables dentro de sus rangos de operación normales. Ante tal necesidad se establece como una solución practica, el controlar automáticamente o automatizar dicho proceso industrial, puesto que las condiciones de operación indicadas son muy difíciles de conseguir de manera optima realizando exclusivamente un control manual en la planta

(P.C.H), ya que para lograr esto se necesita de un personal numeroso ocasionando costos operativos altos, que hacen insostenible económicamente a la central.

Con la automatización de una P.C.H. se obtienen los siguientes beneficios:

- Reducir los costos de operación y mantenimiento
- Aumentar la seguridad de los equipos
- Optimizar el aprovechamiento de los recursos de la central.

Haciendo con esto rentable el proceso de la central.

3.3 GENERALIDADES DEL CONTROL AUTOMATICO.

El control automático de procesos es un caso particular del termino automatización. El cual se puede definir como “el control automático de las diferentes etapas de un determinado proceso mediante el uso de equipo y maquinaria especializados con el fin de ahorrar trabajo manual y esfuerzo mental”.

Para el caso particular del presente trabajo de graduación, la aplicación del control automático de procesos se enfoca al proceso de generación de energía eléctrica en una P.C.H con lo cual se pretende realizar las diferentes operaciones involucradas en el proceso, de una forma automática, contando con un nivel mínimo de personal.

Toda automatización de procesos se basa en el concepto de lazo o bucle de control de retroalimentación el cual consta de las siguientes etapas (ver fig. 3.1).

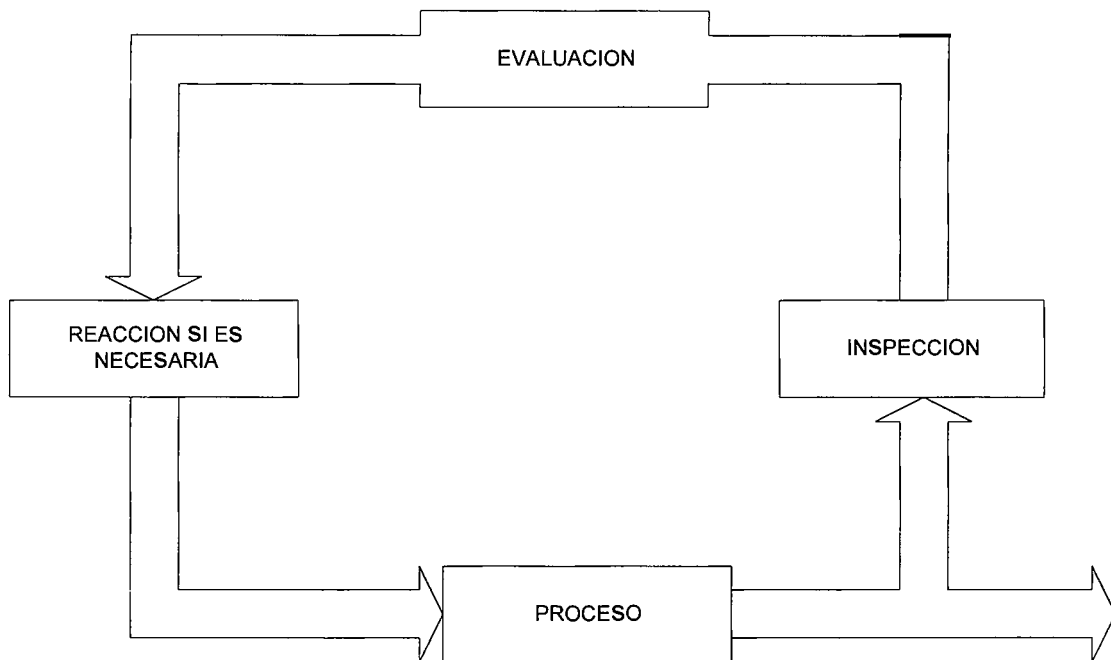


Figura 3.1 Diagrama de bloque de un lazo de control

Inspección: Consiste en captar las variables del proceso (nivel, temperatura, velocidad, etc.) a través de un elemento de medida. En un proceso industrial es de suma importancia el monitoreo constante de las variables que en este intervienen.

Evaluación: Es la comparación de la variable del proceso con el valor deseado o punto de consigna y elaboración de la señal de corrección o de control.

Respuesta: En el caso del control de procesos, la respuesta será requerida si el valor de la variable no se encuentra entre los límites de operación del proceso.

3.4 CLASIFICACION DEL CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS.

El control automático de procesos se divide en dos tipos: Control de Orden de los Eventos y Control de las Variables Físicas. Los cuales se detallan a continuación.

3.4.1 CONTROL DE ORDEN DE LOS EVENTOS Y SISTEMAS SECUENCIALES

Este tipo de control es aplicable cuando en un proceso existe una secuencia lógica de eventos a realizar, para el caso, en el proceso de generación de energía eléctrica en una P.C.H cada etapa (preparación para el arranque, sincronismo, conexión, plena carga y operación); conlleva una secuencia lógica de eventos, los cuales se detallaron en el capítulo II.

Para poder aplicar este tipo de control en un proceso, es necesario tener conocimiento exacto de todas las actividades que se realizan así como la secuencia de estas para cada etapa del proceso, además de las condiciones que deben de cumplirse para que cada evento sea realizado. Ya que, al existir una rutina de eventos definida, resulta de gran facilidad convertir o transformar dicha actividad en un sistema automático.

Los controladores basados en eventos, utilizan la finalización de uno de los eventos como referencia, para la realización del siguiente; iniciándose así una reacción en cadena, la conclusión de la cadena depende de la conclusión de cada enlace individual.

Los sistemas secuenciales son la base del control del orden de los eventos y se definen como todo sistema que posea un orden lógico de acuerdo a una sucesión de eventos o estados, los cuales permiten o condicionan al proceso para poder tomar una u otra acción.

Para analizar estos sistemas, es necesario construir el diagrama de estados del proceso el cual parte de un estado inicial y especifica las condiciones necesarias para poder pasar de un estado a otro. En la figura 3.2 se muestra un diagrama de estados típico donde los círculos representan un estado específico, y las flechas determinan la dirección a seguir en el proceso de acuerdo a las condiciones que en este ocurran.

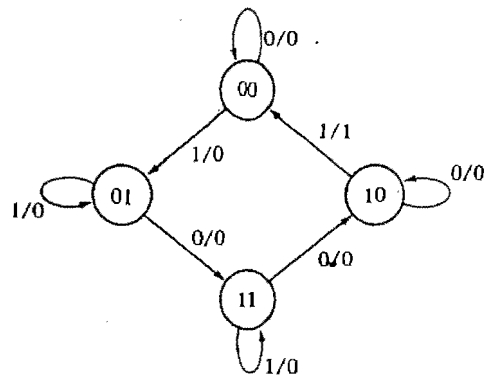


Figura 3.2 Diagrama de estados típico de un sistema secuencial

Este tipo de sistema es de carácter asincrónico, lo cual significa que la ocurrencia de los eventos no se da por que haya transcurrido un intervalo de tiempo, sino por que se han cumplido determinadas condiciones en el proceso.

Para obtener un diagrama de estados adecuado, se necesita identificar las variables inherentes del sistema, estas variables son:

- Variables de entrada: Son todas aquellas que condicionan la dirección del proceso y generan las respectivas variables de salida del sistema.
- Variables de salida: Son el resultado de la combinación de las variables de entrada en un determinado momento de la secuencia del proceso, es decir que estas ocurren cuando existe el estado de la combinación lógica que las provoca.

Además en este tipo de sistemas es necesario tomar en cuenta las restricciones y condiciones inseguras que se puedan generar en cualquier momento en el proceso.

En síntesis para desarrollar el control secuencial de algún sistema cuyo proceso sea repetitivo como es el caso de una P.C.H. ,es necesario determinar las condiciones de entrada del sistema, sus respectivas variables de salida así como también las restricciones que el proceso implica, y de esta forma establecer el diagrama de estados del sistema.

Las ventajas que implica, el aplicar este tipo de control en el proceso de generación de energía eléctrica de una P.C.H, son:

- Reducción significativa del personal encargado de la ejecución de dicho proceso.
- Mejor precisión en las acciones repetitivas de la central
- Mayor seguridad en la operación, ya que la secuencia normal del proceso se detendrá, en el momento que se presente un problema, realizándose la acción correspondiente de corrección.
- Acción ininterrumpida del controlador, lo cual asegura el continuo servicio en la producción de energía eléctrica.

3.4.2 CONTROL DE LAS VARIABLES FISICAS.

En este tipo de control se realizan tanto las funciones de supervisión como las funciones específicas de control de un determinado proceso.

Las funciones de supervisión incluyen la comprobación de los límites de tolerancia de las variables del proceso y el estado de estas en tiempo real, lo cual es de suma importancia en las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, donde es necesario verificar constantemente las variables como: Nivel de la cámara de carga, temperatura en chumaceras, velocidad del eje en el aparato turbina generador, posición de los alabes en el distribuidor, etc.

En lo que respecta a las funciones específicas de control, el controlador genera automáticamente señales de control sobre el proceso con el objeto de que el funcionamiento de este sea el requerido.

En estos tipos de sistema o de control, la detección de errores requiere que la salida se sustraiga del valor de entrada para lo cual se utiliza la retroalimentación negativa. El controlador tiene conocimiento de los resultados de sus propias acciones, ya que son sistemas de lazo cerrado.

3.4.2.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VARIABLES FISICAS BASICO.

El control de variables físicas en la industria se basa en esencia, en la existencia de tres instrumentos : El Sensor, El Controlador y el Elemento Final de Control. (los cuales se muestran en la figura 3.3)

El Sensor: Toma una muestra de las variables físicas del proceso convirtiéndola a una señal neumática o electrónica según se requiera, la cual es enviada hacia el receptor (Indicador, Registrador o Controlador).

El Controlador: Compara el valor recibido de la variable(enviado por el sensor), con el valor determinado o punto de consigna; y de dicha comparación determina el valor de corrección necesario, el cual es transmitido hacia el elemento final de control.

Elemento Final de Control: Es el que ejecuta la acción de control necesaria para transformar o cambiar el valor de la variable medida.

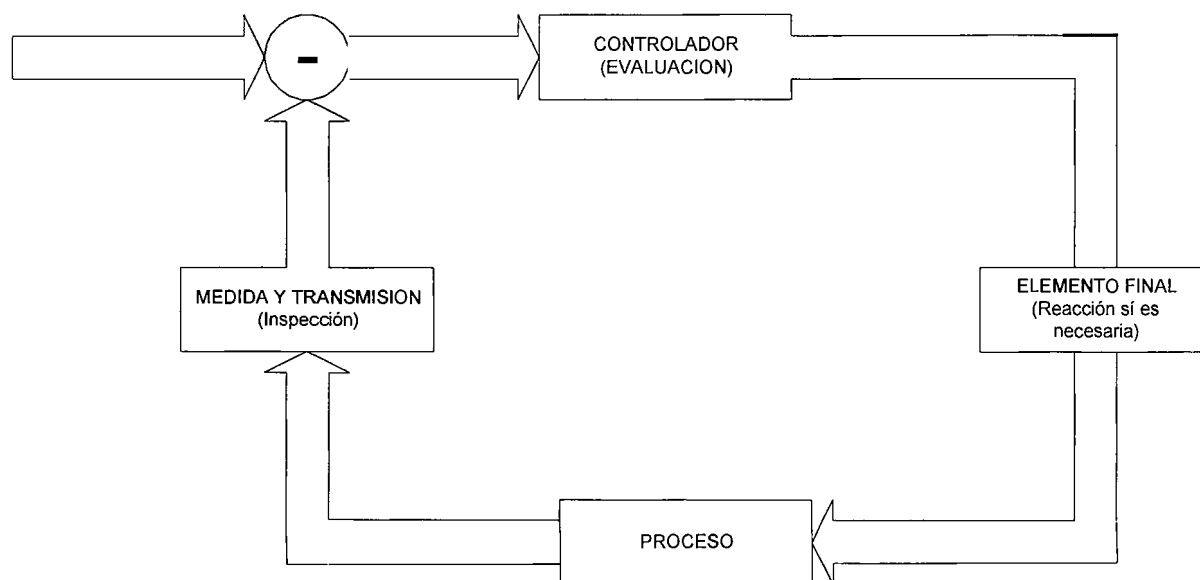


Figura 3.3 Diagrama de bloques del control automático de una variable física

Las ventajas de aplicar control automático a variables físicas en el proceso de una P.C.H. son las siguientes:

1. Se obtiene un monitoreo constante de las variables involucradas o más importantes del proceso de generación de energía eléctrica, por lo tanto el controlador, tiene un panorama completo del estado actual del proceso de la central.
2. Las acciones de control son generadas automáticamente en el momento preciso en que se da una anomalía; asegurando así la estabilidad de las variables del proceso y evitando así un posible daño en los componentes de la central; como producto de una condición inestable.

Debido a la naturaleza del proceso de generación en una P.C.H el cual fue descrito anteriormente en el capítulo II, se llegó a la determinación que los tipos de control a utilizar para el diseño de control automático deben de ser tanto de control del orden de los eventos, así como también de control de las variables físicas.

3.5 CONTROLADORES DIGITALES.

Debido a su versatilidad los controladores digitales pueden ser utilizados tanto para procesos en los cuales se necesita aplicar control del orden de los eventos así como para procesos que involucre control de variables físicas, en el caso de la automatización de pequeñas centrales hidroeléctricas se involucran ambos tipos de control, por lo que los controladores digitales resultan idóneos para este tipo de proyecto.

A continuación se detallan las características más importantes de este tipo de controladores:

Los controladores digitales son utilizados en particular en procesos en los cuales se necesita un control multifunción como:

- Regulación de las variables del proceso (nivel, temperatura, velocidad).

- Control lógico (utilizando lógica digital)
- Control secuencial (por orden de los eventos del proceso)
- Realización de operaciones aritméticas.
- Monitoreo de entradas y salidas (con lo cual se obtiene un panorama general del proceso en tiempo real).

Este tipo de controladores permite la creación de software con el cual se pueden definir todos los enclavamientos y las secuencias de la operación.

Una cuestión importante en los controladores digitales es el fenómeno de interacción y priorización entre los lazos de control, lo cual obliga a coordinar sus actuaciones dentro del proceso.

Los controladores digitales ofrecen la ventaja de que el operador pueda cambiar fácilmente el punto de consigna, modificar los valores de las alarmas tanto de nivel como de temperatura por medio de software. Sin tener que modificar alguna parte del hardware del sistema de control. Desde el punto de vista del mantenimiento, el sistema de control puede ser avisado si se presenta algún fallo en los instrumentos o en el cable de comunicación o ya sea examinar su buen funcionamiento cuando se desee.

Para la aplicación de controladores digitales en el control del proceso de generación de energía eléctrica en una P.C.H. el controlador debe ser capaz de manipular una serie de entradas y salidas (tanto analógicas como digitales); debe poder realizar también operaciones y cálculos de control para los lazos de la unidad de procesos, así como también proporcionar las secuencias de enclavamientos de contactores y relees.

De los tipos de controladores digitales el que mejor se adapta a estas características es el Automata Programable Industrial (P.L.C.), el cual será descrito a continuación:

3.6 CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES. AUTOMATAS PROGRAMABLES.

En temas anteriores, se han podido apreciar los tipos de controladores digitales de una forma general por lo que este apartado esta destinado a estudiar los Automatas

Programables de una manera mas especifica, adopción teórica utilizada el presente trabajo de graduación. Dicha adopción esta fundamentada en aspectos y características funcionales, económicas, capacidad de trabajo y conveniencias afines con el sistema a diseñar; para lo cual se debe de comparar tal tecnología (autómatas programables) con teorías de control en vigencia, a lo que respecta el tema de automatización de procesos.

Nociones Generales.

El controlador industrial usado más ampliamente es el controlador lógico programable (P.L.C), el cual es un aparato digital electrónicamente operado, que utiliza dispositivos de memoria para almacenar ordenes o instrucciones para ejecuta funciones especificas como: lógicas, secuenciales, de tiempo y aritméticas.

Tal concepción nació por varios factores como, la utilización de relés de tipo neumático o eléctrico en sistemas de control, estos dispositivos son capaces de manejar gran magnitud de corriente y operar bajo ambientes de voltaje del orden de los 115 VAC, la desventaja principal de estos era que estaban sujetos a constantes fatigas mecánicas por las excesivas maniobras que implicaba la etapa de control, además implementación del control consumía mucho tiempo y era susceptible a errores y constantes calibraciones, obligando a excesivos ajustes de mantenimiento y paros imprevistos del proceso que se estaba controlando. La industria de automatización empezó a desarrollar los controladores lógicos programables (P.L.C), a finales de la década de los 60`s. Estos en un principio se diseñaron para simular funciones lógicas de control realizadas con Relés, debido a que era necesario que tal sistema fuese comprendido por personal involucrado en el mantenimiento y diseño electromecánicos vigente en esa época. Estos dispositivos electrónicos activaban a relés de mayor potencia y de poca maniobra mecánica incrementado la disponibilidad operativa de la planta. Este tipo de lógica en la actualidad aun no pierde su validez en el campo del control e instrumentación industrial, incrementado funciones a estos programas de temporizado, conteo, comparación, calculo, adquisición de datos, y comunicación en red con otros sistemas o dispositivos.

El diagrama de bloques general de un controlador lógico programable se muestra en la figura 3.4.

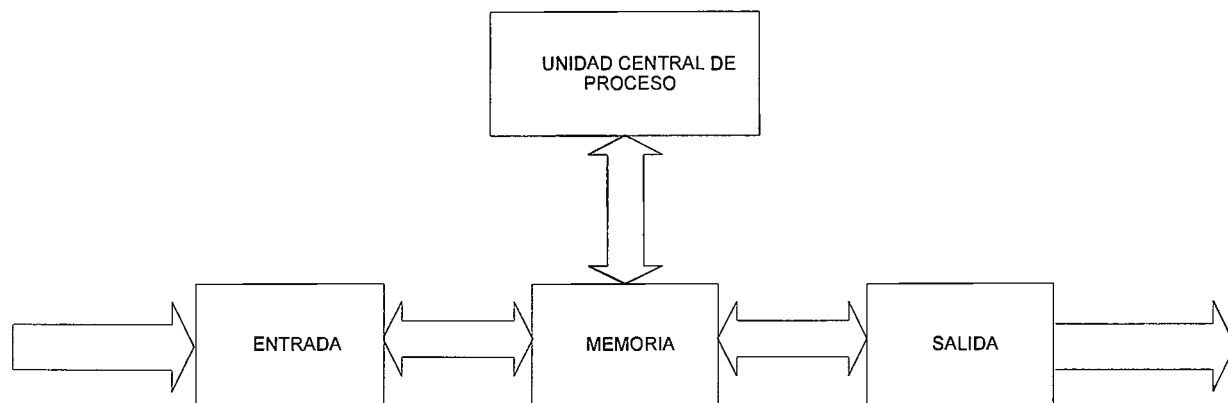


Figura 3.4. Diagramas de bloques de un PLC

La arquitectura del PLC es similar a una pequeña computadora, ya que todas las operaciones son realizadas bajo la dirección de la unidad central de proceso, muchos de estos procesadores centrales son microprocesadores, las instrucciones de programa, variables y constantes son almacenadas en memoria, existiendo una comunicación bidireccional entre la unidad central de proceso, dispositivos de memoria y las interfaces de entrada y salida.

Una de las diferencias más grandes entre las computadoras personales y los PLC es los medios físicos (hardware), funciones y ambiente de programación son orientados al control industrial por medio de dispositivos de entradas y salidas que involucra la medición y regulación de variables físicas en una secuencia de eventos específicos que describen un proceso.

Las interfaces de entrada y salida de la mayoría de Autómatas poseen características modulares, de tal manera que la cantidad y los tipos de dispositivos pueden ser estructurados según conveniencia del operador, facilitando futuras modificaciones que pueda sufrir el proceso. Existen en el mercado de automatización una enorme variedad de módulos de entrada y salida, entre ellos encontramos: Módulos análogos de corriente y voltaje, galgas extensiométricas, RTD, LVDT, módulos de control para

servomotores y motores de inducción, termocuplas, temporizadores, interfaces para comunicación en red y módulos visualizadores, que permiten al usuario en gran medida cubrir los requerimientos que implica la complejidad del proceso.

3.6.1 COMPONENTES IMPORTANTES DEL PLC.

DISPOSITIVOS DE ENTRADAS / SALIDAS.

Permiten la interacción entre el autómeta y el proceso, y sus funciones principales son las siguientes:

- a) Adaptar la tensión de trabajo entre los dispositivos que están en contacto con las variables físicas y los niveles de voltaje a que esta sometido el autómeta.
- b) Proporcionar aislamiento eléctrico entre los sistemas lógicos de control y los de potencia.

UNIDAD CENTRAL DE PROCESAMIENTO (C.P.U)

Este componente realiza cálculos numéricos y de decisión, así como el control de datos recibidos o enviados hacia o desde el exterior, de acuerdo interpretación de las instrucciones que el usuario almacena en la memoria del autómeta, la velocidad y cantidad de procesamiento de datos del CPU, define la complejidad de las funciones que el autómeta puede realizar.

DISPOSITIVOS DE MEMORIA.

La función mas importante de este componente es almacenar de forma continua el programa de usuario y operativo que permiten que el usuario en un lenguaje específico programe las operaciones que el autómeta debe realizar a lo largo de las diferentes etapas del proceso. La capacidad de almacenamiento limita el número de instrucciones que el autómeta puede procesar, por lo tanto es un factor a considerar al elegir un PLC.

LENGUAJE DE PROGRAMACION.

Un lenguaje designa un conjunto de todas las instrucciones y convenciones para el tratamiento de las señales, por medio de las cuales se actúa sobre la instalación a controlar(proceso), de acuerdo con unas ordenes de control.

Los lenguajes de programación del PLC fueron basados en un principio en **diagramas de contactos eléctricos de escalera**, en la actualidad la mayoría de Autómatas poseen esta representación además de un esquema de diagrama de bloques y lista de instrucciones mnemonicas, de forma general su característica de programación ha sido diseñada para optimizar la automatización industrial.

El lenguaje es propio a cada P.L.C, aunque su sistema operativo se comporta en forma similar para cada tipo, ya que es forzado a repetir una secuencia de operaciones, de acuerdo a la estructuración del programa de usuario. Una vez en modo de ejecución, el P.L.C repite cíclicamente el grupo de instrucciones del programa, al principio lee todas las entradas y de acuerdo a los estados definidos por algunas, el PLC activa o desactiva salidas, realiza cálculos matemáticos, o de comparación, el efecto de estas salidas o cálculos pueden conllevar a nuevos estados dentro del programa, reflejando una secuencia de las diferentes etapas dentro de un proceso.

Las instrucciones son la unidad independiente más pequeña de un programa, contienen las especificaciones de trabajo para el procesador, estas se componen de una parte de operación que describe la función a ejecutar y otra parte de operandos, esta ultima contiene las características y parámetros, indicándole al procesador sobre que debe realizar la ejecución.

Así las características designan las áreas de los operandos, y para referirse a un determinado operando en dicha área es necesario, el parámetro el cual da la naturaleza de un operando.

a continuación se describirán las áreas para un el lenguaje de programación de forma general, con sus funciones básicas, en las siguientes áreas:

Funciones binarias .

Estas permiten la consulta y combinación de los estados de señal de los operandos binarios y pueden ser:

Combinaciones Binarias: Se realizan con la función AND y OR, lógicas, así como con las combinaciones de estas dos funciones, la consulta se puede realizar al estado de la señal "1" o "0" (estados lógicos). Como operandos se pueden utilizar: Entradas, salidas, marcas, temporizadores y contadores.

1. Funciones de Memoria: Con el uso de estas se almacenan los resultados de las combinaciones especificadas por el usuario. Esta función se puede realizar de forma dinámica(asignación) o estática(activación y puesta a cero). Como operandos se pueden utilizar: Entradas, salidas y marcas.
2. Funciones de Tiempo: Permite mantener un estado específico de salidas en un intervalo de tiempo definido por el usuario.
3. Funciones de contador: estas funciones realizan una cuenta directa por el procesador central, en algunos casos dicha cuenta se puede realizar descendentemente o ascendentemente.
4. Funciones de comprobación de bit. Con estas se puede consultar y modificar operandos binarios (bit a bit), estas funciones permiten: La consulta y activación de un bit al estado de las señales lógicas, unos y ceros.

Funciones digitales.

1. Funciones de carga. Mediante la correcta o específica operación de carga en muchos casos representada por la letra "L", se carga en el acumulador las informaciones de las áreas de operando de entrada, salida, marcas, temporización, contadores, datos y datos del sistema, así como algunas constantes. Estas operaciones son ejecutadas independientemente de resultados de combinaciones previas o posteriores en el flujo del proceso o programa.

2. Funciones de transferencia: Con este tipo de funciones se puede realizar el traslado de las informaciones desde el acumulador a las áreas de operandos de entrada, salida, marcas, datos y datos del sistema.
3. Funciones de comparación: Se realizan comparaciones entre los valores digitales contenidos en los acumuladores del equipo, estas pueden incluir: Comparación a igual, a distinto, a mayor, a mayor o igual, comparación a menor y comparación a menor o igual.
4. Combinaciones digitales: Se pueden realizar la combinación de los valores digitales entre sí, bit a bit.

Funciones de organización.

Con este tipo de funciones se puede controlar el orden de elaboración de los programas. Ya sea llamando a subrutinas o por medio de saltos dentro de estas, a este tipo de funciones se pueden incorporar aquellas que manipulan el contenido de los acumuladores: desplazamientos, incrementos o reducciones.

1. Funciones de modulo o subrutina: Por medio de estas se estructura el programa de usuario, es decir, se divide en capítulos independientes. Este tipo de subrutinas se elaboran siempre o con la dependencia de resultados de la combinación. Los programas de usuario se deben de construir en estructuras, adjudicando a cada capítulo una determinada función, de forma de dividir el programa en partes comprensibles y simplificándose la prueba de operario o lógica de los mismos. Para la realización de tales subrutinas, estas deben de llamarse ya sea de forma absoluta o dependientes del resultado de alguna combinación.
2. Funciones de salto: Con setas es posible interrumpir la elaboración lineal de los programas y continuar en otro punto.
3. Funciones de desplazamiento: Ofrecen la posibilidad de desplazar el contenido del acumulador, bit a bit, hacia la izquierda o derecha.

3.6.2 ELABORACION DE UN PROGRAMA.

Estructura: Formado por todas las instrucciones programadas por el usuario y convenciones para el tratamiento de las señales, que tienen que ser controladas por la instalación de acuerdo con las necesidades de los trabajos a realizar.

El programa de usuario se divide en capítulos o módulos individuales, cuya división es voluntaria y se define por el propio usuario.

Organización. En esta fase de elaboración del programa se determina la cantidad y el orden de ejecución de las subrutinas previamente definidas en un flujograma. Para ello se programan las instrucciones de salto ya sea absolutas o condicionales de acuerdo a la secuencia de estados en el módulo de organización. (Ver figura 3.5)

I

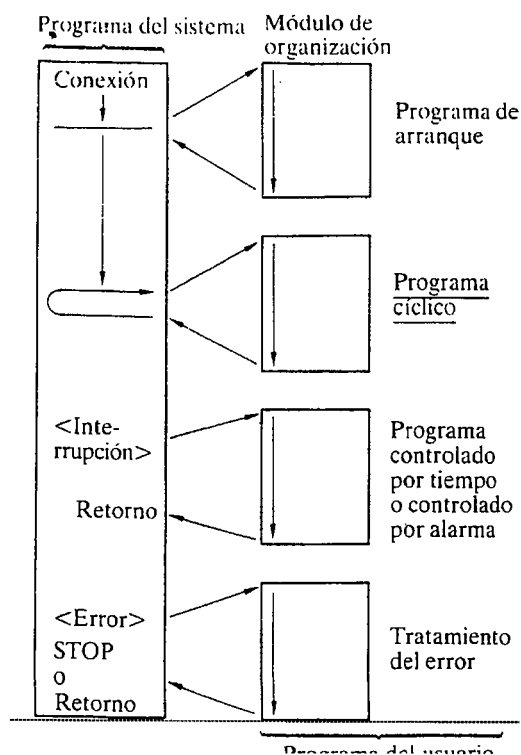


Figura 3.5 Organización de un programa de usuario

En general la elaboración se realiza en forma cíclica. Así dicho programa inicia en el modulo principal o de organización, es acá donde se debe realizar la llamada a las subrutinas o capítulos del programa, realizándose la división global de los programas de usuarios, realizándose una división de los programas tanto desde el punto de vista tecnológico como funcional.

Donde la división tecnológica, es muy parecida a la estructura de la instalación a controlar. Cada parte del programa se corresponde con cada parte del proceso, y la división funcional esta organizada, de acuerdo con las funciones de control a ejecutar.

CAPITULO IV

LAZOS DE CONTROL Y MODELADO DE LA PLANTA

En el presente capítulo se determinan los principales lazos de control que intervienen en el proceso de generación de la P.C.H. con el fin de determinar las señales tanto de control como de realimentación involucradas. Además se realiza la deducción de los modelos matemáticos de los diferentes lazos de control de la P.C.H. con el fin de analizar la respuesta de la planta ante determinadas condiciones de operación de esta.

4.1 LAZOS DE CONTROL REQUERIDOS EN EL PROCESO DE GENERACION EN UNA P.C.H.

De lo anteriormente expuesto en el capítulo II se puede decir que, dentro del proceso de generación en una P.C.H. existen ciertas variables las cuales es de suma importancia que se mantengan dentro de ciertos rangos de operación.

Al ocurrir una situación dentro del proceso, que provoque que alguna de estas variables se salga de su punto de operación es necesario que el controlador realice ciertas acciones de control, con el fin de lograr la estabilización del sistema.

Para que el controlador tenga un conocimiento de sus propias acciones sobre el proceso se requiere de la existencia de ciertos lazos cerrados en el sistema de control.

De acuerdo al proceso de la P.C.H.(descrito en el Cap.II) los lazos de control requeridos para asegurar la perfecta operación del sistema son los siguientes:

- **Lazo de control de nivel de agua en la cámara de carga.**
- **Lazo de control de velocidad en el eje turbina generador.**
- **Lazo de control de temperatura en chumaceras y turbina.**
- **Lazo de control de posición o apertura de los alabes del distribuidor.**

En la figura 4.1 se muestra la relación existente entre los elementos de los lazos de control, y las señales de entrada y salida que el P.L.C debe controlar. El efecto de

corrección se logra sobre todos los lazos, a partir de la apertura o cierre de los alabes del distribuidor, ya que de esa forma se controla el caudal de entrada en la turbina; también se hace posible controlar la velocidad en el eje, temperatura en la misma, así como el nivel en la cámara de carga. El sensor de posición permite realizar la medida del desplazamiento de los alabes.

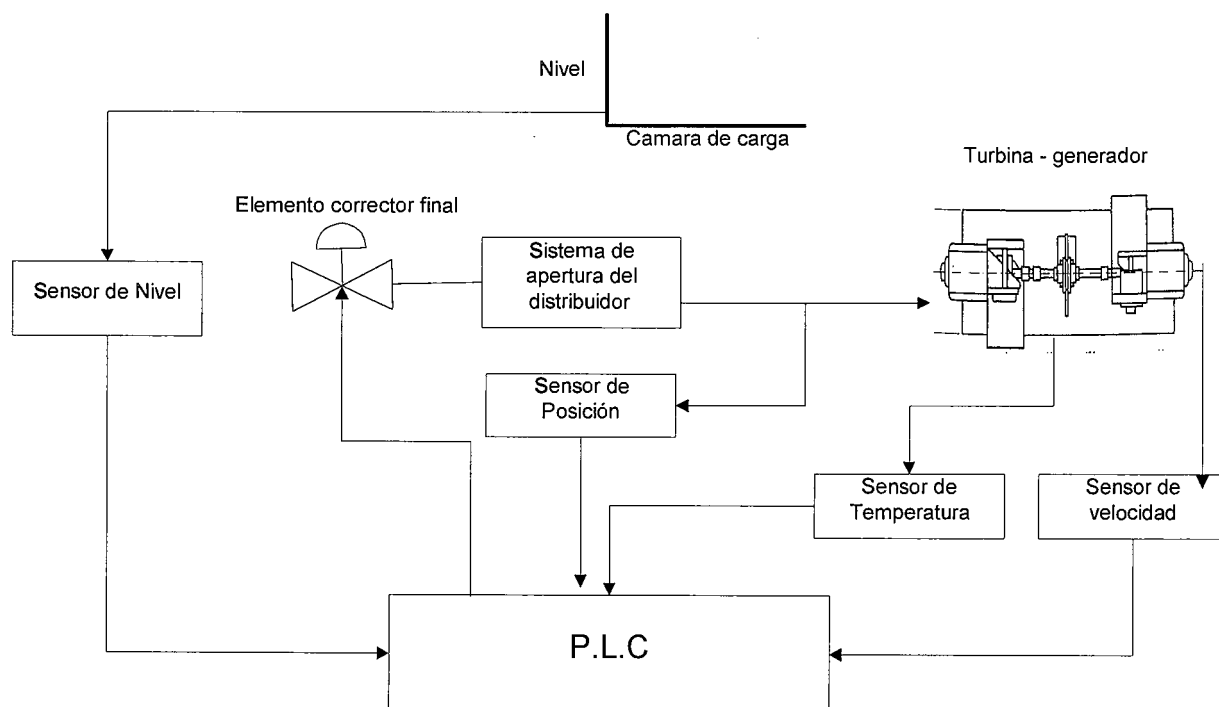


Figura 4.1. Diagrama básico de grupo turbina- generador

A continuación se describirán c/u de los lazos de control anteriormente mencionados:

4.1.1 Lazo de control de nivel.

Una vez el sistema de la P.C.H. este en la fase de operación, es necesario mantener el nivel de agua en la cámara de carga dentro de ciertos límites operativos dentro de los cuales se asegura la plena eficiencia del sistema y con lo cual se evita además que el sistema turbina-generador entre en una condición de motorización. Este lazo de control

s el encargado de regular o mantener el nivel de agua en la cámara de carga dentro de su rango de operación (El cual es definido en el capítulo V). Como muestra la figura 4.1, un sensor de nivel ubicado en la cámara de carga, suministra la información que el P.L.C necesita, para saber en que momento debe realizar las respectivas acciones de control, cerrando o abriendo los alabes del distribuidor de la turbina.

4.1.2 Lazo de control de Velocidad

La regulación en el lazo de control de velocidad es necesaria solamente en la etapa de sincronismo, y consiste en llevar la velocidad en el eje turbina-generador un poco arriba de la velocidad de sincronismo, este control se logra mediante la apertura de los alabes del distribuidor, permitiendo un caudal de entrada al sistema, evitando que la turbina se embale por efectos de una velocidad excesiva en el sistema.

Un sensor de velocidad en el eje del sistema turbina - generador se encargara de suministrar la señal de velocidad al controlador y así poder este compararla con un punto de consigna prefijado.

4.1.3. Lazo de control de temperatura.

Las acciones de control para esta variable deben de ser efectivas solo en el momento en que este presente una falla en el sistema y cause un aumento de temperatura sobre los límites normales. Estas acciones consisten en bajar la potencia suministrada a la red, disminuyendo el caudal de entrada por medio del distribuidor, sí el incremento de temperatura persiste el P.L.C debe desconectar el sistema.

4.1.4 Lazo de control de Posición

EL control de posición de los alabes es el lazo de control principal, el cual indica que tanto se ha regulado al ejecutarse una acción de control específica. Este lazo es el encargado de posicionar los alabes del distribuidor a una abertura determinada.

Este lazo de control esta presente en todas las etapas que conlleva el proceso de generación en la P.C.H. esto es debido a que casi todas las acciones de control ocurren en los alabes del distribuidor.

4.1.5 COMPONENTES QUE INTERVIENEN EN LAS ACCIONES DE CONTROL

De los componentes que conforman la P.C.H. en Sonsonate sólo algunos son de particular interés para el desarrollo de este proyecto, debido a que estos elementos ejercen las acciones de control y forman parte de la secuencia del proceso de generación de energía eléctrica, y la toma de algunas variables importantes que influyen tanto para la acción de control como para la secuencia del proceso.

Estos componentes son los que se enuncian a continuación:

- Válvulas de agua para enfriamiento de turbina.
- Gobernador de la máquina hidromecánica .
- Transferencia o elemento de conexión a la red.
- Toma de lectura de nivel, temperatura, posición de alabes en el gobernador, detección de velocidad y aceite

En la figura 4.2 se muestran detalladas tanto las variables de entrada y salida, y su interacción con el controlador.

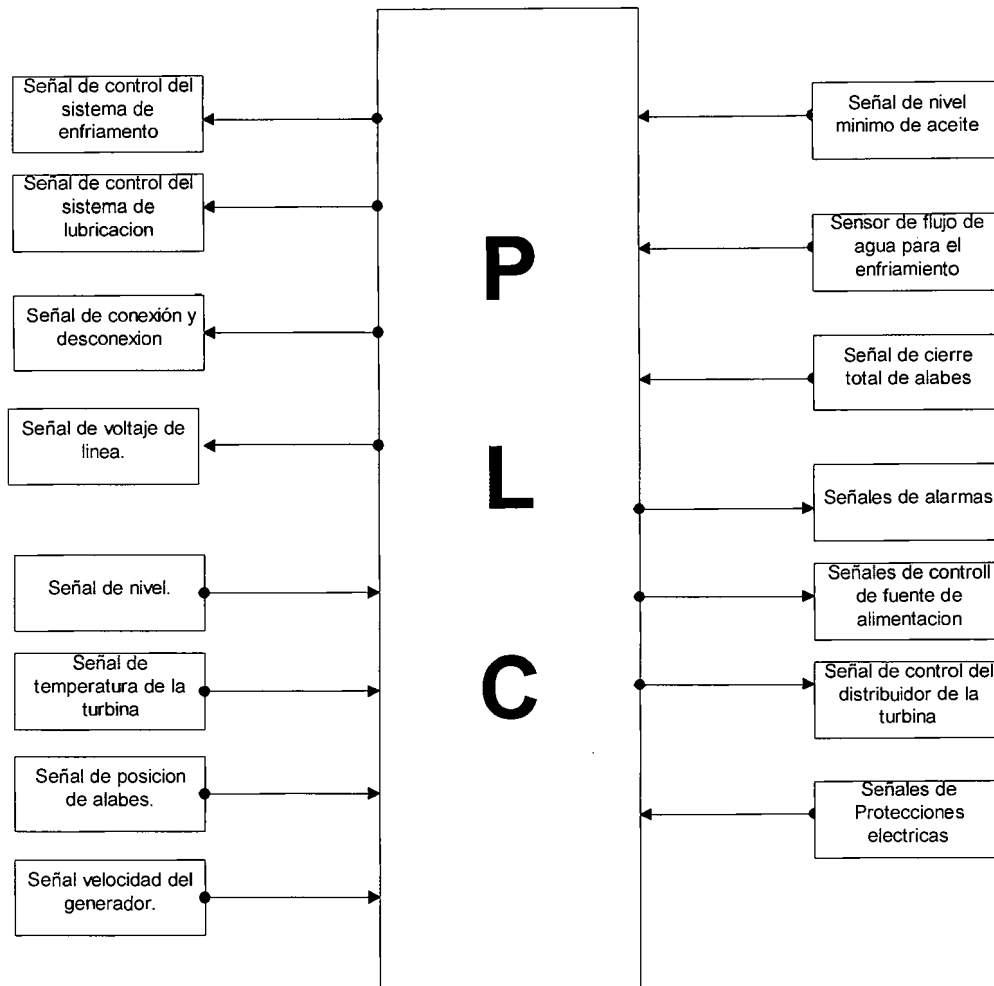


Fig. 4.2. Variables De Entrada Y Salida Con Respecto Al P.L.C.

4.2 DETERMINACION DEL MODELO MATEMATICO.

El primer paso para el análisis de un sistema dinámico consiste en obtener su modelo matemático.

El modelo matemático de un sistema dinámico se define como un juego de ecuaciones que representan la dinámica o comportamiento del sistema con cierta exactitud, bajo determinadas condiciones operativas.

Para el caso del diseño del sistema de automatización de la P.C.H. de Sonsonate, es necesario determinar las relaciones existentes tanto entre la apertura del distribuidor y la velocidad del eje turbina-generador, así como entre la apertura del distribuidor y el nivel en la cámara de carga, ya que estos son los lazos de control con mayor importancia dentro del proceso de generación de energía eléctrica de la P.C.H. en estudio. Cabe mencionar que las ecuaciones a determinar en este apartado se presentaran en el dominio del tiempo, ya que de la respuesta temporal depende el tipo de control a implementar en el diseño del sistema.

Como método de identificación experimental de las respuestas de velocidad del eje del grupo turbina - generador y nivel de agua en la cámara de carga se emplearon aquellos métodos que analizan la respuesta presentada por el sistema ante señales de ensayo conocidas, en este método se aplican entradas tales como escalones o impulsos, analizando la respuesta para determinar los parámetros que permitan caracterizar el sistema.

La entrada que se utilizo como prueba fue la de escalón debido a su facilidad de aplicación y al conocimiento de su respuesta.

Dicho escalón se aplico mediante la apertura o cierre rápido de los alabes del distribuidor observándose el comportamiento de la velocidad en el eje del grupo turbina - generador y el nivel de agua en la cámara de carga en el tiempo.

Estas variables en práctica poseen una constante de tiempo de mucho mayor que el periodo de tiempo de subida del escalón aplicado, por tanto el error de identificación es

despreciable. Esta técnica de identificación de respuesta ante una entrada de escalón implica el adoptar que el sistema es lineal bajo condiciones normales de operación.

Con el fin de obtener las diferentes ecuaciones temporales del sistema, correspondientes tanto a la velocidad de la turbina como al nivel en la cámara de carga de la P.C.H. de Sonsonate, se llevaron a cabo una serie de pruebas prácticas en la planta, en dichas pruebas se obtuvieron una serie de respuestas las cuales fueron aproximadas mediante la utilización del software de aplicación matemática Mathcad a una función matemática característica capaz de describirlas o representarlas en el tiempo. Dichas pruebas son las que se presentan a continuación (Los datos obtenidos durante las pruebas se encuentran en el anexo E):

4.2.1 PRUEBAS DE VELOCIDAD.

4.2.1.1 PRUEBA DE APERTURA-VELOCIDAD DE ESTABILIZACION

El objetivo de esta prueba, fue determinar el valor de velocidad de estabilización en el eje turbina-generador, para diferentes valores de apertura inicial en el distribuidor. El procedimiento realizado fue el siguiente: Partiendo de las condiciones de reposo del sistema (apertura del distribuidor cero y velocidad del eje turbina generador cero), se procedió a la apertura de forma continua del distribuidor (entrada escalón) hasta una apertura inicial X_i , simultáneamente se fue sensando la velocidad del eje turbina generador cada 10 segundos hasta detectar el valor de velocidad de estabilización para dicha apertura.

Esta prueba se llevo a cabo para diferentes valores de apertura inicial X_i , estableciendo para cada una de ellas su respectiva relación velocidad tiempo, las gráficas respectivas se muestran en la figura 4.3 (los datos obtenidos en esta prueba se muestran en el anexo E)

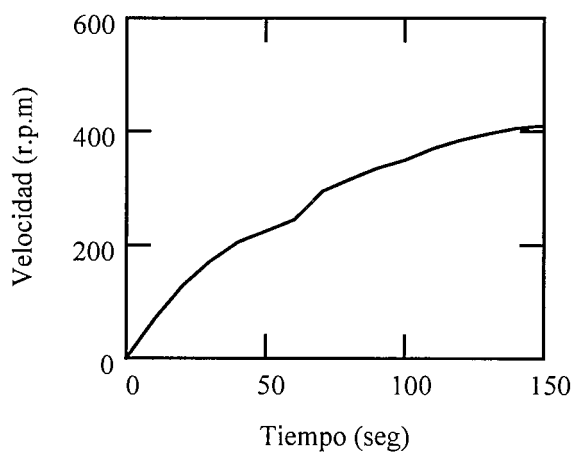


Figura 4.3 a (apertura $X=1.4\text{cm}$)

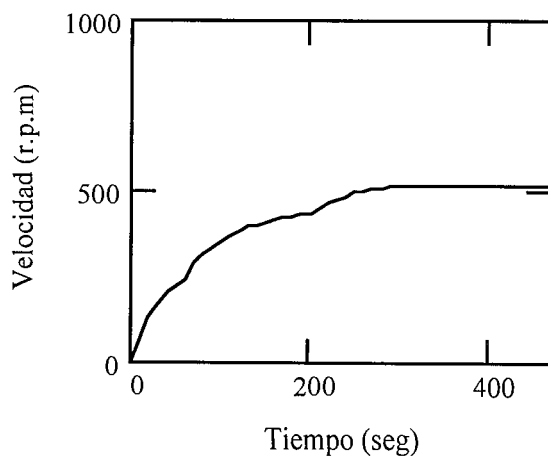


Figura 4.3b (apertura $X=1.6\text{cm}$)

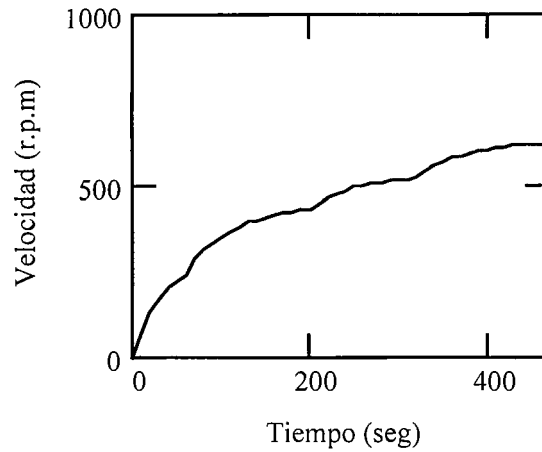


Figura 4.3c (apertura X=1.8cm)

$k = 0.47$

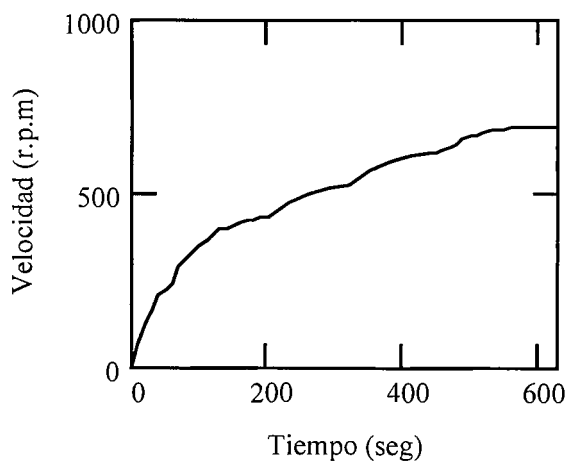


Figura 4.3d(apertura X= 2cm)

Figura 4.3 respuestas de velocidad ante diferentes valores de apertura inicial(X_i)

Al graficar los diferentes resultados arrojados en prueba practica se observa que se obtuvo una respuesta típica de un proceso de primer orden ante una excitación escalón,

la cual está representada por una ecuación de la forma $V=A(1-e^{-(bt)})$, dicha ecuación es la función a la que fueron aproximadas cada una de las respuestas obtenidas durante la prueba, mediante la utilización del mathcad.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados de dichas pruebas

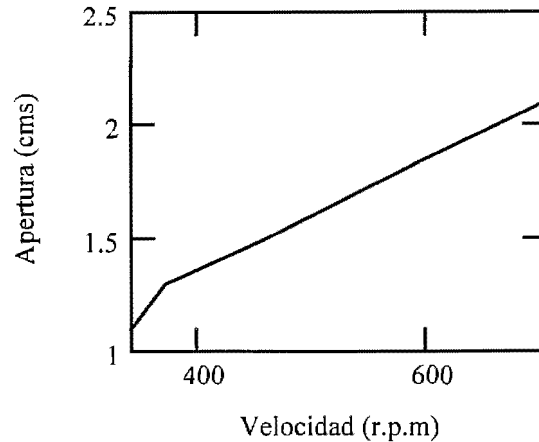
APERTURA [cm]	VELOCIDAD DE ESTABILIZACION(a) [r.p.m.]	CONSTANTE DE TIEMPO(b) [1/seg]
0-1.4	434	0.014
0-1.6	518	0.011
0-1.8	618	0.00758
0-2.0	693	0.0061

Tabla 4.1 Resultados obtenidos de la prueba de velocidad

De los datos anteriores se obtuvieron las siguientes relaciones lineales.

RELACION APERTURTA-VELOCIDAD DE ESTABILIZACION

Para poder determinar esta relación fue necesario graficar los puntos de velocidad estabilización para cada valor de apertura del distribuidor, los cuales se encuentran en la Tabla 4.1 resultando la gráfica que se muestran en la figura 4.4



0.

Figura 4.4 Relación entre la apertura y la velocidad de estabilización

Con la utilización del software Mathcad se llegó a una ecuación representativa de dicha relación, la cual es la que se muestra a continuación:

$$V_s = 384.91(X) - 109.31 \text{ (ecuación 1)}$$

Donde:

Vs: Velocidad de estabilización

X: Apertura lineal del distribuidor

Esta ecuación (1) da la relación que existe entre el valor de apertura inicial del distribuidor y la velocidad de estabilización para esa apertura.

RELACION APERTURA-CONSTANTE DE TIEMPO:

Esta relación proporciona el valor respectivo de la constante de tiempo con que estabilizará la velocidad del sistema para un determinado valor de apertura del distribuidor. Dicha relación se muestra a continuación en la figura 4.5:

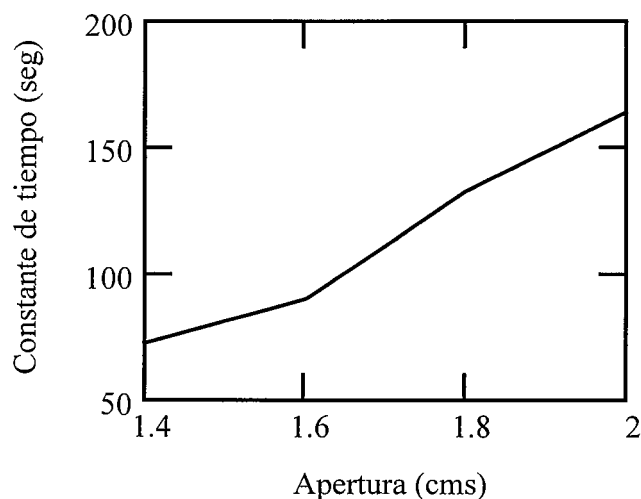


Figura 4.5 Relación apertura constante de tiempo ^{0.}

De la gráfica anterior se llegó a una ecuación lineal representativa de dicha relación, la cual se presenta en la ecuación 2:

$$T = 158.45X - 154.98 \text{ (ecuación 2)}$$

Donde:

T: Constante de tiempo de la velocidad.

X: Apertura lineal del distribuidor

4.2.1.2 DEDUCCION DE ECUACION TEMPORAL DE VELOCIDAD:

Tomando como base las ecuaciones lineales anteriores(1 y 2) se llegó a la determinación de un modelo matemático en el dominio del tiempo, el cual representa el comportamiento en el tiempo de la velocidad del eje turbina generador.

Según la ecuación característica para sistemas de primer orden ante una excitación escalón, $f(t) = A (1 - e^{-bt})$, donde :

A: representa el valor final o de estabilización del sistema

b: representa el valor de la constante de tiempo del sistema

Sustituyendo el valor de **A** por la ecuación(1) y el valor de **b** por la ecuación (2) se obtiene el modelo siguiente:

$$V = (384.91(X) - 109.31)(1 - e^{-(1/(158X-155))t}) \quad \text{(ecuación 3)}$$

El cual proporciona el valor respectivo de velocidad en un instante determinado para un valor de apertura del distribuidor (X).

Este modelo temporal es válido asumiendo que el sistema es llevado hasta un valor de apertura inicial (X_i) partiendo de las condiciones de reposo (cero apertura y velocidad).

4.2.1.3 PRUEBA DELTA DE APERTURA-VELOCIDAD

El objetivo de esta prueba fue determinar el cambio en la velocidad del eje turbina generador producida por una variación a pasos iguales en la apertura del distribuidor.

El procedimiento a seguir fue el siguiente:

Partiendo de un valor de apertura inicial determinado (X_i), que para este caso fue asumido de 1.4cm (ya que a este valor de apertura se vence la inercia de la turbina), se procedió a variar la apertura del distribuidor abriendo en deltas de 0.2cm. Para cada delta de apertura se tomaron tanto lecturas de velocidad de estabilización como del tiempo de estabilización de esta. Dichos resultados se grafican en la fig. 4.6 (los datos obtenidos durante la prueba se muestran en el anexo E):

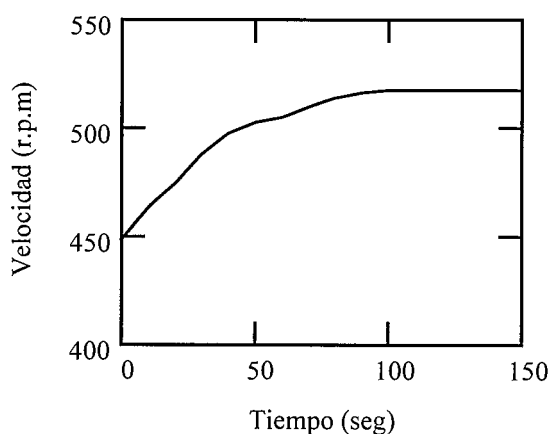


Figura 4.6 a (apertura de 1.4 a 1.6 cm)

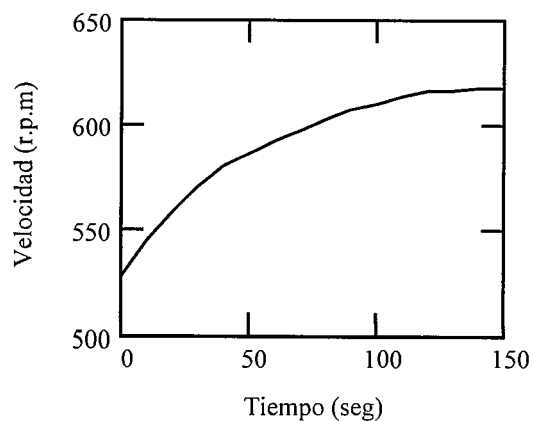


Figura 4.6b (apertura de 1.6 a 1.8cm)

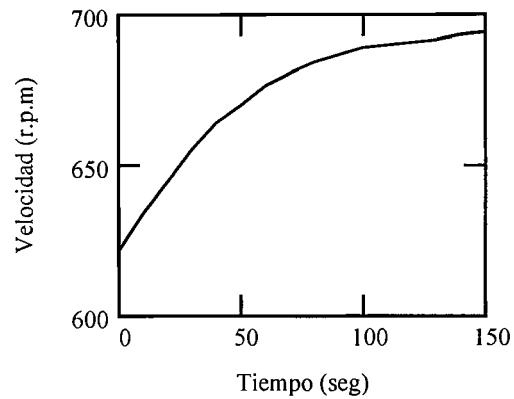


Figura 4.6c.(apertura de 1.8 a 2.0 cm)

Fig. 4.6 Respuesta de velocidad ante deltas de apertura de 0.2cm

Al graficar la respuesta velocidad tiempo se puede observar que esta dio como resultado una respuesta de primer orden para cada una de las pruebas realizadas, por lo que fueron aproximadas mediante Mathcad a una ecuación general de la forma:

$$V_f = a (1 - e^{-bt})$$

Los resultados arrojados por esta prueba son los presentados en la tabla 4.2 :

APERTURA(cm)	Vi(r.p.m.)	Vf (r.p.m.)	K tiempo (1/seg.) [b]	V(r.p.m).[a]
1.4-1.6	449	518	0.026	72.108
1.6-1.8	528	618	0.02	94.27
1.8-2.0	622	694	0.021	80.00

Tabla 4.2 Resultados obtenidos de la prueba.

4.2.1.4 DEDUCCION DE ECUACION DE VELOCIDAD PARA CAMBIOS DE APERTURA DE 0.2cm

De los datos mostrados en la tabla anterior se puede apreciar que tanto los valores de constante de tiempo y de delta de velocidad para cada una de las condiciones de prueba se encuentran bastante cercanos entre sí. Por lo cuál se asume que ante cambios de apertura iguales y pequeños, los cambios en la velocidad y tiempos de estabilización del sistema presentan el mismo comportamiento y por lo tanto pueden estandarizarse a valores constantes. Por consiguiente aplicando la media aritmética se determinaron como valores estándar los siguientes:

$$\Delta V = (72.1 + 94.3 + 80) / 3 = 82 \text{ (cambio de velocidad)}$$

$$(K) \text{ Constante de tiempo} = (0.026 + 0.02 + 0.021) / 3 = 0.022 \text{ (1/seg.)}$$

Tomando los valores estándar anterior y asumiendo que el sistema es de primer orden se llegó a la ecuación 4, la cual proporciona la respuesta en el tiempo de la velocidad en el eje de turbina-generador contra cambios de apertura de 0.2 cm, partiendo de una

apertura inicial (X_i) determinada, para la cual existe una velocidad inicial V_i . Por tanto se tiene:

$$V_f = \Delta V (1 - e^{-Kt}) + V_i$$

Y sustituyendo las constantes por los valores determinados anteriormente se tiene:

$$V_f = 82 (1 - e^{-0.022t}) + V_i \text{ (Ecuación 4)}$$

4.2.2 PRUEBAS DE NIVEL.

4.2.2.1 PRUEBA APERTURA-CAMBIO DE NIVEL EN CAMARA DE CARGA.

El objetivo de esta prueba fue determinar la relación existente entre un cambio en la apertura de los alabes y el cambio que este produce en el nivel en la cámara de carga (los datos obtenidos durante esta prueba se muestran en el anexo E).

El procedimiento para obtener los datos fue el siguiente: Partiendo de la apertura, en la cual el sistema realizó la conexión del generador a la red, se efectuaron varias mediciones, llevando los alabes del distribuidor hasta diferentes valores de apertura, para los cuales se tomaron, tanto los datos de nivel de estabilización como el tiempo transcurrido hasta que el nivel se estabilizó, los valores de nivel fueron muestreados cada 10 segundos y el Delta de nivel o decremento en el nivel fue obtenido a partir de un valor de nivel inicial menos el valor final de nivel en la cámara de carga.

En la figura 4.7 se muestran las gráficas resultantes de esta prueba:

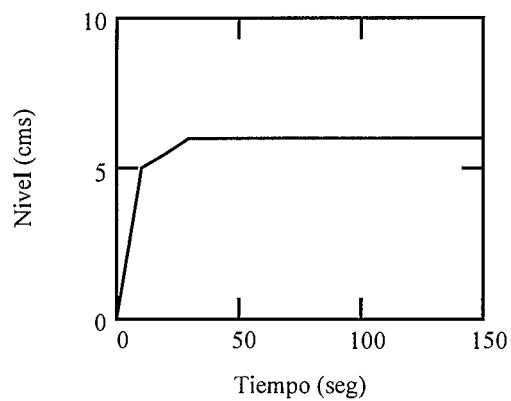


Figura 4.7 a (X=1cm)

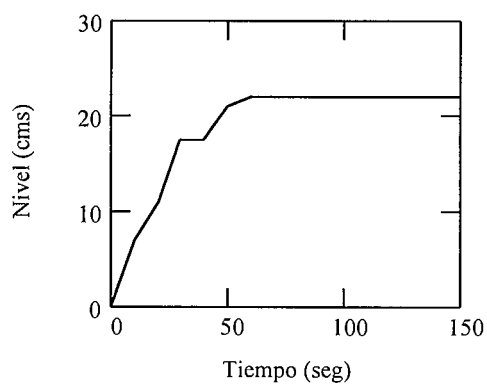


Figura 4.7b (X=4cm)

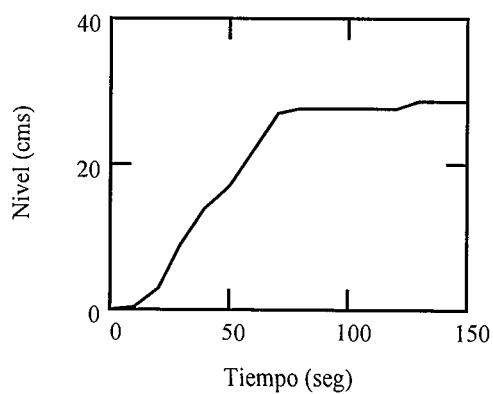


Figura 4.7c (X=8cm)

Fig. 4.7 Resposta de nivel ante diferentes valores de apertura(X)

Al graficar las respuestas de nivel en el tiempo, para cada una de las aperturas se puede apreciar que se obtuvo una respuesta la cual es típica de sistemas de primer orden, ante una excitación escalón, a la entrada del sistema por lo que, este puede ser modelado por la siguiente ecuación $N = a(1 - e^{-bt})$.

Los resultados obtenidos para cada una de las pruebas fueron los siguientes (Ver tabla 4.3) :

APERTURA (X) [cm]	DELTA NIVEL [cm]	K tiempo [seg]
1	6	6.45
4	24	23.25
8	36	55.55

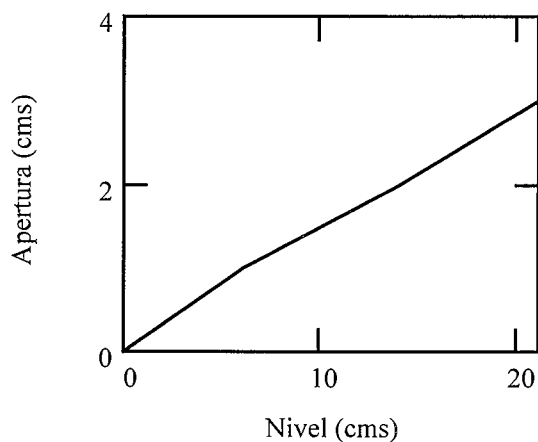
Tabla 4.3

De los datos anteriores se llegan a las siguientes relaciones apertura-nivel y apertura constante de tiempo:

RELACION APERTURA-NIVEL:

Esta relación proporciona el valor de apertura al que deben cerrarse los alabes del distribuidor ante un cambio en el nivel de agua en la cámara de carga, que afecte la

operación del sistema. Graficando el valor de nivel contra apertura, se obtuvo la figura 4.8.



0.

Figura 4.8. Relación apertura nivel

A partir de la gráfica anterior, se dedujo la ecuación la cual representa dicha relación y se presenta a continuación.

$$\Delta X = 0.14 \Delta N + 0.16 \text{ (ecuación 5)}$$

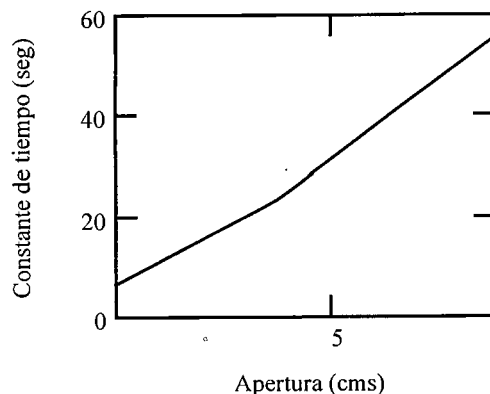
Donde:

ΔX : Valor del cambio en la apertura del distribuidor

ΔN : Cambio en el valor de nivel

RELACION APERTURA- CONSTANTE DE TIEMPO DE NIVEL

Esta relación da el valor de la constante de tiempo requerida para la estabilización del nivel ante un cambio en la apertura de los alabes. Al graficar el valor de constante de tiempo contra cambio de apertura, se obtuvo la figura 4.9.



0.

Figura 4.9 Relación apertura constante de tiempo de nivel

De la gráfica anterior se dedujo, la ecuación 6 que representa dicha relación:

$$T = 7.072 (x) - 2.227 \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde:

T: Constante de tiempo de la respuesta de nivel

X: Cambio en la apertura del distribuidor

4.2.2.2 DEDUCCION DE ECUACION DE NIVEL

Partiendo de las relaciones lineales presentadas anteriormente en las ecuaciones 5 y 6, y de la forma de las respuestas obtenidas, de los valores de nivel, con respecto al tiempo, para diferentes valores de apertura; se llega a la ecuación 7 la cual representa, de forma aproximada la respuesta en el tiempo, del nivel en la cámara de carga. Para valores de apertura definidos, los cuales pueden oscilar entre 0 y 8 centímetros, ya que este es el recorrido lineal de los alabes en el distribuidor. Realizando el mismo procedimiento utilizado en el apartado 4.2.1.2 se llegó a la ecuación siguiente.

$$\mathbf{Nf = Ni - ((X-0.161)/0.14) (1-e^{-(1/(7.072X-2.22))t}) \text{ (Ecuación 7)}}$$

Donde:

Ni: representa el valor inicial de nivel en la cámara de carga.

X: El desplazamiento de los alabes del distribuidor

Nf: Valor de nivel final en la cámara de carga

CAPITULO V

ANALISIS SECUENCIAL DEL PROCESO

En el presente capítulo se realiza una descripción funcional del proceso desde el punto de vista del controlador, detallando aspectos que son importantes para el desarrollo del sistema de control como lo son: asignación de entradas y salidas, alarmas, puntos de consigna de las variables y la esquematización secuencial del proceso, las cuales se desarrollan o definen a continuación:

5.1 IDENTIFICACION DE ENTRADAS Y SALIDAS INVOLUCRADAS EN EL PROCESO.

El control efectivo de un proceso industrial se basa en el continuo intercambio de información entre el equipo de control y dicho proceso para este caso, la generación de energía eléctrica en una P.C.H.

Para hacer posible este intercambio de información, el sistema de control debe contar con una serie de entradas y salidas, las cuales dependen del tipo de variables a medir y de las acciones de control requeridas en el proceso.

A continuación se describen las entradas y salidas que interactúan en el proceso de generación, todas ellas vistas desde el punto de vista del controlador. (A cada una de ellas, se le ha asignado un número correlativo, con lo cual se facilitara su identificación en los apartados posteriores).

5.1.1 ENTRADAS DE SISTEMA

Se define como entrada a cualquier señal o variable que actúa desde el proceso hacia el controlador, o sea la información que se recoge del proceso. Cada entrada se identificara por la letra característica "E" y su numero correlativo

A continuación se enumeran las entradas consideradas más importantes para el desarrollo del sistema de automatización y se da una breve descripción de cada una de estas:

E1: Entrada de nivel en la cámara de carga, esta entrada proporciona el valor del nivel del agua en la cámara de carga.

E2: Entrada de temperatura en turbina, esta entrada obtiene el valor de la temperatura con que se encuentra operando la turbina.

E3: Entrada de temperatura en chumacera 1: esta entrada obtiene el valor actual de temperatura en la chumacera 1.

E4: Entrada de temperatura en chumacera 2: esta entrada obtiene el valor de temperatura en la chumacera 2.

E5: Entrada de nivel de aceite: chequea que el nivel de aceite con que opera la turbina sea el optimo para su funcionamiento.

E6: Entrada de voltaje de red: Esta entrada supervisa la existencia de voltaje en la red de distribución a la que debe conectarse el sistema.

E7: Entrada de velocidad en el eje turbina-generador: Chequea el valor de la velocidad con que gira el eje de la turbina-generador.

E8: Entrada de posición de alabes del distribuidor: Esta entrada proporciona el valor de posición en que se encuentran los alabes del distribuidor.

E9: Entrada del sistema de enfriamiento: Chequea la existencia de flujo de agua en las tuberías de enfriamiento de la turbina.

E10: Entrada de señal de alabes cerrados: Esta entrada recibe una señal cuando los alabes se encuentran completamente cerrados.

E11: Entrada de activación del sistema: Esta entrada pone en marcha el sistema.

E12: Entrada de paro del sistema: Desconecta o manda a paro el sistema.

E13: Entrada de señal de conexión: chequea que el sistema ha conectado con la red de distribución.

E14: Señal de plena carga: Esta señal indica cuando el sistema genera a la máxima potencia permisible por las condiciones operativas del proceso.

5.1.2 SALIDAS DEL SISTEMA.

Se define como una salida a cualquier señal o variable que actúa desde el controlador hacia el proceso o la planta o sea las acciones de control hacia el proceso. Las salidas se identifican con la letra característica "S" y su numero respectivo.

A continuación se enumeran las salidas consideradas más importantes para el desarrollo del sistema y se da una breve descripción de cada una de estas:

S1: Salida de cierre de alabes: Manda una señal para el cierre de los alabes del distribuidor.

S2: Salida de apertura de alabes: Esta salida da la orden para la apertura de los alabes del distribuidor.

S3: Salida del sistema de lubricación: Esta salida manda una señal para la activación de los dispositivos de lubricación del sistema.

S4: Salida de activación de conexión: Esta salida manda la señal de conexión del generador con la red de distribución.

5.1.3 ALARMAS DEL PROCESO.

Se define como alarma a cualquier condición fuera de los rangos normales de operación del proceso; a continuación se definen las 3 condiciones de alarma que pueden ocurrir durante el proceso de generación:

Ac : Alarma Critica: Condición en la cual la P.C.H. no puede seguir operando. Al ocurrir este tipo de alarma el sistema pasa automáticamente al paro total.

Entre los casos de alarma critica que pueden ocurrir durante el proceso están los siguientes:

- Alarma critica de temperatura: Esta se da cuando la temperatura, ya sea en chumaceras o en turbina, excede los limites permisibles de funcionamiento.
- Alarma critica de nivel: Esta se presenta cuando el nivel en la cámara de carga cae a un valor en el cual no es posible operar (rango critico).
- Alarma critica de nivel de aceite: Esta se activa cuando se detecta un nivel bajo de aceite en la turbina, con lo cual no puede seguir operando el sistema.

Alarmas de control: Estas alarmas se presentan cuando la condición que la origina puede corregirse mediante una acción de control. Las alarmas de control que pueden ocurrir durante el proceso son:

An: Alarma de control de nivel: Al presentarse esta alarma se activa el lazo de control de nivel del sistema, para corregir el error presente.

At: Alarma de control de temperatura: Al presentarse esta alarma se activa el lazo de control de temperatura del sistema.

5.2 ESQUEMATIZACION SECUENCIAL DEL PROCESO.

Para poder desarrollar el sistema de control secuencial del proceso es preciso asignar a las diferentes etapas del proceso su respectivo estado lógico dentro de la secuencia de control.

A continuación en la tabla 5.1 se detallan los estados o eventos en que se divide el control secuencial del proceso de generación de energía eléctrica en la P.C.H. asignándoles a cada uno de ellos la letra característica que lo representara en el diagrama de estado secuencial.

ESTADO	Descripción DE ETAPA
A	Preparación para arranque
B	Sincronía
C	Conexión
D	Plena Carga
E	Operación
F	Control de Nivel
G	Control de Temperatura
H	Desconexión Parcial
I	Desconexión Total

Tabla 5.1 Asignacion de estados del proceso

DETERMINACION DE EL DIAGRAMA DE ESTADO.

El diagrama de estado describe la forma en que los diferentes estados del proceso interactúan entre sí, dependiendo de las condiciones operativas que ocurren durante la ejecución del proceso; de acuerdo a lo planteado durante la descripción del proceso en el capítulo II.

CONDICIONES REQUERIDAS PARA SALTOS DE UN ESTADO A OTRO

Durante el desarrollo del proceso operativo de la P.C.H, el controlador debe proceder a realizar diferentes acciones para las cuales debe de pasar de un estado del proceso a otro, lo cual se denomina salto o bifurcación.

A continuación se presentan en la tabla 5.2 las condiciones tanto de alarmas como de entrada, para las cuales se da un salto de estado a estado en el proceso.(El numero correspondiente a las condiciones , equivale a la entrada, según la asignacion de E/S vista anteriormente en el apartado 5.1)

SALTO		CONDICIONES								
		AL	E6	E7	E9	E10	E11	E12	E13	E14
A	B	0	1	0	1	1	1	0	0	0
B	B	0	1	0	1	0	1	0	0	0
B	C	0	1	1	1	0	1	0	0	0

B	H	0	0	X	1	X	1	0	0	0
B	I	Ac=1	X	X	X	X	1	1	0	0
C	C	0	1	1	1	0	1	0	0	0
C	D	0	1	1	1	0	1	0	1	0
C	H	0	0	1	1	0	1	0	X	0
C	I	Ac=1	X	X	X	0	1	1	X	0
D	D	0	1	1	1	0	1	0	1	0
D	E	0	1	1	1	0	1	0	1	1
D	H	0	0	1	1	X	1	1	1	X
D	I	Ac=1	X	X	X	X	1	1	1	X
E	E	0	1	1	1	0	1	0	1	1
E	F	An=1	1	1	1	X	1	0	1	X
E	G	At=1	1	1	1	X	1	0	1	1
E	H	0	0	X	1	X	1	0	1	1
E	I	Ac=1	X	X	X	X	1	1	X	X
F	F	An=1	1	1	1	X	1	0	1	X
F	E	0	1	1	1	0	1	0	1	1
G	G	At=1	1	1	1	X	1	0	1	X
G	E	0	1	1	1	0	1	0	1	1
H	H	0	0	X	1	X	1	0	0	0
H	B	0	1	0	1	X	1	0	0	0
I	I	Ac=1	X	X	X	X	X	X	0	0
I	A	0	1	0	0	1	1	0	0	0

Tabla 5.2 Condiciones de saltos de estado a estado

El diagrama de estados del proceso de generación de energía eléctrica en la P.C.H es el mostrado en la figura 5.1, (las letras corresponden a un estado específica según se estableció en la tabla 5.1)

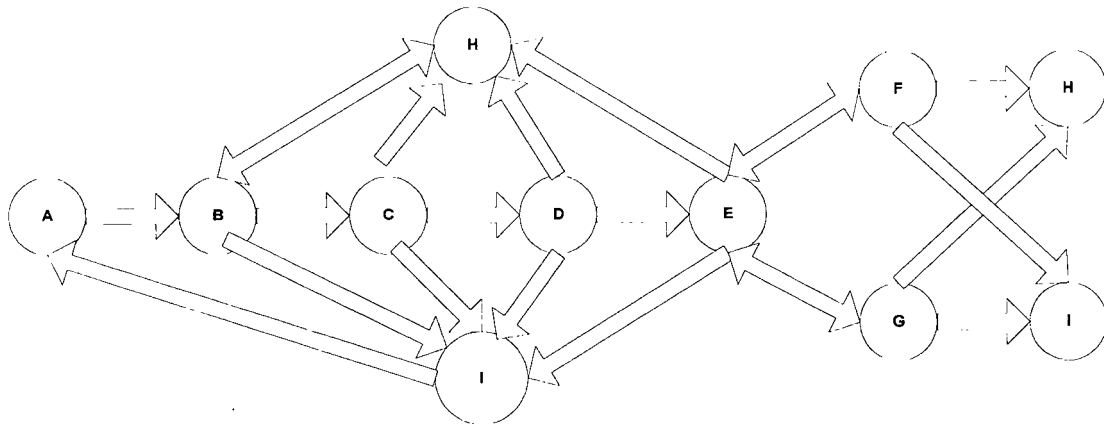


Figura 5.1 Diagrama de estados del sistema

5.3 DETERMINACION DE LOS PUNTOS DE CONSIGNA DE LAS VARIABLES.

Se define como punto de consigna a los diferentes rangos de valores de las variables del proceso que el controlador tendrá como referencia para poder ejecutar alguna acción durante el proceso.

A continuación se presentan los diferentes puntos de consigna que pueden tomar las variables que se involucran en el proceso de generación según las características operativas propias de la P.C.H de Sonsonate.

5.3.1 NIVEL EN CAMARA DE CARGA.

Los valores en que puede variar el nivel de agua en la cámara de carga están determinados por tres límites, los cuales son:

- 1- Nivel máximo de operación. (560cm)
- 2- Nivel mínimo de operación. (542cms)
- 3- Nivel Crítico. (503cms)

Todos los valores anteriores son referenciados a partir del fondo de la cámara de carga. De los límites anteriores se determinan los rangos operacionales siguientes:

Rango de Operación: Este rango está delimitado entre el nivel máximo de operación y el mínimo de operación, y es en dicho rango que debe permanecer el nivel de agua para que el sistema pueda generar energía eléctrica en condiciones normales.

Rango de Regulación de Nivel: Este rango se encuentra delimitado entre el nivel mínimo de operación y el nivel crítico, al presentarse esta condición entra en operación el lazo de control de nivel. Produciéndose la alarma An.

Rango de Nivel de Desconexión del Sistema: Este rango está determinado en la zona en la cual el nivel de agua en la cámara de carga es igual o menor al nivel crítico, es en esta condición que se procede a la desconexión o paro total del sistema, produciéndose una alarma crítica en este.

5.3.2 TEMPERATURA EN TURBINAS Y CHUMACERAS.

Durante el proceso de generación es preciso chequear los valores de temperatura en tres puntos estratégicos del sistema, los cuales son: Chumacera 1, Chumacera 2, y Turbina.

Los valores de temperatura que pueden ocurrir, tanto en la turbina y chumaceras están determinados por los siguientes límites:

- 1- Temperatura normal de operación
- 2- Temperatura máxima de operación a plena carga
- 3- Temperatura crítica.

De los cuales se determinaron los rangos operativos que se detallan a continuación.

Rango de Operación: Este rango está delimitado por la temperatura normal de operación y la temperatura máxima de operación a plena carga. Cuando todas las temperaturas se encuentran en un punto dentro de este rango el sistema puede operar continuamente a plena carga en condiciones normales de Operación.

Rango de Control de Temperatura: Este rango se encuentra delimitado entre la temperatura máxima de operación a plena carga y la temperatura crítica. En este rango entra en operación la rutina de control de temperatura, la cual realiza dicho control, bajando la carga generada por el grupo turbina generador de la P.C.H. hasta un valor preestablecido.

Esta operación de bajar carga se subdivide, en 3 etapas, las cuales se ejecutan en el siguiente orden:

1. Bajar carga hasta un 75% del total: Rango de temperaturas en las cuales, debe bajarse la carga del sistema a un 75% de la carga total, para que el sistema pueda seguir operando.

2. Bajar carga hasta un 50% del total: Rango de temperaturas en las que se debe proceder a bajar la carga generada a un 50 % de la carga total.

3. Bajar carga hasta un 25% del total: Rango de temperaturas en las que se debe bajar la carga del sistema a un 25% de la carga total.

Rango de Desconexión: Este rango esta delimitado por el valor de temperatura critico, al sobrepasar alguna de las temperaturas del sistema, dicho valor, se procede a la desconexión o paro total del sistema, produciéndose una alarma critica de temperatura.

En la tabla 5.3 se presentan los valores reales operativos para cada una de las temperaturas involucradas en el proceso de generación de la P.C.H. de Sonsonate :

TEMPERATURAS	CHUMACERA 1	CHUMACERA 2	TURBINA
Tº Nominal de operación	35°C	35°C	50°C
Tº Max de operación	55°C	55°C	65°C
Tº Bajar a 75% de carga	56°C	56°C	66°C
Tº Bajar a 50% de carga	58°C	58°C	68°C
Tº Bajar a 25% de carga	60°C	60°C	70°C
Tº Critica	62°C	62°C	72°C

Tabla 5.3 Rangos de temperaturas del sistema

5.3.3 VELOCIDAD DEL EJE TURBINA-GENERADOR.

Durante la etapa de sincronía, debe llevarse dicha velocidad hasta el valor de velocidad de sincronización, el cual debe ser igual o ligeramente mayor a 720 R.P.M(revoluciones por minuto), durante la etapa de sincronía, entra en operación la rutina de control de velocidad, el cual deja de actuar una vez el sistema ha sido sincronizado.

5.4 CONDICIONANTES DE EL PROCESO.

Al presentarse en el mismo instante las alarmas de nivel y temperatura, el sistema debe de ser capaz de priorizar; por tanto debe de atenderse primero la alarma de temperatura y terminada dicha acción de control deberá atenderse la alarma de nivel, si acaso esta persiste.

La alarma de desconexión por falta de red tiene prioridad sobre las alarmas de control de nivel y temperatura, excepto por las condiciones críticas, ya que estas tienen prioridad sobre todas las demás alarmas, debido a que al presentarse alguna condición crítica cualquiera, el sistema deberá pasar a paro total inmediatamente.

CAPITULO VI

DETERMINACION DEL TIPO DE CONTROL

Una vez determinados los modelos matemáticos o ecuaciones temporales del sistema y habiendo definido el análisis secuencial del proceso, se procede a determinar el tipo o estrategia de control a aplicar tanto en los lazos de control de velocidad como de nivel.

Esto es de suma importancia para el desarrollo del sistema de automatización, ya que aquí se define la forma en que el controlador actuará sobre el proceso de generación ante determinadas condiciones operativas.

6.1 CONTROL DE VELOCIDAD.

Características requeridas en control de velocidad

A continuación se detallan las principales características que se requieren para la acción del lazo de control de velocidad en el eje turbina generador, tales características surgen de acuerdo al proceso de generación de energía eléctrica, al análisis secuencial del proceso desarrollado en el capítulo V y también por procedimientos operacionales cotidianos que se efectúan durante la etapa de arranque y sincronismo de la P.C.H. de Sonsonate, y son :

- Debe llevarse inicialmente la posición de los alabes del distribuidor hasta una apertura "Xi" en la cual se asegure vencer la inercia del sistema. Provocando así un aumento notorio de velocidad en el eje turbina generador, no excediendo demasiado los 720 r.p.m. especificados.

- La velocidad en el eje turbina generador debe llevarse hasta un valor igual o ligeramente mayor a 720 r.p.m. ya que es la velocidad a la cual sincroniza la P.C.H de Sonsonate para conectar con la red de distribución eléctrica comercial.
- Luego de haber realizado la apertura inicial X_i , el incremento de velocidad del sistema debe hacerse en forma pausada ya que al proveer de una entrada continua, en este caso entrada de flujo másico de agua al rotor de la turbina, se incurre a una entrada tipo rampa, por tanto la respuesta del sistema no sería igual a la de un sistema de primer orden, desestabilizándolo, es por ello que el controlador debe esperar un tiempo entre cada apertura, excitando al sistema con una entrada tipo escalón, para que de esta forma la velocidad pueda estabilizarse.
- Una vez en sincronismo la velocidad es constante en el eje del generador, debido a las características de generación asincrona, por tanto el sistema el control debe dejar de operar.

Restricciones del control de velocidad.

- No deben realizarse aperturas del distribuidor muy prolongadas de manera continua, ya que se corre el riesgo de sobreacelerar el sistema y provocar el desboque de la turbina.
- No debe sincronizarse el sistema a velocidades menores o excesivamente mayores de 720 r.p.m. ya que se corre el riesgo de motorizar el sistema.

6.1.1 ESTRATEGIA DE CONTROL

A continuación se determinará el tipo de control de velocidad a utilizar en el diseño , tomando como referencia las características requeridas anteriormente y la respuesta temporal del sistema obtenida en base a la deducción del modelo matemático de velocidad de la planta..

Según la ecuación (1) obtenida bajo condiciones operacionales de la planta, puede apreciarse que el sistema en condiciones ideales presenta un comportamiento lineal entre la velocidad de estabilización y la apertura inicial de los alabes, dicha relación indica que al incrementar la apertura (X) se produce un incremento en la velocidad del eje turbina generador.

La respuesta temporal del sistema de velocidad viene dada por la ecuación (3) deducida en el capítulo IV, demostrando una respuesta de primer orden en la cual la variable en este caso la velocidad se estabiliza al transcurrir el tiempo, condición importante que indica el control factible de dicha variable, la gráfica se muestra a continuación en la figura (6.1):

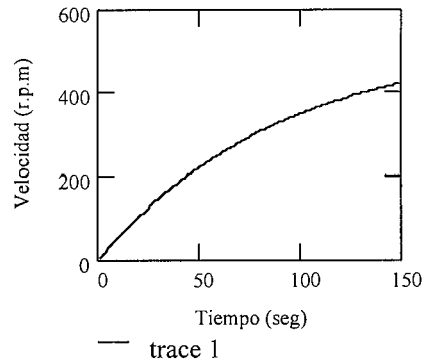


Figura 6.1 Gráfica velocidad eje turbina - generador vrs. tiempo

De la gráfica anterior, se observa que la respuesta de velocidad en el tiempo, bajo cierta apertura inicial (1.4 cms), se comporta como una respuesta típica de un sistema de primer orden ante una excitación escalón, lo cual indica que el sistema posee un alto grado de estabilidad, ya que no presenta oscilaciones. Además la ecuación (4) deducida anteriormente demuestra que se puede alcanzar la velocidad de sincronía incrementando paulatinamente a pasos iguales la apertura del distribuidor.

De esta forma puede establecerse, un control de velocidad de tipo secuencial o por orden de los eventos, el cual ejecute una serie de secuencias que cumplan con las características y restricciones establecidas para llevar el sistema a sincronización.

La secuencia a realizar por el controlador es la siguiente:

Primeramente se llevará los alabes del distribuidor hasta un valor de apertura inicial X_i con el cual se asegure vencer la inercia del sistema, logrando así que la turbina comience a girar.

Luego se procederá a incrementar la velocidad abriendo el distribuidor en pasos a ΔX iguales, hasta llegar a una apertura del distribuidor X_f en la cual se asegura que la velocidad en el eje de la turbina llegue a la velocidad de sincronía.

Para lograr las acciones de control propuestas, es necesario dimensionar los parámetros necesarios que deben estar contenidos en la rutina de control de velocidad del controlador.

6.1.2 DETERMINACION DE PARAMETROS

Se conoce como parámetros, a todos aquellos valores numéricos que efectivamente operan sobre la planta para concretar una acción de control. En el caso del control de velocidad, estos dimensionan o cuantifican las acciones de control a implantar, como lo son: apertura de los alabes del distribuidor y el tiempo de espera o temporización de dichas acciones de control. Los parámetros a determinar se enumeran a continuación :

1. Apertura final del distribuidor (X_f)
2. Apertura inicial del distribuidor (X_i) y constante de tiempo de estabilización. (T_1).
3. Delta de apertura (ΔX) y constante de estabilización (T_2).

1. Determinación de apertura final (X_f):

La apertura final (X_f) es el valor de apertura al que tiene que llevarse el distribuidor para llegar a la velocidad de sincronismo.

El valor de X_f se calculo de la forma siguiente:

Sustituyendo V_s por 720 r.p.m. en la ecuación (1) y despejando el valor de "X", se obtiene el valor de apertura final que debe tener el distribuidor para alcanzar la velocidad de sincronismo durante la etapa de sincronización.:

$$X = (720 + 109.31) / 384.91 \quad X = 2.15 \text{ cm}$$

Por tanto es necesario llevar la apertura de los alabes, hasta este valor o uno ligeramente mayor, para alcanzar la velocidad de sincronismo, Por consiguiente para el presente diseño se asumirá un $X_f = 2.2 \text{ cm}$ con el cual asegura que el sistema llegue a sincronizar.

2. Determinación de apertura inicial (X_i):

Durante las pruebas practicas operacionales realizadas en la planta en su fase de arranque y sincronismo, se estableció que el valor de apertura mínima del distribuidor con el cual se vence la inercia del sistema es de 1.4cm.

De lo anterior se determino para el presente diseño que el valor de apertura inicial (X_i) a la que se llevará el distribuidor al iniciar el control de velocidad sería de $X_i = 1.6 \text{ cms}$ con el cual se asegura vencer la inercia del sistema.

Al sustituir $X = 1.6 \text{ cms}$ en la ecuación (2) se obtiene el valor de constante de tiempo de estabilización T_1 , que establece el tiempo necesario de espera después de la apertura inicial de los alabes a 1.6 cms, asegurando así, la estabilización del sistema.

$$T1 = 158.45(1.6) - 154.98$$

$$T1 = 98.54 \text{ seg.}$$

3. Determinación del delta de apertura (ΔX):

El cálculo del delta de apertura estima la apertura del distribuidor a pasos iguales en intervalos de tiempo iguales, necesarios para que la velocidad del eje se estabilice.

Para obtener el parámetro delta de apertura, se sabe que el delta de apertura multiplicado por el número de veces de aperturas del distribuidor, es igual al espacio recorrido de este, desde su apertura inicial hasta su apertura final. Así el número de aperturas a realizar luego de la apertura inicial X_i , se ha estimado de 3 aperturas iguales, basándose en los resultados de las pruebas operacionales realizadas en la planta, así después de haber realizado la apertura inicial (X_i), se prosigue con tales aperturas, con el fin de sincronizar el sistema de forma rápida y segura, de lo anterior se obtiene la ecuación número 8:

$$\Delta X = (X_f - X_i) / \# \text{ de Aperturas} \quad . \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$\Delta X = (2.2 - 1.6) / 3 = 0.2 \text{ cms}$$

De las pruebas realizadas en la planta especificadas en el apartado 1.2.5 se determinó que el valor de la constante de tiempo de estabilización para $\Delta X = 0.2 \text{ cm}$ es:

$$T2 = 45.45 \text{ seg.}$$

6.1.3 ESQUEMATIZACIÓN DEL CONTROL SECUENCIAL DE VELOCIDAD

Durante la operación del lazo de control de velocidad, el valor de velocidad debe ser detectado o realimentado hacia el controlador, para que este realice la acción de control necesaria al presentarse los 720 r.p.m.. En el siguiente diagrama de bloques se muestran los elementos necesarios para realizar las funciones de control requeridas, de acuerdo a características secuenciales intrínsecas del proceso. En la figura 6.2 se muestra el diagrama de bloques del control.

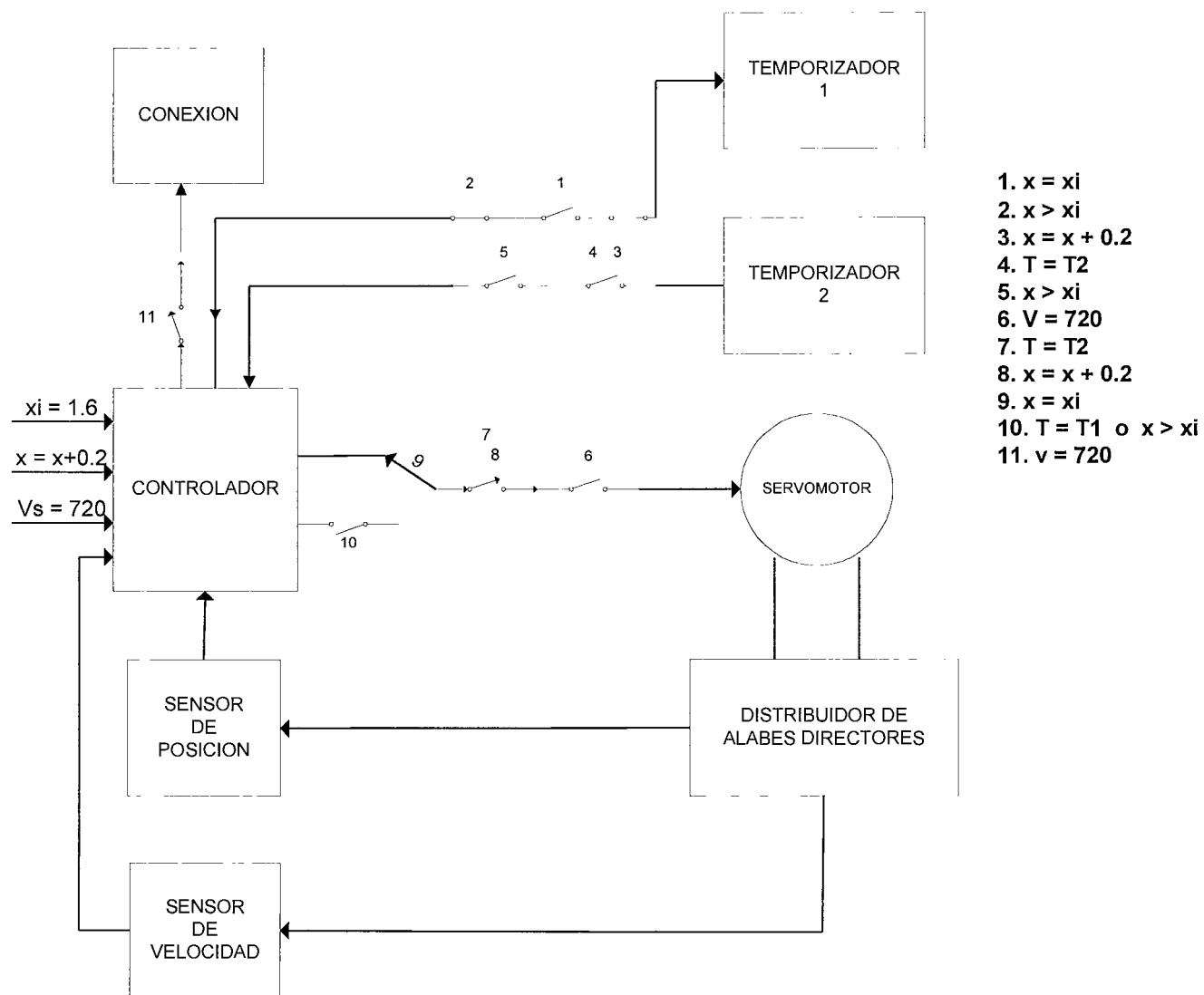


Figura 6.2. Diagrama de bloques control de velocidad.

De esta forma el controlador debe de ser capaz de abrir el distribuidor hasta un valor de apertura inicial " $x_i = 1.6$ cm", donde se activara un retardo de tiempo (T_1), el cual dará el tiempo necesario para que la velocidad del eje turbina-generator se estabilice a una velocidad V_{s1} , al finalizar la temporización de T_1 , el controlador procederá a abrir los alabes de forma pausada en ΔX de 0.2cm activando el retardo de tiempo (T_2) al finalizar

cada apertura ; esta acción se repetirá hasta que el lazo de velocidad detecte sincronía. Al ocurrir tal situación el controlador realizara la conexión de la red de distribución con el generador asincrono.

6.2 CONTROL DE NIVEL

Características del control de nivel

A continuación se presentan las principales características con que debe contar el lazo de control de nivel a desarrollar:

- Debe aplicarse una acción de control al sistema, mientras el nivel de la cámara de carga sea igual o menor al nivel mínimo de operación (542cm). Siendo este nivel el que indica que el sistema esta operando fuera de los rangos que condicionan la eficiencia del mismo, tal nivel esta determinado por las características propias de la P.C.H de Sonsonate.
- El controlador debe mantener el nivel de la cámara de carga en el rango de operación del sistema mientras las condiciones operativas lo permitan. La figura 6.3 muestra el rango de operación de la cámara de carga.



Figura 6.3 Rangos de operación de cámara de carga, P.C.H de Sonsonate.

- Mientras el nivel de la cámara de carga permanezca el rango de operación el sistema debe permanecer monitoreando las variables.
- Al situarse el nivel en la cámara de carga arriba del nivel máximo de operación, el sistema debe pasar a la etapa de control denominada "Plena carga", que consiste en abrir los alabes hasta los niveles en que el caudal de entrada puede dar al sistema, el máximo de la potencia eléctrica que es posible generar.

Restricciones del control de nivel.

- La apertura de los alabes del distribuidor no deben localizarse en un punto en el cual se genere menos del 25% de la potencia total generada.
- Si el sistema se aproxima o detecta un nivel crítico de operación, el sistema pasara a la etapa de desconexión generándose las alarmas respectivas.

- El tiempo de acción de control debe de ser menor a la constante de tiempo de la condición mas critica en la cual el nivel desciende con mayor velocidad, para asegurar una acción correctiva eficiente.

6.2.1 ESTRATEGIA DE CONTROL DE NIVEL.

De acuerdo a lo anterior la estrategia de control a utilizar deberá de regular el nivel dentro de un rango en el cual es posible generar energía eléctrica. La posición exacta de este nivel no es un punto fijo determinado ya que lo importante es que el nivel en la cámara de carga se mantenga dentro del rango de operación.

De acuerdo a las pruebas efectuadas en la planta, estas demuestran que al variar la posición de los alabes se puede regular el nivel de agua en la cámara de carga, por tanto la acción de regulación de nivel se hará mediante el cierre de los alabes, disminuyendo la apertura del distribuidor.

La detección del nivel es necesaria para efectuar el control del nivel. Este detectara los rangos ya especificados, cada nivel determina una o ninguna acción de control, así como se muestra en la tabla 6.1:

Nivel del medidor	Acción
$N \leq$ Mínimo de operación (542 cms)	Acciona el control de nivel, cerrando los alabes hasta llevarlo al rango de operación.
$N =$ Mínimo crítico de operación (503 cms)	El control debe aplicar la etapa de desconexión
Mínimo de operación $\leq N \leq$ Máximo de operación	El control debe entrar en estado de supervisión de variables.
$N \geq$ Máximo de operación (560)	El control debe llevar al sistema a la etapa de plena carga.

Tabla 6.1 Acciones de control dependiendo de la lectura de nivel en cámara de carga

La acción de control de nivel se presenta cuando el sensor de nivel detecta un nivel menor o igual al nivel mínimo de operación (o sea a unos 542 cms de altura con respecto a la toma de medida).

El calculo del cambio de apertura ante un cambio de nivel se hace a partir de la ecuación 5, esta ecuación da el valor de delta de "X" (ΔX) que deben ser cerrados los alabes con el fin subir un delta de nivel (ΔN).

$$\Delta X = 0.14 \Delta N + 0.16 \text{ (Ecuación 5)}$$

Al sensor un nivel de agua en la cámara de carga por debajo del mínimo de operación, el control calcula el desplazamiento lineal ΔX que se deben cerrar los alabes de acuerdo a la ecuación (5) y procede al cierre de los alabes en un ΔX . Una vez realizada esta operación el control debe esperar el tiempo de estabilización del nivel para tomar la decisión de aplicar o no otra acción correctiva de acuerdo a la lectura que en el sensor refleje. Este tiempo de estabilización viene dado por la ecuación (6) , que relaciona la constante de tiempo del cambio de nivel del sistema contra cambio lineal de los alabes.

$$T = 7.072 X - 2.227 \text{ (Ecuación. 6)}$$

Por lo tanto este es el tiempo que el controlador debe esperar para ejecutar una nueva acción si es necesario cabe decir que la variable "X" es sustituida por el valor de delta "X" calculado por el controlador. Si transcurrido este tiempo dicha variable esta en el rango de operación el control dejara de actuar y pasa a la etapa de operación (Ver tabla 3.1) , Si se da el caso en que la lectura del nivel se encuentra abajo del nivel mínimo de operación (542 cms) el controlador volverá a efectuar otra acción de control, como anteriormente se describió.

El cierre del distribuidor estará limitado como se menciona en las restricciones del control , a un valor de apertura tal que proporcione al menos el 25% de la carga total.

6.2.2 TIPO DE CONTROL DE NIVEL A UTILIZAR.

De las características anteriores se puede establecer que la acción de control a tomar por el controlador sera proporcional a la señal de error detectada.

Por consiguiente el sistema calculara el error producido por un nivel abajo del limite de nivel mínimo de operación y proporcional a este calculara la acción de corrección necesaria. El primer error que se detectara siempre será: el valor optimo de operación (560cms) menos el valor mínimo de operación (542cms),

$$\text{Error mínimo de detección} = 560 \text{ cm} - 542 \text{ cm} = 18 \text{ cm}$$

Como puede observarse esta diferencia es de 18cm, y representa el error de nivel mínimo, para el cual actuará el controlador.

De esta forma el controlador por medio de la ecuación $\Delta X = 0.14\Delta N + 0.16$ establecerá el valor necesario del cambio de posición del distribuidor para corregir el error de nivel que para el caso anterior deberá subir un valor de 18 cm arriba del nivel mínimo de operación.

Dicho valor de ΔX se calcula a continuación según la ecuación 5:

$$\Delta X = 0.14(18 \text{ cms}) + 0.16$$

$$\Delta X = 2.6 \text{ cms}$$

Esto indica que el distribuidor se moverá 2.6 cms a partir de la posición a la que se detecto el error. La siguiente figura 6.4 muestra el diagrama de bloques requerido para el control.

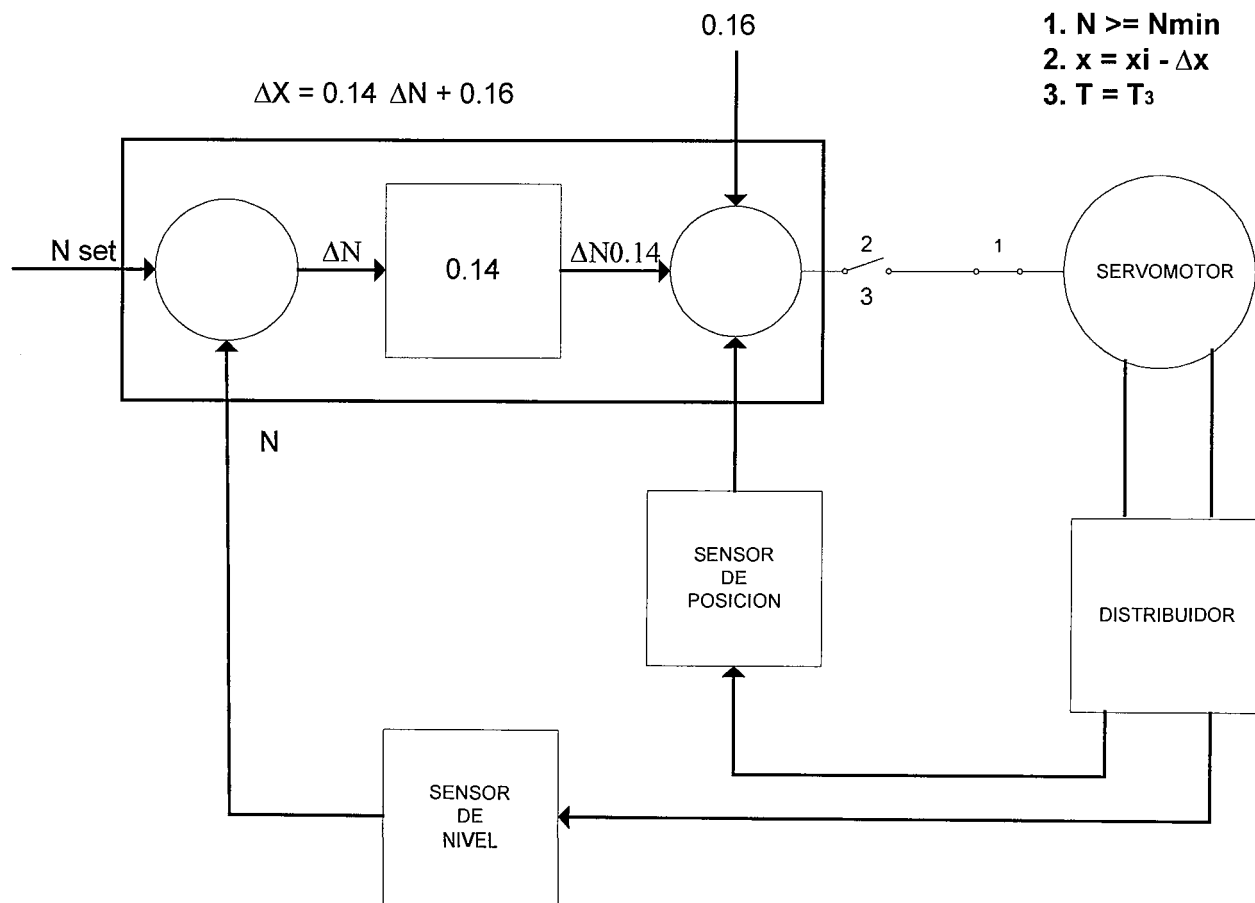


Figura 6.4 Diagrama de bloques control de nivel.

Debido que el nivel en la cámara de carga se controlara dentro de una banda o rango de control, el cual estará entre el nivel máximo y mínimo de operación, la aplicación de un control proporcional es suficiente para mantener los requerimientos del control del sistema.

A continuación se presenta el caso crítico en el cual el nivel de la cámara de carga desciende desde el nivel máximo total (600 cms) hasta el nivel crítico (503) estando los alabes del distribuidor totalmente abiertos (8cm). Condición en la cual se presenta cambios de nivel bastante grandes.

Luego se presenta la respuesta del sistema ante la acción de control más pequeña a la que el controlador puede actuar (al detectar el nivel mínimo de operación)

El gráfico que responde a ambas respuestas se muestra en las siguiente figura 6.5 :

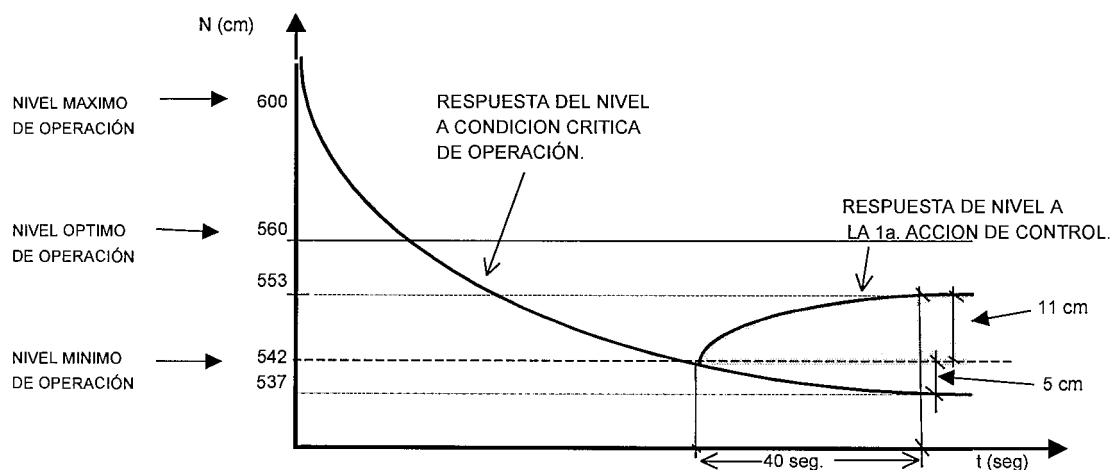


Figura 6.5 Nivel descendiendo de su máximo de operación (alabes completamente abiertos) y primera acción de control al detectarse error mínimo cuando desciende el nivel abajo del nivel mínimo de operación.

Al observar el gráfico anterior a partir del punto en que se llega al nivel mínimo de operación , se observa que la acción de control se estabiliza aproximadamente a los 40 seg. de ser aplicada produciéndose un incremento de nivel, de aproximadamente de 11 cms. Por otra parte el nivel que viene descendiendo, al pasar 40 segundos luego de haber llegado al nivel mínimo de operación se observa que el nivel ha bajado en un valor de 5 cm el cual es menor que el alcanzado en la acción de corrección con lo cual el control garantiza que el nivel se situara en el rango de operación ante una situación crítica permisible.

Este control será efectivo para condiciones a las cuales el caudal de entrada en la cámara de carga no disminuya significativamente por un tiempo prolongado lo cual haría incontrolable el proceso, provocando la desconexión del sistema.

CAPITULO VII. SELECCIÓN DE EQUIPOS Y DISPOSITIVOS DE CONTROL

7.1 TIPOS DE SEÑALES REQUERIDAS

Para cada una de las entradas del sistema de control es necesario determinar el tipo de señal que deberá ser aplicada a estas.

A continuación se detalla cada una de las entradas del sistema y los requerimientos de señal necesaria.

7.1.1 SEÑALES DE ENTRADA

Señal de nivel. De acuerdo a los requerimientos que se plantearon en la descripción del lazo de control de nivel se determino que se necesita sensar el valor del nivel en la cámara de carga dentro de determinados rangos operativos. Por lo tanto se necesita que la señal en la entrada del controlador sea continua en el tiempo o instantánea, lo cual es proporcionado por una señal de naturaleza analógica.

Señal de temperatura. Los valores de temperatura tanto en chumaceras como en la turbina, deben ser monitoreadas continuamente mientras el sistema este en operación, por lo tanto el controlador debe ser capaz de identificar cuando la temperatura sobrepasa los tres limites definidos en el proceso. De lo anterior se concluye que las señales de temperatura, que interactúan desde el proceso hasta el controlador, deben de ser de naturaleza análoga, para poder realizar un muestreo de manera continua.

Señal de nivel de aceite en la turbina. Durante la medición del valor del nivel de aceite en la turbina el controlador debe de ser capaz de determinar cuando el nivel de aceite se encuentra ya sea abajo o arriba, de su nivel mínimo de operación. Por lo tanto se puede decir que solamente se necesita sensar un valor de señal que indique al controlador cuando exista aceite suficiente y cuando falta aceite.

De lo anterior se concluye que una señal de tipo digital cumple con las características requeridas en el sistema y es la señal adecuada para manejar esta entrada.

Señal de voltaje de red. Esta señal debe de ser capaz de indicar cuando existe voltaje en la red de distribución y cuando no existe voltaje en la red. Por consiguiente se concluye que no es necesario que proporcione un valor cuantitativo de voltaje sino que la señal nada mas indique la presencia o ausencia de voltaje. De lo anterior se determina que el requerimiento de señal para esta entrada es una señal de tipo digital.

Señal de velocidad. Debido que el generador con que cuenta la central de la P.C.H de Sonsonate es de naturaleza asincrona no es necesario sensar la velocidad de su eje durante la etapa de generación, sino que solamente se necesita que la señal indique al controlador el momento exacto en que la velocidad de la turbina es igual o ligeramente mayor a la velocidad de sincronismo (720 r.p.m.) por lo tanto se determina que el tipo de señal que cumple con estos requisitos es una señal de tipo digital la cual se activa cuando la velocidad del sistema llega a sincronismo.

Señal de posición de los alabes. Esta señal interviene durante todas las etapas del proceso y debe ser sensada de forma continua ya que es en la posición de los alabes donde se reflejan las acciones de control que son requeridas.

Por lo tanto es necesario que el controlador obtenga valores exactos de la posición de los alabes en un rango continuo durante las diferentes etapas que comprenden el proceso. De acuerdo a esto la señal que cumple con estos requerimientos es una señal de tipo análoga.

Señal de flujo de agua en tubería de enfriamiento. El requerimiento para esta entrada es que la señal debe ser capaz de indicarle al controlador si existe o no-flujo de agua en la tubería de enfriamiento. Por lo tanto los requerimientos de esta señal son de tipo digital.

Señal de alabes completamente cerrados. El requerimiento de señal para esta entrada es que la señal pueda indicar cuando los alabes están cerrado o cuando se encuentran abiertos. De lo anterior se determina que la señal adecuada para este caso debe ser de tipo digital.

Señal de conexión. La señal de conexión debe indicar al controlador cuando el sistema esta conectado a la red de distribución o sea que debe existir un valor de señal que

indique la conexión y otro que indique la desconexión del sistema. Por tanto la señal requerida debe ser de tipo digital.

Señal de plena carga: Esta señal debe indicar al controlador cuando la potencia generada por la P.C.H. ha llegado a su valor de plena carga. Por tanto se determina que el requerimiento de señal puede ser de tipo digital ya que solamente es necesario detectar un valor de potencia establecido.

7.1.2 SEÑALES DE SALIDA:

Señal de apertura del distribuidor: La función de esta salida es accionar o desactivar el motor de d.c. encargado de la apertura de los alabes, este motor se activa con la aplicación de voltaje en su armadura y se detiene al dejar de aplicar voltaje, por tanto el requerimiento para esta señal es de tipo digital (on -off).

Señal de cierre del distribuidor: La función a realizar por esta salida es el activar o desactivar el motor de d.c. que realiza el cierre de los alabes del distribuidor. El requerimiento de señal para esta salida es de tipo digital (on-off).

Señal de activación de dispositivos de lubricación: Esta señal activa o desactiva mediante la aplicación de un voltaje de d.c. los dispositivos de lubricación del sistema. Por tanto para esta salida se necesita una señal de tipo digital.

Señal para la conexión del sistema: Esta señal debe de ser capaz de conectar o desconectar el contactor principal de conexión a la red. De lo anterior se determina que el requerimiento de señal para esta salida debe de ser de tipo digital.

Señales de alarma: Las salidas de alarma deben de ser capaces de accionar algún tipo de señalización al presentarse alguna de las alarmas del sistema. Por consiguiente se especifica que la señal para estas salidas debe de ser de tipo digital.

De lo anterior se determina que el sistema de control a diseñar debe de ser capaz de poder manejar el número de entradas y salidas que se muestra en la tabla 4.1.

En la tabla 7.1 se muestran los requerimientos de entrada y salida del sistema.

	DIGITALES	ANALOGICAS
ENTRADAS	10	5
SALIDAS	9	0

Tabla 7.1 Entradas y salidas del sistema

CUADRO RESUMEN DE LAS SEÑALES DEL PROCESO.

SEÑALES A TRATAR	TIPO	RANGO DE OPERACIÓN Y MEDICION	ESTADOS O CONDICIONES
Nivel de Agua en la Cámara de Carga.	Continua Análoga	503 a 600 (cm)	Diversos dentro del rango de operación, siendo importante la detección de 4.
Velocidad eje Turbina - generador	Discreta O Continua.	0 a 720 (r.p.m.)	Para el caso, lo que interesa es si existe o no dicha velocidad.
Temperatura en turbina y chumaceras	Continua	Desde 35° hasta 72°	Valores entre el rango de operación y fuera del mismo.
Nivel de aceite	Discreta	Niveles que oscilan entre 10 y ± 0.3 cm	Existe o no el nivel adecuado de aceite en la cámara de la turbina.
Flujo de agua de enfriamiento	Discreta	Diámetros no mayores a 1 pulgada	Existe o no-flujo de agua en las tuberías de enfriamiento de la turbina
Existencia de voltaje y corriente de línea en la red de distribución pública de energía eléctrica.	Discreta o Continua	Digital 0 ÷ 5 Vcc	En este caso lo importante es determinar la existencia o no del voltaje en la red de forma que emita dicha condición cuando el voltaje se encuentre dentro de los rangos aceptables
Medición de la posición de los alabes del distribuidor	Continua	0 - 8 (cm)	Valores entre el rango de operación dichos valores son representados en forma lineal por la misma turbina de la P.C.H de Sonsonate de

			forma mecánica.
Posición de alabes totalmente abiertos o totalmente cerrados	discreta	0 o 8 cm	Esta el elemento mecánico de la turbina que emite dicha condición en un extremo(totalmente abierto) o en el otro(totalmente cerrado)
Señal de conexión a la red eléctrica	discreta	Digital 0 o 5 Vcc	Indica cuando el sistema esta en sincronismo y por ende la conexión del mismo a la red, en su estado contrario indicara sistema desconectado.

A continuación se presenta la selección de los equipos y dispositivos de control necesarios para poder realizar el presente diseño del sistema de control, según los requerimientos y necesidades tanto técnicos como funcionales involucradas en el proceso de generación de energía eléctrica.

7.2 SELECCIÓN DEL AUTOMATA PROGRAMABLE.

Como ya se especifico anteriormente, la solución adoptada en este diseño para desarrollar el algoritmo de control del proceso de generación de energía eléctrica en P.C.H. es la del autómata programable o P.L.C., por consiguiente se plantea la necesidad de seleccionar el equipo P.L.C. más adecuado para realizar tal tarea. Para esto debe hacerse un análisis sistemático de una serie de factores, los cuales se presentan a continuación:

7.2.1 FACTORES CUANTITATIVOS DEL PLC.

Se refiere a la capacidad en hardware que debe tener el equipo para proporcionar los medios técnicos necesarios para hacer factible la realización del control en el proceso. Estos factores pueden agruparse en las siguientes categorías:

Manejo de dispositivos de entrada y salida. :

El PLC a seleccionar debe ser capaz de manejar al menos un total de 10 entradas y 9 salidas digitales, así como 5 entradas de tipo análogos, todas conectadas de manera modular, para asegurar flexibilidad en posibles modificaciones futuras o ajustes en el diseño.

Velocidad de acceso de las interfaces.

La velocidad de PLC para acceder todos los periféricos debe ser menor a 1 seg. , Para garantizar la fiabilidad de la información al realizar el monitoreo y control de las variables, de acuerdo al teorema del muestreo¹ la señal más rápida a monitorear es las condiciones de la red comercial la cual tiene un retardo de 2 seg. Después de detectar un corte.

Capacidad de memoria del PLC.

El PLC debe de poseer por lo menos 4 Kbyte de memoria en RAM, para no limitar el tamaño del programa de control y la cantidad de datos a almacenar que en conjunto se estima en 3 Kbytes, tomando en cuenta un margen de actualización para futuras modificaciones.

Sistema de comunicación.

Las necesidades requeridas de comunicación para el PLC son al menos, la facilidad de intercambio de mensajes y datos con un modulo de despliegue visual o textual, vía interfaces standard serial o paralelo, así como la comunicación con una PC para facilitar la programación y depuración del programa, también para proveer los medios de implementación de interfaces visuales Humano- Maquina (HMI).

¹ Teorema que permite una velocidad de muestreo de 2 veces mayor o igual a la velocidad de la señal monitoreada.

Lenguaje de programación.

Para el desarrollo del programa de control del presente diseño, un P.L.C. con un conjunto de instrucciones potentes facilita la programación, reduciendo el tiempo empleado en el desarrollo del programa, y en general permitiría obtener menor espacio de memoria y mayor velocidad de ejecución, así como más aplicaciones de monitoreo y control.

Sobre la base de los tipos de control definidos para el proceso, el lenguaje de programación del P.L.C. debe de ser capaz de manejar los siguientes tipos de instrucciones:

- **Instrucciones de temporización y conteo.** El uso de temporizadores en el programa es fundamental para sincronizar los eventos y acciones de control en el proceso. El numero estimado de temporizadores de acuerdo al análisis secuencial del proceso y estrategias de control, es de al menos 20 temporizadores con una precisión en el orden de los decimos de segundo.

- **Instrucciones con funciones lógicas.** Estas instrucciones permitirán la solución de los tratamientos de información correspondientes a procesos lógicos secuenciales, mediante la implementación de las funciones lógicas o ecuaciones Booleanas. Entre las más comunes están las funciones Y, O, NOR, NAND, NOT, XOR, etc.

- **Instrucciones aritméticas.** EL lenguaje de programación y el PLC debe ser capaz de ejecutar las funciones aritméticas básicas de adición (+), sustracción (-), multiplicación (X) y división (/), con una precisión de coma fija de 16 bits, para asegurar precisión en los cálculos a realizar

- **Instrucciones de manipulación de datos.** Estas instrucciones permiten el manejo de información correspondientes a variables numéricas o contenidos de registros de datos. Entre estos tipos de instrucciones se encuentran : las funciones de comparación de variables numéricas, funciones de conversión de códigos y funciones de rotación o desplazamiento de información.

- **Instrucciones de configuración.** Estas instrucciones son utilizadas en la parametrización de los periféricos conectados al autómata, permitiendo una comunicación compatible entre el PLC, sensores y actuadores.
- **Instrucciones de control del ciclo de ejecución.** Estas permiten alterar la ejecución secuencial de las instrucciones por medio de saltos a otras regiones o rutinas del programa.

Además, el lenguaje de programación debe de poseer módulos de funciones para la programación de operaciones frecuentes, para facilitar la elaboración del programa y hacer más eficiente la ejecución.

Para la elección del PLC se debe tomar en cuenta los requerimientos anteriores., así como los siguientes criterios.

Recursos de Hardware y lenguajes de programación. Este criterio consiste en comparar los requerimientos de hardware del equipo de control e instrumentación según los requerimientos del proceso y los que ofrecen en programación los distintos PLC disponibles en el mercado, analizando si el lenguaje de programación alcanza el nivel necesario para elaborar el programa, con la limitante de no subutilizar los recursos de hardware del autómata por obtener lenguajes o aplicaciones necesarias o más avanzadas. La capacidad tecnológica de un fabricante para ofrecer una gama de formas más sencillas y completas de programación con un mínimo de recursos de Hardware requeridos, es uno de los criterios a utilizar en el diseño para la elección del PLC, tomando en cuenta que el lenguaje de programación debe estar de acuerdo a la naturaleza secuencial del proceso.

7.2.2 OPCIONES TECNOLOGICAS DE AUTOMATAS PROGRAMABLES.

A continuación se hará un análisis de las dos corrientes tecnológicas más importantes en automatización como lo es la tecnología europea representada por el fabricante SIEMENS, y la tecnología estadounidense como lo es GENERAL ELECTRIC, y ALLAN BRADLEY. Para esto se eligieron de antemano tres modelos de PLC que cumplen con

las mínimas características de hardware establecidas para el diseño, y se hará una comparación de las capacidades de los diferentes lenguajes y formas de programación que son factibles de desarrollarse en estos equipos.

Tabla 7.2 contiene un cuadro comparativo de tres modelos de PLC que cumplen con los mínimos requerimientos, de acuerdo a las características técnicas de hardware que el fabricante ofrecen:

CARACTERÍSTICAS DEL P.L.C.	SIEMENS S7-200 CPU 214	ALLEN BRADLEY SLC 5/ 01	GENERAL ELECTRIC 90/30 CPU 311
Máxima Memoria disponible para programas de usuario	4kbytes	4kbytes	6 Kbytes
Modulo de Memoria	EPROM/EEPROM	EPROM/EEPROM	EPROM
Tiempo de vigilancia de ciclo	300ms	100ms	400ms
Salidas intermedias	2,048	1024	1024
Temporizadores	128	512	170
Contadores	128	512	170
Numero max. De E/S digitales	64 / 64	128/128	160/160
Tensión de operación	24V	24Vdc	24Vdc
T° ambiente permisible	0...55°C	0..60°C	0...60°C
Numero max. de E/S análogas	16/16	16/16	64 /32
Lenguaje de programación base	Step 7 - micro	Rslogix	Logic Master 90
Inteterface de comunicación	RS-485	RS-485	RS-485
HMI	No disponible	No disponible	Disponible
Configuración máxima.	7 módulos de expansión	13 módulos de expansión	10 módulos de expansión
Potencia de consumo	11 Wats	20 Wats	30 Wats

Tabla 7.2 Cuadro comparativo de P.L.C

De acuerdo a la tabla anterior se concluye que ALLAN BRDALEY posee una ligera ventaja sobre GE - FANUC, y SIMATIC, especialmente en el tiempo de vigilancia de ciclo, y en la cantidad de módulos de expansión, permitiendo mayor flexibilidad en ajustes futuros del diseño.

En la siguiente sección se hará una evaluación técnica de los alcances y capacidades de los lenguajes y formas de programación de estos modelos.

Programación de Simatic S7- 200 CPU 214.

A continuación se dará un panorama general de la capacidad de los lenguajes de programación disponibles para los PLC SIMATIC S/, C/, M7, y que nivel puede alcanzar el PLC seleccionado.

En general existen 4 formas o representaciones de programación principales, entre ellas están:

Herramientas estándar (Standard tools)

Esta es la plataforma básica de programación para el Hardware de todos los modelos de PLC Simatic, y se compone de los siguientes lenguajes:

- STEP 7. Versión completa para todas las aplicaciones. Puede correr en sistema operativo DOS o bajo ambiente WINDOWS.
- STEP 7 – mini. Versión usada solo en SIMATIC modelo S7-300 y SIMATIC modelo C7, en un bajo nivel de funcionamiento.
- STEP 7- Micro. Lenguaje de programación para el SIMATIC modelo S7 – 200.

Herramientas para ingeniería.(Engineer Tools)

Son funciones o tareas orientadas que pueden ser usadas en conjunto con todas las versiones de STEP 7, Permitiendo al usuario concentrar las tareas de control y estructurar las subrutinas de una manera mas personalizada.

Este lenguaje contiene:

- Interfaces de programación con lenguajes de alto nivel
- Lenguajes con representaciones gráficas para aplicaciones especializadas, tales como gráficos en el tiempo, diagramas de BODE, gráficas estadísticas.
- Rutinas suplementarias para diagnostico y simulación, mantenimiento remoto, documentación del proceso en la planta, etc.

Este programa puede ser usado para todos los SIMATIC S/- 300(CPU-314) y superior.

Programas en tiempo de marcha. (Runtime Software)

Provee respuestas preprogramadas de interacción con el hardware, las cuales pueden ser llamadas por el programa del usuario. Existen 2 versiones:

1. Hardware limitado (Hardware bundle)

Programa asignado para cierto tipo de interfaces. En donde se puede configurar módulos de funciones personalizadas.

2. Hardware ilimitado (Hardware unbonded).

La diferencia con el anterior es que puede manejar todo tipo de interfaces disponibles.

De este perfil se puede concluir que el lenguaje de programa que corresponde al PLC S/- 200 CPU 314 es el STEP 7 versión micro, el cual es el lenguaje con mas limitaciones de la gama de aplicaciones que ofrece Siemens en monitoreo y control. Este lenguaje ofrece las siguientes representaciones:

- Lenguaje de programación LAD (Diagrama de contactos)
- Lenguaje de programación STL (Lista de instrucciones)

Entre las funciones mas importantes están las que se muestran en la tabla 7.3:

- Operaciones binarias	Control PID	Información general del CPU
- Evaluación de señales de transiciones	Asignación de parámetros para visualizador textual	Módulos de función de memoria
- Llamada de subrutinas	Conversiones numéricas	Prueba y depuración
- Contadores y temporizadores	Transferencia de datos	Instrucciones de configuración de redes
Contadores rápidos	Programación de lazos	
Aritmética de punto flotante	Redes de comunicación	
Funciones de comparación	Programación en y fuera de línea	

Tabla 7.3 Funciones de lenguaje de programación STEP 7

La característica más sobresaliente de este lenguaje es que posee una estructura simplificada de bloques. Un simple bloque o región de memoria, puede contener todo el programa del usuario y este, puede ser estructurado por medio de bloques de subrutinas o funciones.

Lenguaje de programación del PLC GE 90-30 CPU 311

GE Fanuc cuenta con los siguientes lenguajes de programación disponibles para toda la línea de equipos:

- **Lista de instrucciones.** Este lenguaje consiste en escribir por medio de mnemónicos las funciones booleanas del programa, y es usado para pequeños programas, que no requieren detalles de documentación.
- **Diagrama de escalera.** Es basado en el concepto de alambrado eléctrico analógico,
- **Lenguaje de programación C.** Ofrece avanzadas tareas de cálculo, haciéndolo ideal para usuarios que requieren programas personalizados con funciones complejas. Adicionalmente el lenguaje C provee al usuario la capacidad de incrementar la

velocidad y reducir el programa. El lenguaje C puede correr en la serie 90-30, con la inserción de un coprocesador matemático.

- **Diagrama secuencial de Funciones.** Es un lenguaje gráfico de estados, lo que involucra crear transiciones y enlaces dirigidos, pero al mismo tiempo se asocia las condiciones de transición, es entonces una representación gráfica del proceso tan fácil de entender como el lenguaje de escalera.
- **Lógica de estado.** Es un lenguaje que permite la descripción de un proceso por medio de una secuencia de estados y acciones, en el idioma natural del usuario, con la ayuda de un programa llamado ECLIPS. Una de las ventajas de este lenguaje es que permite al usuario modelar la aplicación que intenta controlar, permitiendo una extrema precisión del diagnóstico, facilidades de modificación, y automática documentación del programa. Las tareas son ejecutadas simultáneamente o en paralelo con un solo estado activo a la vez, este lenguaje es ideal para personal profesional y técnicos de mantenimiento. La serie 90-30 soporta este lenguaje, en donde el programa ECLIPS corre desde una P.C. y es conectado al PLC por medio de un puerto serial.

Cada representación posee funciones de copiado y corte de una área a otra del programa, también puede crearse una colección personalizada de módulos de funciones para ser utilizadas en nuevos programas. Logic Master 90 incluye las configuraciones de fuera de línea para realizar simulaciones y pruebas de programa sin que el PLC este conectado.

La serie 90-30 como las series más avanzadas comparten las mismas opciones de lenguaje de programación y ambientes de desarrollo mencionadas anteriormente, así como programas de monitoreo y control que ofrece las interfaces máquina - hombre (HMI) con una completa supervisión, control y adquisición de datos remota (sistema de redes), todo dentro de ambiente Windows.

El lenguaje que ofrece G.E es el **COMPLICITY HMI** el cual posee un editor de gráficos, para que el usuario elabore de una manera personalizada, los objetos virtuales

involucrados en el proceso, además de un visor que le permite la animación virtual de los eventos que están ocurriendo en tiempo real dentro de la planta.

Lenguaje de programación del ALLEN BRADLEY SLC 5 /01.

Rslogix es la plataforma de programación para la familia de PLC SLC 500 y SLC 5, que básicamente es una representación de escalera (ladder) desarrollada para operar bajo ambiente Windows 95. Dentro de los aspectos más relevantes del lenguaje están:

- Una interfaces común de usuario.
- Configuración de los módulos de entrada/salida
- Editor para bases de datos.
- Herramientas de diagnostico, y soluciones a problemas comunes.
- Configuración de puertos de comunicación.
- Editor de escalera para programación simbólica.
- Editor de instrucciones
- Editor para programación mediante diagrama secuencial de funciones.

Todas las representaciones tienen una función de edición especial llamadas Drag-Drop, que permite rápidos desplazamientos y copiado de instrucciones, con las facilidades que ofrecen las barra de herramientas, simultáneamente existe una opción de ventana personalizada de datos para visualizar estados de Bits, temporizadores, contadores, entradas, y salidas . Al mismo tiempo permite funcione de histogramas, tablas de datos, y gráficos en el tiempo de variables, menús de ayuda que muestran paso a paso la implementación de las instrucciones.

De acuerdo al estudio anterior de los alcances de programación de los modelos seleccionados, podemos concluir que si ALLEN BRADLEY tiene ventaja de hardware sobre los otros dos modelos, Siemens ofrece una mayor gama de programas de aplicación que permiten obtener un monitoreo y control mas completo pero con la desventaja que entre mas herramientas de programación son utilizada el PLC debe tener mayor capacidad de memoria, rapidez, mayor capacidad de manejo de interfaces, el cual es limitado en el caso del PLC S7 200 CPU 214 a la versión micro de STEP 7 con dos posibles representaciones (STL., LDR) y las funciones antes mencionadas, no

es así el caso del PLC GEFANUC 90-30 que tiene 4 representaciones posibles, y además es el único que tiene la posibilidad de programación visual con el programa ECLIPS y COMPLICITY HMI que son lenguajes avanzados de monitoreo y control visual, ventaja significativa sobre los otros dos PLC. Por lo tanto GEFANUC 90-30 es el PLC que presenta mejores características técnicas, ya que posee mayores posibilidades de programación para el usuario y la flexibilidad deseada de configuración del hardware.

CARACTERÍSTICA	SIEMENS SIMATIC 500	OMRON C200	GEFANUC ELECTRA 90-30
Lenguajes de programas disponibles	STEP 7 versión micro	RSLogix	Logicmaster 80 y Complicity -HMI
Número de representaciones	2	3	4
Facilidades de uso y aprendizaje	Medio	Alto	Alto
Monitoreo y control visual	No	No	Si
Conexión a redes locales	No	Si	Si
Configuración de E/S	Si	Si	Si
Supervisión / Visualización de datos	Si	Si	Si
Interfaces para lenguajes de alto nivel	No	No	Si
Creación de bases de datos	No	Si	Si
Librería de módulos de funciones personalizadas	No	No	Si

Tabla 7.4 Cuadro comparativo de lenguajes de programación.

La tabla 7.4 muestra un cuadro comparativo de las características más importantes de los lenguajes de programación y destaca la ventaja que tiene GEFANUC sobre los otros fabricantes.

En conclusión los tres modelos de PLC, antes mencionados cumplen con las características técnicas tanto en hardware como software para poder realizar el diseño.

Sin embargo se debe aclarar de que este diseño estará basado en el lenguaje de programación STEP 5 y el PLC SIMATIC S5 103U el cual también cumple con los requisitos técnicos planteados anteriormente, el motivo de esta selección es debido a

que LA COMPAÑÍA ELECTRICA CUCUMACAYAN proporcione este equipo para la implementación de la P.C.H. de Sonsonate en la cual colaboro el presente grupo de tesis. La información técnica de este PLC se encuentra en el anexo D de este documento.

7.3 SELECCIÓN DE MODULOS DE ENTRADA Y SALIDA DEL P.L.C.

El sistema de E/S de un autómata programable industrial aplicado a procesos debe de estar formado por un conjunto de módulos o tarjetas, adecuadores de señal y estructuras de soporte de los módulos o bastidores de montaje los cuales tienen las funciones siguientes:

- Adaptar la tensión de trabajo de los dispositivos de campo a la de los elementos electrónicos del autómata y viceversa.
- Proporcionar la adecuada separación o aislamiento eléctrico entre los circuitos lógicos y los circuitos de potencia.
- Habilitar, mediante el soporte físico del direccionado la identificación de los dispositivos de E/S para la correcta ejecución de las secuencias de control programadas.

A continuación se presenta la selección de los diferentes módulos de entrada y salida a utilizar en el diseño según las características técnicas necesarias:

7.3.1 MODULOS DE ENTRADA/SALIDAS DIGITALES

Bajo la denominación de E/S digitales (también todo o nada) se agrupan aquellos componentes del sistema de entrada/salida destinados a la captación o generación de señales de y hacia dispositivos con dos estados diferenciados, que, corresponden a la presencia o ausencia de un nivel de tensión.

Módulos de entrada- salida

Se define como módulos de entrada a los circuitos o agrupaciones de circuitos los cuales se conectan en un rack de entrada/salida que se denomina elemento de bus el

cual dispone de bornes para el conexionado de los dispositivos de entrada al P.L.C. , dichos módulos poseen además un conjunto de indicadores LED los cuales señalan la presencia de señal.

Los módulos de entrada digitales pueden estar disponibles en diferentes configuraciones con respecto al número de circuitos que agrupan ya sea de 4, 8 o 16 entradas, además en lo que respecta a los niveles de tensión de trabajo siendo los más usuales : TTL, 24Vcc/Vca, 48Vcc/Vca, 110Vcc/Vca y 220Vca.

Para el presente diseño de automatización los módulos de entrada digital a seleccionar deben de tener las características técnicas siguientes :

- Voltajes de operación de entrada de 24Vcc para el "1" lógico y de 0 Vcc para el "0" lógico.
- Número de canales de entrada : 8 como mínimo.
- Que posea algún tipo de aislamiento para protección en caso de cortocircuitos o sobrevoltajes.

De la diversa variedad de módulos de entrada digitales que ofrece la familia SIMATIC, el modulo de entrada digital que cumple o se adapta a las características antes mencionadas es el : Modulo de entrada digital 8XDC24V 6ES5431-8MA11 cuyas especificaciones técnicas se presentan a continuación :

Datos Técnicos:

- Cantidad de entradas: 8
- Separación Galvánica: Sí(optoacopladores).
- Tensión de entrada +L:

Valor nominal: 24Vcc

Para señal "0": 0...5V

Para señal "1": 13...33V

- Intensidad de entrada:

Para señal "1": 8.7mA

- Tiempo de retardo:

Para transición de "0" a "1": 5.5ms

Para transición de "1" a "0": 4ms

- Longitud de cable Max: 100mts
- Temperatura ambiente admisible: 0...60°C
- Perdidas en el modulo :2W

En la figura 7.1 se muestra el modulo de entrada digital expuesto anteriormente.

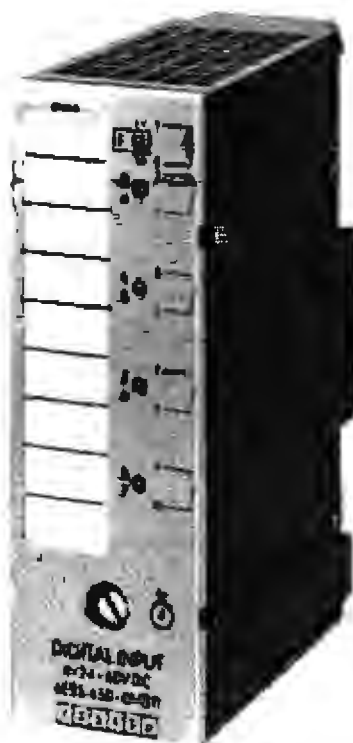


Figura 7.1 Modulo digital de entrada

Módulos De Salida Digital

Estos módulos son tarjetas electrónicas que al igual que las de entrada disponen de una regleta de bornes de interconexión y de indicadores LED para la visualización del

estado de la salida. En general incorporan algún tipo de protección de la etapa de potencia que puede ser un circuito de detección de sobrecarga o un circuito fusible.

Estos módulos de salida están disponibles en diversas alternativas con respecto al número de circuitos que agrupan que puede ser de 4, 8 o 16 así como también con respecto a la tensión de trabajo y el tipo de etapa de salida que puede ser : transistor hasta 60Vcc, Triac hasta 48Vca, TTL y de contacto de relé.

Para el caso del sistema a diseñar los módulos de salida digital a elegir deben de reunir las siguientes características :

- Número de salidas digitales por módulo: 8 como mínimo.
- Voltaje de trabajo para "1" lógico 24V, para "0" lógico 0V.

Por lo tanto el módulo de salida digital seleccionado para el presente diseño es el : Módulo de salida digital 8XDC 24V/0.5A 6ES5 441 -8MA11. El cual tiene los datos técnicos siguientes :

Datos Técnicos:

- Cantidad de salidas: 8
- Separación galvánica: Sí
- Tensión de la Carga +L

Valor nominal : 5...24Vcc

- Intensidad de salida a señal "1": 100mA
- Frecuencia de conmutación: Max 100Hz
- Longitud de cable Max: 100mts
- Temperatura ambiente admisible: 0...60°C
- Pérdidas en el módulo :2W

En la figura 7.2 se muestra el módulo de salida digital expuesto anteriormente.

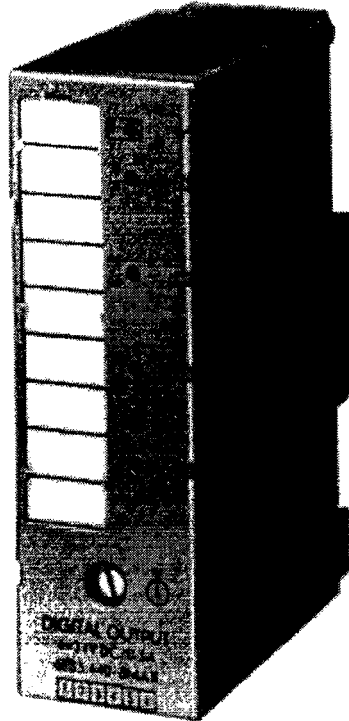


Figura 7.2 Modulo de salida digital

7.3.2 MODULOS DE ENTRADA ANALOGICOS

Estos módulos se utilizan para la conversión de una señal de naturaleza analógica (tensión o corriente) a su correspondiente valor en función de una magnitud física (temperatura, nivel, posición) variable en el tiempo.

En general la conversión se hace a un código binario de 11 o 12 bits al cual corresponde un valor numérico.

La mayoría de estos módulos de entrada analógicos utilizan un solo convertidor analógico/digital al cual se multiplexan las magnitudes de entrada para su conversión.

Los fabricantes ofrecen diversidad de alternativas para módulos analógicos entre las cuales se tienen :

- De 4, 8 o 16 canales analógicos de entrada.
- Rangos o bandas de trabajo de : 0 -5Vcc, 0-10Vcc, -10 a +10Vcc, 2 a 10 Vcc, 4 a 20 mA.

Las características que debe reunir el modulo de entrada analógico requerido para el presente diseño son las que se detallan a continuación :

- Numero de canales de entrada : 4 como mínimo.
- Tipo de entrada : de lazo de corriente de 4 a 20 mA
- Tipo de conexión de entrada : a 2 hilos.

Por lo tanto tomando como referencia las características antes mencionadas, se selecciono el modulo de entrada analógico 4X +4...20mA 6ES5 464-8ME11 , el cual presenta las siguientes características técnicas.

Datos técnicos:

- Numero de canales disponibles: 4
- Márgenes de señal de entrada: 4...20mA
- Separación galvánica: Si (entre entradas y punto de puesta a tierra).
- Resistencia de entrada: ≥ 31.25 ohms
- Tipo de conexión del emisor de señal : A dos hilos.
- Representación digital de la señal de entrada: 12bit +signo
- Método de medición: Integración
- Método de conversión A/D: Doble rampa
- Tiempo de integración: 216.6ms a 60Hz
- Aviso de error cuando se desborda el margen: si
- Longitud de cable: máx 200mts
- Tensión de alimentación +L: 24V
- Limite de error básico: +/-0.15%
- Error de linealidad y tolerancia: 0.05%

En la figura 7.3 se muestra el modulo de entrada analógica expuesto.

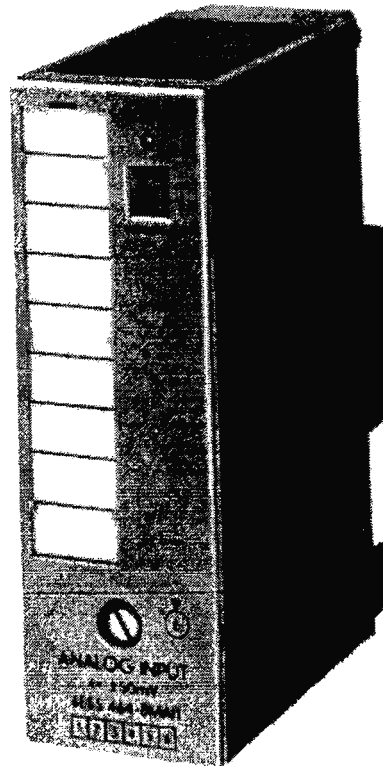


Figura 7.3 Modulo de entrada analógico

7.4 SELECCION DE LOS ELEMENTOS PERIFERICOS.

En este tema se determina la selección de los elementos y dispositivos de instrumentación adecuados o necesarios para la realización de las tareas de control específicas a realizar durante la ejecución del proceso.

Esta etapa es muy importante dentro del desarrollo del proyecto, debido a que en ella se establecen tanto las rutinas de lectura y mando de la información desde y hacia fuera del proceso, la conexión e instalación física de los elementos periféricos al controlador digital, la maquinaria a controlar y variables físicas a medir. Los diferentes temas han sido desarrollados para cada una de las variables a medir detallando las características requeridas para su medición sobre la base de las condiciones propias de la P.C.H. de Sonsonate, en algunos casos, con el fin de enmarcar en un contexto real práctico, se

detallan marcas y modelos de los mismos a utilizar, considerándose apropiados desde el punto de vista técnico, pero que no se presentan como una solución única, dando la pauta de poder optar por otros equipos alternativos que fácilmente cumplan o se adapten a las necesidades del diseño.

7.4.1 SENSOR DE NIVEL EN LA CAMARA DE CARGA.

CARACTERISTICAS TECNICAS REQUERIDAS :

- Conversión de la variable física, nivel en la cámara de carga, a señal eléctrica o algún parámetro de : Resistencia eléctrica, diferencia de potencial y corriente eléctrica que pueda ser procesado por el controlador.
- Medición de nivel, adecuada a las características físicas de la cámara de carga, en un campo de medida, para el caso de la P.C.H de Sonsonate desde cero a seis metros.
- Precisión requerida, que sea menor al mayor error de medición permisible, en el que la variable pueda ser controlada o llevada a los límites óptimos de operación.
- Evitar contacto con el líquido bajo medición, por razones de medida en presencia de turbulencias, facilitándose su mantenimiento al no ser necesaria la evacuación del fluido del depósito y obteniéndose acceso inmediato para calibración o limpieza, y la factibilidad de prolongar la vida útil del sensor, al no estar expuesto al líquido.
- Alimentación de baja potencia o consumo eléctrico y compatibilidad con los niveles eléctricos y demás parámetros del controlador digital (PLC)
- Linealidad, en el rango de medición requerido.
- Distancia entre el sensor, el equipo evaluador y el controlador, de aproximadamente 50 metros.
- Tipo de líquido a monitorear, y temperatura del mismo
- Tipo de tanque (Abierto)

Dentro de la gama de sensores de nivel de líquido, se identifican los que no poseen contacto con el fluido, entre ellos están: Los sensores de ultrasonido, de radiación y láser.

Entre los anteriores, se destacan los sensores de ultrasonido, por la capacidad de amplitud de medida entre el rango de 0 a 30 metros, mientras que los de radiación se localizan entre 0 a 2.5 metros y el láser desde 0 a 3 metros.

El sensor de ultrasonido sirve para la medición de nivel de forma continua, sin contacto de líquidos y sólidos. El principio de medición se basa en la medición del tiempo de un impulso de eco transmitido el cual se refleja en la superficie del medio que se está midiendo. Las propiedades físicas y químicas del medio no tienen influencia alguna sobre la medición.

Los sensores ultrasónicos trabajan a una frecuencia de unos 20 KHz, estas ondas atraviesan con cierto amortiguamiento o reflexión el medio ambiente de gases o vapores y se reflejan en la superficie del sólido o el líquido. La precisión de estos instrumentos es de ± 1 a $\pm 3\%$, son adecuados para todos los tipos de tanques y de líquidos o fangos permitiendo operar en condiciones ambientales extremas. Presentan el inconveniente de ser sensibles a la densidad de los fluidos cuando se encuentran sumergidos en el mismo, y de dar señales erróneas cuando la superficie del nivel del líquido no es nítida como en el caso de un líquido que forme espuma, ya que se producen falsos ecos del ultrasonido.

Una vez detectado el tipo de sensor o la técnica de medida a utilizar, es preciso dentro de tal categoría elegir un tipo de sensor que se adapte a los requerimientos ya planteados. Para la elección del sensor es necesario tomar en cuenta una característica de gran relevancia, como lo es la precisión, que determina el error máximo permisible de medida del elemento en servicio.

Para ello es importante aferrarse a la aplicación que se presente, para el caso, al detectarse el nivel mínimo de operación el sistema debe de ser capaz de presentar un error que permita responder a las exigencias del control. Aun cuando se sitúe el nivel por debajo de tal límite, dicha tolerancia radica en el hecho de considerar el mismo caso planteado en el capítulo VI (sección 6.2.2, figura 6.5), observándose que si se cumple tal situación, el sistema es capaz de subir el nivel de fluido aproximadamente 6 centímetros, dicha distancia representa el error de medida permisible, ya que al detectarse un nivel mínimo de operación (58cm) exista un nivel real de 64 cm (en la

peor condición), dando la pauta con tal precisión de controlar o situar dicho nivel hacia la región de operación.

Con lo planteado, se deduce un error o precisión:

$$\begin{aligned} \text{ERROR \%} &= [|(V_{\text{real}} - \text{Medido})| / V_{\text{real}}] \times 100\% \\ &= 6 / 62 \\ &= 9.7 \% \end{aligned}$$

Por tanto una precisión del 9.7%, cumpliendo con la mayoría de los sensores de ultrasonido (3%) según la precisión que presentan, cabe destacar que las medidas de nivel antes presentadas, son las que tomara el sensor, debido a la disposición de montaje elegido, de forma vertical, mostrándose en la siguiente figura 7.5, disposición utilizada para la indicación continua del nivel, y que a su vez las condiciones físicas de la cámara de carga de la P.C.H. de Sonsonate permite este tipo de instalación.

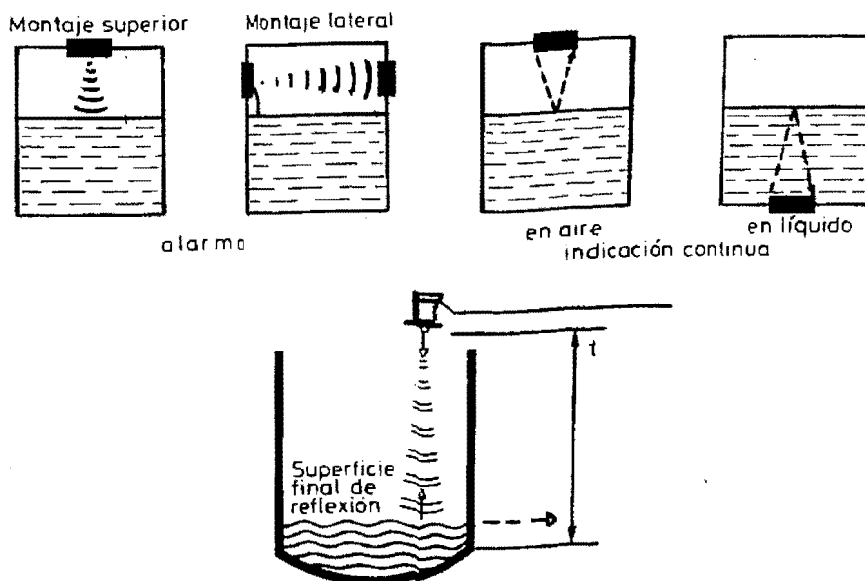
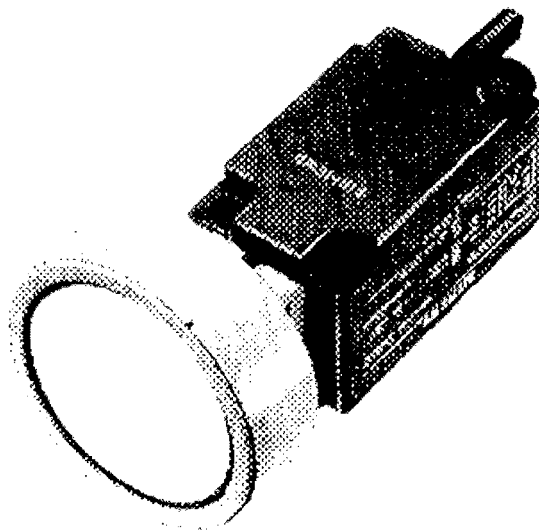


Figura 7.5 Montaje de sensor ultrasónico.

Para el proyecto en cuestión, se optó por el sonar Bero 3RG61 144. El BERO Sonar 3RG6 es un sensor de nivel y detector de proximidad, que trabaja libre de roces, comprendiendo una zona de detección y senso desde 80 a 600 cm (profundidad de la cámara de carga), Estos sensores no requieren mantenimiento y en general son insensibles a las influencias del medio ambiente. Cuando al instalar el transductor se debe tener el cuidado de que la distancia al rango mínimo de medida ajustable(Nivel máximo del medio) sea mayor que la distancia mínima típica de detección. También es conveniente asegurarse que el cono de propagación de la señal ultrasónica (aproximadamente. 5°), no sea interrumpido por objetos, por la pared del contenedor, etc. Colocándose el sonar perpendicular a la superficie del tanque ya que la disposición de instalación se debe efectuar de forma vertical por encima del liquido bajo control..

En la figura 7.6 se muestra la definición de rangos, el valor final e inicial del rango de operación, son establecidos mediante 2 potenciómetros, el primer potenciómetro para el valor inicial y el segundo para el valor final. El estado de la señal de la salida es indicado por un LED, el cual se enciende cuando un objeto esta dentro del rango de operación preseleccionado, el centelló del LED indica falla de ajuste (Valor inicial > Valor final).



3RG61 44

Figura 7.6 Sonar ultrasónico

Los datos técnicos de este dispositivo, se muestran a continuación (ver tabla 7.5), observándose que ciertos parámetros eléctricos, de interés, son compatibles con los del P.L.C Simatic, ya que este sonar es también producto de la misma marca.

DATOS TECNICOS 3RG61 44

VOLTAJE DE RED	24 VDC
RANGO DE VOLTAJE DE OPERACION	DC 20 A 30 V(Incluyendo 10% ripple)
CORRIENTE SIN CARGA	< 30 ma
RANGO DE DETECCION	60 a 600cm
FRECUENCIA DE ULTRASONIDO	80 KHz
TEMPERATURA PROMEDIO	25°C
TEMPERATURA EN SERVICIO	-25 a +70°C
TEMPERATURA DE ALMACENAJE	-40 a +85°C
LONGITUD PERMISIBLE CABLE	100 mts blindado
FRECUENCIA DE CONMUTACION	1 a 3 Hz
SUPERFICIE MINIMA DE ACCIONAMIENTO	10 cms X 10 cms
RESOLUCION	1 cm

Tabla 7.5 Características técnicas sonar BERO.

Montaje :

- Posición de montaje arbitraria
- Fijación mediante cuatro tornillos
- Contactos :
 - N° 1 L+ (20 30 Vcc)
 - N° 4 Send (impulso emitido)
 - N° 3 L- (potencial de referencia)
 - N° 2 Rec (impulso de eco)
- Longitud máxima del cable : 100 mts.

En presencia de interferencias eléctricas intensas es recomendable el uso de un cable de conexión apantallado.

El espacio libre alrededor del cono ultrasónico, debe mantenerse libre de objetos, la cota "S" es una separación de seguridad y pueden reducirse si se enfocan adecuadamente los aparatos. Ver figura 7.7

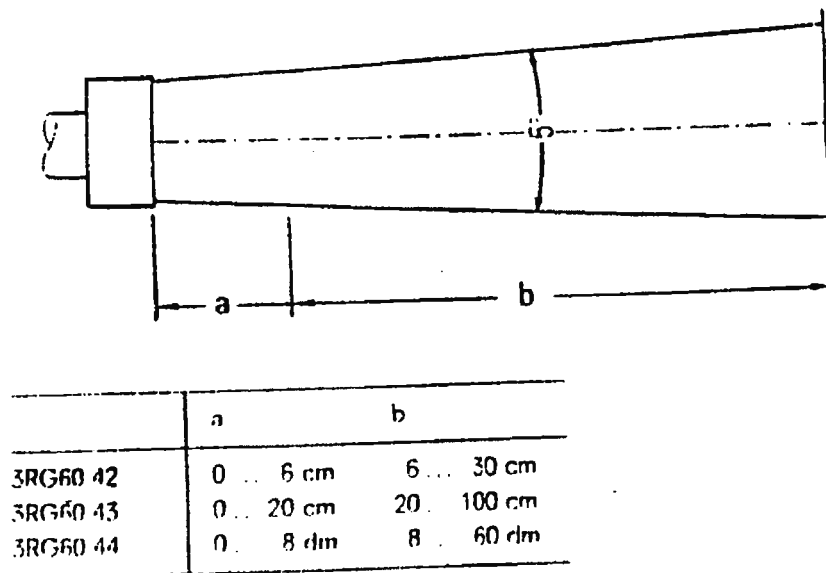


Figura 7.7 Cono ultrasónico

Junto al sonar BERO es necesario el uso e instalación del dispositivo evaluador y transmisor que se encarga de tratar y transmitir la señal del sensor al P.L.C., este es el 3RX2 110, aparato de valoración, con salida analógica integrada, alimentación a 24 Vdc, compensación de temperatura y resolución en milímetros. Los datos técnicos del evaluador se muestran en la tabla 7.6, y la conexión eléctrica de circuitería del sistema se muestra en la figura 7.8, especificando los valores seleccionados de calibración y distribución de pines (pin out) de los elementos.

DATOS TECNICOS 3RX2-110 EVALUADOR DE SEÑAL

TEMPERATURA EN OPERACION	0 a +55°C
TEMPERATURA DE ALMACENAJE	-10 a +70°C
VOLTAJE NOMINAL Ue	DC 24V
RANGO DE VOLTAJE DE OPERACIÓN Ub	DC 20 a 30V(incluyendo 10% ripple)
CORRIENTE DE CONSUMO Ie	250 mA
SALIDA SWITCH BLOQUEO Y RANGO DE OPERACIÓN	Salida de relé
SALIDA ANALOGA Corriente de salida Rango de sobreflujo Carga Voltaje de salida Pico de la señal de salida Resolución	4 a 20 mA 3.7 a 4 mA y 20 a 21 mA 0 a 500 ohmios max. DC 10 V max. 3 % 8 bit con 200 pasos por rango de detección
SALIDA DE SENSOR Voltaje nominal Ue Rango de voltaje permisible Ub Corriente de salida Is Amplitud de pulso de envío.	DC 24 V DC 20 a 30 V Max. 30 mA Mínima Ub - 3V típica Ub - 1V
LONGITUD MAX. PERMISIBLE DE EL CABLE ENTRE EVALUADOR Y SENSOR	max. 100 mts. Blindado

Tabla 7.6 Datos técnicos evaluador de señal.

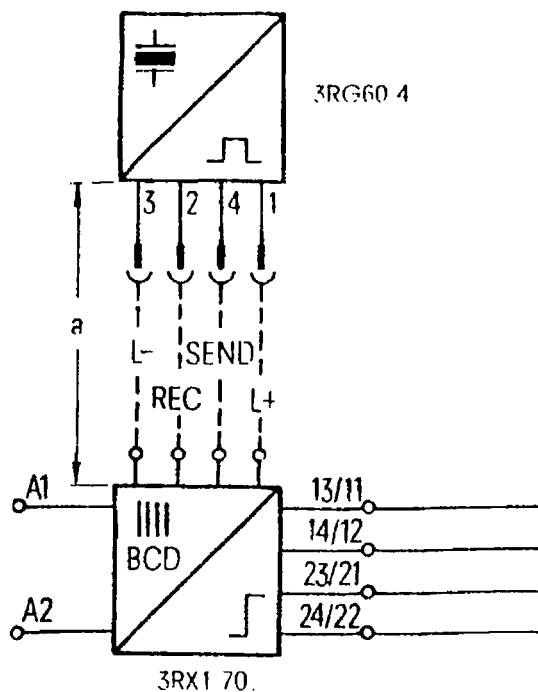


Figura 7.8 Diagrama de conexión del sensor ultrasónico

7.4.2 SENSO DE VELOCIDAD EN EL EJE DEL GRUPO TURBINA-GENERADOR.

La velocidad es una variable física relacionada con las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, en este caso provocando movimiento angular. Para este proyecto es importante el detectar dicho movimiento producido en el eje del grupo turbina - generador el cual es ocasionado por la apertura y cierre de los alabes del distribuidor durante la etapa de sincronismo del proceso de generación de la P.C.H. de Sonsonate.

CARACTERISTICAS TECNICAS REQUERIDAS

- Detección de velocidad de sincronismo hasta 800 r.p.m. en un rango próximo a esta, conversión de la misma a una señal que pueda ser reconocida por el P.L.C., de forma discreta, indicando la existencia o no de la velocidad de sincronización.
- Método de medición: El sensor debe ser capaz de medir las revoluciones en el eje que acopla la turbina francis con el generador asincrono, sin ofrecer ninguna resistencia mecánica o algún desgaste que acorte la vida útil del dispositivo, además proveer facilidades de instalación.

- Precisión, basta y sobra que se aproxime ligeramente por encima del valor de la velocidad de sincronismo (720 r.p.m.), no precisando el valor exacto de esta.
- Alimentación de baja potencia o consumo eléctrico, compatibilidad con los niveles de características eléctricas y demás parámetros del P.L.C.
- Distancia entre el elemento detector y convertidor de la variable velocidad a una señal eléctrica compatible para el P.L.C y el controlador digital de aproximadamente 20 mts.
- Compatibilidad: Los requerimientos de las señales del sensor al PLC son de tipo discretas, ya que este solo debe indicar un rango en que es posible y seguro conectar a la red comercial, este rango esta entre 720 y 790 r.p.m., por lo tanto el sensor solo debe generar tres estados posibles:
 - Velocidad por debajo del rango
 - Velocidad dentro del rango de sincronismo
 - Velocidad por encima del rango de sincronismo.

Los métodos más comunes de medición de la velocidad se efectúan generalmente de dos formas: Con tacómetros mecánicos y tacómetros eléctricos. Los primeros detectan el numero de vueltas del eje de la máquina por medios exclusivamente mecánicos, pudiendo incorporar o no la medición conjunta del tiempo para determinar el numero de revoluciones por minuto (r.p.m.), a su vez los tacómetros de este tipo intervienen físicamente con el eje del sistema, siendo esta característica no deseada para el proyecto en cuestión.

Los tacómetros eléctricos, emplean un transductor que produce una señal analógica o digital proporcional a la velocidad de giro del eje de la maquina. Entre los tacómetros eléctricos se encuentran: los de corrientes parásitas, corriente alterna y dínamo tacómetros, en dichos sistemas el transductor posee contacto mecánico con el eje rotativo, por la inclusión de imanes permanentes o rotores con entre hierro uniforme acondicionados a dicho eje rotatorio, los cuales crean un campo magnético permanente, aunque presentan la ventaja de transformación directa de la variable (Velocidad) a los instrumentos registradores o controladores, presenta el inconveniente de interferir físicamente con el eje en rotación, por las desventajas presentadas tanto por los sistemas mecánicos y eléctricos expuestos, un sistema recomendable y fácil de implementar y por el cual se opto para el presente proyecto, es el de tacómetro de

frecuencia o frecuencímetro, sistema que mide la frecuencia de las revoluciones o vueltas emitidas por el eje rotatorio, captadas por transductores electromagnéticos, capacitivos u ópticos, los cuales emiten impulsos cuyo número es proporcional a la velocidad de giro de la maquina, el transductor en cuestión no tiene contacto con el eje rotativo. Los impulsos generados por el transductor pueden ser introducidos a un contador electrónico basado en la medida de las revoluciones por unidad de tiempo.

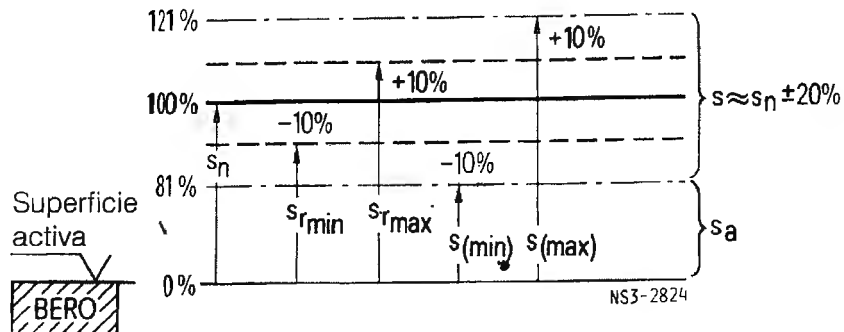
Como elementos transductores, pueden ser empleados los sensores de proximidad, los cuales pueden ser de tipo inductivo, capacitivos y ultrasónicos. Para el presente diseño se optó por sensores de proximidad BERO inductivos, debido a que en su serie de aparatos, permiten la elección del BERO para un determinado fin, como lo es BERO optimizado para PLC.

De forma general este tipo de transductores son interruptores magnéticos de posición, que trabajan exento a roces y sin contactos, no estando sujetos a desgaste mecánico en sus componentes y en general son resistentes a los efectos del clima. El BERO es excitado por un campo alterno de alta frecuencia, el cual se origina en la superficie activa del BERO, el tamaño de este campo alterno determina el "alcance" del aparato. Cuando se aproxima un material conductor eléctrico o magnético, el campo queda amortiguado. Ambos estados (campo amortiguado o no amortiguado), son valorados por el BERO y conducen a un cambio de señal a la salida (on -off).

El tipo de sensor de proximidad inductivo adecuado es el XS2 M12PA371 de TELEMECANIQUE, el cual posee las siguientes características:

- Zona de tensión: DC 10 hasta 30 V
- Salida, de 2 hilos: 1 NA hasta 25 mA.
- Intensidad residual y caída de tensión adecuadas a las entradas del PLC
- Frecuencia de conexión hasta 700 Hz
- Distancia de conexión según normas
- La distancia de trabajo entre el 0 y 81% de la distancia nominal de conexión, dichas distancias de conexión se muestran en la figura 7.9
- Reducidos costes de cableado
- Posible empleo directo en lugar de finales de carrera mecánicos

- Alimentación de tensión directamente de la entrada del PLC
- Conductores flexibles, resistentes al petróleo con cubierta exterior de Poliuretano, el suministro standard tiene una longitud de 2 m.



- S_a = Distancia de trabajo
 S_n = Distancia nominal de conexión
 S_r = Distancia de conexión real
 S_{min} = Distancia de conexión útil mínima S_u
 = distancia de trabajo S_a
 S_{max} = Distancia de conexión útil máxima S_u

Figura 7.9. Distancia de medición del sensor de proximidad

Los datos técnicos se muestran en la Tabla 7.7,

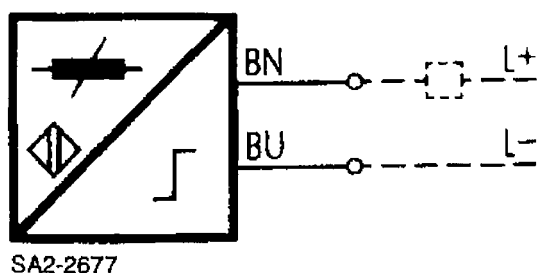
LONGITUD DE CONDUCTORES	300 mts.
TEMPERATURA AMBIENTE	
EN SERVICIO	-25 hasta +85 °C
EN ALMACEN	-40 hasta +85 °C
CAJA	Pueden ser de Acero, Latón niquelado y Plástico
CARGABILIDAD	≤ 25 mA
ONDULACIÓN RESIDUAL DE LA TENSION DE SERVICIO	≤ 10%
TENSION DE SERVICIO	DC 10 hasta 30 V

Tabla 7.7 Datos técnicos sensor de proximidad.

Cuando un objeto penetra en la zona de acción del sensor de proximidad inductivo, se genera un flujo de corriente que el sensor de velocidad detecta como una transición (de bajo a alto). Cuando el elemento se aleja de la zona de acción la salida vuelve a su condición original cortando el flujo de corriente. De esta forma cada vez que sucede tal fenómeno se detecta un cambio de estado en la salida.

Aprovechando tal situación, es posible detectar cuando el eje del grupo turbina - generador ha producido un giro completo de 360° o una revolución, con la implementación , de una especie de taco saliente de material conductor sobre una el eje de la maquina , cuya medida o longitud (del taco) dependerá de la distancia a la cual estará colocado el sensor, dicha distancia a su vez deberá proveer la seguridad de no permitir algún tipo de intromisión que afecte la operación normal del sistema, y de la zona máxima de accionamiento del elemento. Así a cada giro del eje se emitirá un impulso o estado que determinara el numero de vueltas. La disposición de tal instalación se muestra en la figura 7.10 junto con la conexión del sensor en condición normalmente abierta.

2 hilos, con conductor, para PLC



Cierre

Figura 7.10 Diagrama de conexiones

Como podrá observarse, a cada giro del eje del sistema, el sensor conmuta a +24V emitiéndose pulsos que van desde +0 V hasta +24 V, tipo onda cuadrada cada vez que el taco cruza la zona de acción del sensor, dichos pulsos introducidos a elementos registradores o frecuencímetros, pueden determinar la frecuencia o el numero de revoluciones por minuto(dependiendo de la base de tiempo del frecuencímetro) a la que esta girando el eje, o sea su velocidad en r.p.m.

Existen en la industria elementos evaluadores o detectores que suplen dicha función, con el objetivo de poner sobre aviso a través de la salida de relés, cuando la velocidad ha cruzado un valor de umbral (fijado por el operador). Entre este tipo de dispositivos esta el SX2 DV100, controlador de sobre velocidad, que conmuta su salida relé ya sea normalmente abierta o cerrada, cuando la velocidad del sistema cruza el valor de velocidad de umbral fijado por el operador en el panel de control. El dispositivo SX2 DV100 se muestra en la siguiente figura 7.11.

En operación normal cuando la velocidad del eje giratorio es mayor que la velocidad fijada, el relé de salida(ver figura 7.11), es energizado y el LED indicador es iluminado. Cuando la velocidad es menor que la de umbral, la salida de relé es desconectado. En la figura 7.11 se describen las funciones y pines del dispositivo.

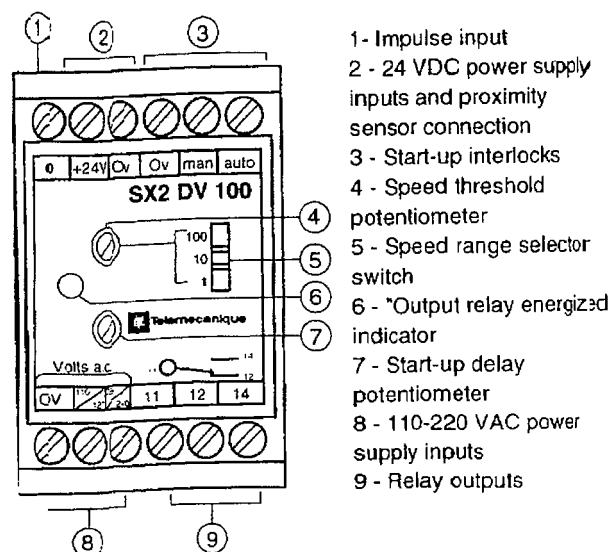


Figura 7.11 Distribución de pines del sensor de velocidad

Distribución de pines.

1. Pulso de entrada
2. Voltaje de alimentación de entrada de 24 VDC y conexión de sensores de proximidad
3. Encender interlock
4. Potenciómetro de velocidad de umbral
5. Interruptor de selección de rango de velocidad

6. Indicador de relé de salida energizado
7. Potenciómetro de arranque de retraso
8. Entradas de voltaje de entrada de 110-220 VAC
9. Salidas de relé.

Configuración y ajuste de velocidad de umbral.

Para facilitar tal función, el conmutador (switch) de selección y los potenciómetros (2) de ajuste, estos son montados en la parte frontal de la unidad:

- Se Selecciona el rango de velocidad de acuerdo a la velocidad del eje bajo control, teniendo una gama desde 2.2 a 6000 impulsos / minuto, con tres diferentes rangos:
 - Rango x 1: desde 2.2 a 6 impulsos / minuto
 - Rango x 10: desde 22 a 600 impulsos / minuto
 - Rango x 100: desde 220 a 6000 impulsos / minuto.

Debido a que los sensores inductivos emitirán un impulso por revolución o sea revoluciones / minuto en el dispositivo de control de la velocidad, y conociendo que la velocidad de interés a detectar esta en el orden de las centenas de impulsos / minuto, o sea de 720 r.p.m., es el rango por 100 el adecuado a elegir.

- Se sintoniza el potenciómetro de ajuste de velocidad de umbral, dentro del rango anteriormente elegido, este potenciómetro, se encuentra graduado desde 1 hasta 10, en pasos de un quinto de la unidad, o sea 1, 1.2, 1.4, 1.6..... así hasta 10. Entonces debido al rango seleccionado se debe posicionar en 7.2, fijándose así la velocidad de umbral.

Cabe decir que para este diseño será necesaria la implementación, de una segunda unidad de senso (controlador de velocidad - sensor inductivo), que fije o detecte una velocidad arriba de las 720 r.p.m., para el caso de 790 r.p.m., debido a razones de seguridad, tanto por efectuar la conexión en sincronismo como por efectos de seguridad en el caso de que el sistema se envale y en algún momento se acelere sin control, pudiendo provocar un daño irreversible al generador y a la misma turbina.

7.4.3 SENSOR DE TEMPERATURA.

Los requerimientos que debe poseer este sensor están limitados según las características del proceso de generación en las PCH, estas limitantes se mencionan a continuación:

Precisión. Con respecto a la precisión del sensor necesaria en el sistema, de acuerdo a las características del sistema esta es de aproximadamente $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Analizando el peor de los casos, si la temperatura en algún punto de medición del sistema turbina generador esta en el limite permitido de 50°C , y existe un error de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ significaría una acción de control errónea, ya que el PLC medirá una temperatura que sobrepasa este limite y podría en algún momento indicar una falsa alarma y apagar el sistema, debido a que las diferencias de rango para aplicar una acción de control especifica es de justamente 3°C .

Velocidad de capitación de temperatura. Debido a que las variaciones de temperatura en la turbina y en el generador son relativamente lentas, y que los rangos máximos de operación están abajo de los permitidos por el fabricante de la turbina y el generador (entre 65 y 100 grados Celcius), no se considera critico este parámetro.

Distancia entre elementos de medida. Estas distancias son cortas debido a las dimensiones relativamente pequeñas del sistema turbina-generador, por lo tanto este parámetro no se considera critico.

Tipo de captador de señal de medida. El sensor debe ser capaz de generar señales eléctricas compatibles con el tipo de modulo analógico - digital conectado al PLC.

Rangos de medición. El rango de temperatura de acuerdo a las características de la PCH de Sonsonate es de 0° a 65°C , por lo tanto el sensor debe de medir linealmente la temperatura dentro de este rango.

De acuerdo a los criterios anteriores y conveniencias de instalación se sugieren los siguientes sensores:

- Termistores
- Termopares

De los cuales los termistores y en especial las PT100, tienen ventajas significativas con respecto a los termopares, tomando en cuenta las características del proceso. Si bien es cierto los termopares tienen un amplio rango de linealidad mucho mejor que los termistores (- 60°C a 200°C, termopar tipo E 1% de desviación) ser necesitan dispositivos de compensación adicionales debido a los efectos de uniones frías; por el contrario los termistores de aplicaciones industriales, prácticamente no necesitan calibración alguna, además el rango de medición útil del proceso es pequeño con respecto al rango de medida promedio de los termistores el cual esta delimitado de - 100°C a 400°C, por lo tanto es dentro de este rango de operación que las mediciones tienen una linealidad comparable con la del termopar, representando la opción mas factible.

El termistor sugerido para el diseño es tipo AP-PT100 de la compañía HAYASHI-DENKO, con una señal de salida de 4-20 ma, alimentación de 12-30 VDC, precisión de 3%, y un campo de medición de -30 a 400 C..

7.4.4 SENSOR DE NIVEL DE ACEITE EN LA TURBINA:

CARACTERISTICAS TECNICAS REQUERIDAS.

- Debe detectar el nivel mínimo de aceite en la turbina, por lo tanto el valor en magnitud del nivel no es necesario, sino que solamente se necesita detectar la existencia o no de aceite en el interior de la turbina (on -off).
- Detección de nivel adecuada a las características físicas de la turbina.
- Técnica de medición: Contacto directo
- Precisión no significativa, ya que solo es preciso conocer la presencia o no del nivel en un rango determinado.
- El elemento transductor deberá estar en contacto físico con la carcasa de la maquina o inmerso en el aceite, ya que el acceso a dicho nivel es interno en la maquina, por tanto debe tener la capacidad de resistir y operar bajo temperaturas mayores que la

máxima permitida por el sistema de aproximadamente 65°C. y de soportar condiciones ambientales duras dentro del campo de operación que estará expuesto.

- Mantenimiento mínimo y fácil instalación.
- Distancia entre el sensor y PLC de aproximadamente 25 metros.
- Salida del elemento compatible a las características de entrada del PLC.

Debido a las exigencias del caso, el equipo detector mas adecuado es el detector de nivel tipo capacitivo, ya que cuenta con las características siguientes:

1. Un valor mínimo compacto de detección.
2. Aplicable para una inmensa variedad de líquidos
3. Orientación independiente.
4. Monitorización propia con la implementación de tecnología de microprocesador
5. Fácil de instalar y acondicionado a trabajar en ambiente industrial
6. Salida de dos posiciones (on-off)
7. Resistencia del elemento en contacto con el fluido bajo control, a altas temperaturas del orden de los 150°C.

El principio de la medición conductiva emplea la permeabilidad eléctrica de un medio entre 2 electrodos para medir o detectar el nivel. Entre los dispositivos que se adaptan a las características requeridas, se encuentra el VIBRACON figura 7.13, este puede llegar a alcanzar distancias para inmersión del dispositivo hasta de 3000 mm, en su parte inferior, en contacto con el liquido a monitorear, los contactos en forma de pinza o tenedor; los cuales son excitados cíclicamente por pulsos electromagnéticos, dichas pinzas vibran a una frecuencia resonante cuando se encuentran en el aire, cuando las pinzas entran en contacto con el medio a detectar(en este caso aceite), la resonancia es amortiguada. Dicho cambio es analizado por un microprocesador, el cual produce un cambio en su señal de salida.

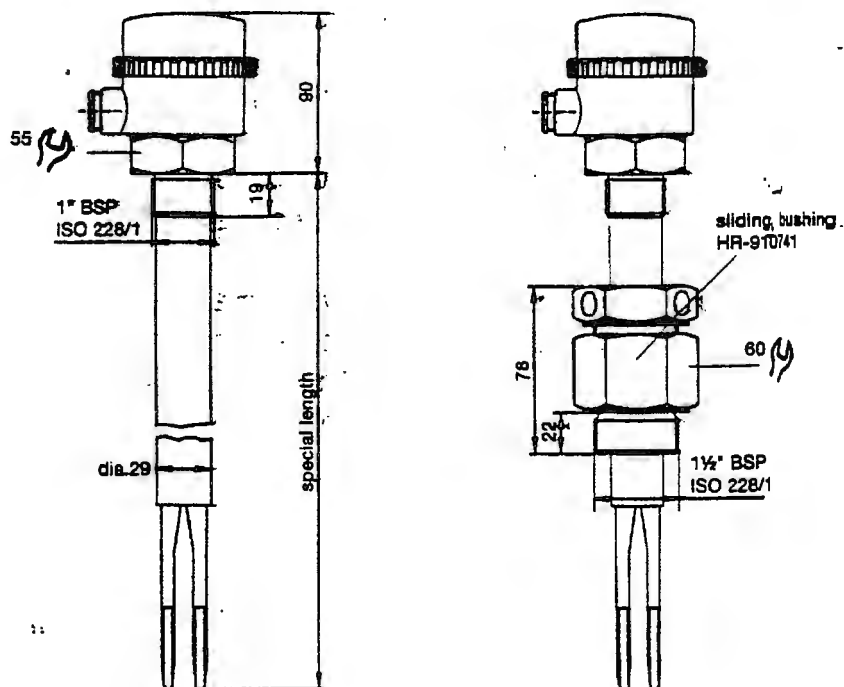


Figura 7.13 Vista lateral del sensor de nivel de aceite

El sistema puede ser optimizado en cuanto a su trabajo de medición, usando los conmutadores (switch) de modos de operación. SWITCH I, II, III y IV. Ver tabla 1.8

MODE DE OPERACION	CONDICION	DESCRIPCION
I Función de switch de salida	0	Des hacer conexión
	1	Hacer conexión
II	0	Servicio (diagnostico propio)
	1	Operación (posición de trabajo)
III Medio ha ser detectado	0	Material grasoso abultado
	1	Líquidos
IV	0	Modo de operación B (ver tabla ())
	1	Modo de operación A (ver tabla ())

MODO DE OPERACIÓN	CUBIERTO	NO CUBIERTO
B	5	1.0
A	1	0.2

Tabla 7.8

INDICADORES LED 1, 2, 3 Y 4

1. Función (verde), DC 24V conectado
2. Falla (rojo) :
 - Modo de operación III fijado a 0, pero se detectara liquido (o viceversa)
 - Corrosión o otros cambios en el sistema de vibración.
 - Falla eléctrica.

Estado de conmutación.

3. "Ref" (amarillo) procesador funcionando correctamente.
4. Actual (amarillo) salida de conmutación.

LED 3 y 4 se iluminan cuando un medio es detectado.

El VIBRACON posee salida tipo relé, pudiendo conmutar a +24V o +0V, por tanto no es necesario emplear un elemento evaluador o transmisor, conectándose dicha salida a los módulos digitales de entrada del PLC. En la figura 7.14. muestra las conexión de las terminales del VIBRACON hacia el PLC y la selección de los switch de modos de operación, conociendo que un uno lógico es detectado en conexión a +24V y un cero lógico en conexión a tierra o al aire. Los datos técnicos se muestran en la tabla 7.9.

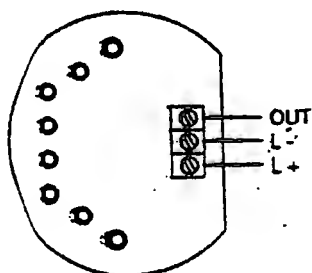


Figura 7.14. Diagrama de conexiones del VIBRACOM

MODO DE OPERACION SELECTORES	CONDICION
I	1
II	1
III	1
IV	0

Figura 7.14

Junto con el modo de operación seleccionado en A.

DATOS TECNICOS

ALIMENTACION	
Voltaje de operación	DC 18V a 30V
Corriente de operación.	< 50 mA
SALIDAS	(pnp) conexión de 3 cables
Función de conmutación	Normalmente abierto / normalmente cerrado (conmutable)
Corriente	< 500 mA
Corriente de corto circuito	< 1.5 A
RETRAZO DE CONMUTACION	
Cubierto / Operación modo A	Aproximadamente 1 seg. Aproximadamente 0.2 seg.
No cubierto / Operación modo A	Aproximadamente 5 seg.
Cubierto / Operación modo B	Aproximadamente 1 seg.
No cubierto / Operación modo B	
INDICADORES	
Función	LED verde
Falla	LED rojo
Estado conmutado Ref	LED amarillo
Estado conmutado Actual	LED amarillo
CONDICIONES	

AMBIENTALES	243 K...343 K (-20°C a +70°C)
Temperatura ambiente	< 25 bar
Presión	
PROPIEDADES DEL MEDIO	0.6 g / cm ³
Gravedad específica	max. 10 000 mPas
Viscosidad	-223 K 423 K (-40°C a +150°C)
Temperaturas	

Tabla 7.9

7.4.5 SENSOR DE FLUJO DE AGUA EN TUBERIAS DE ENFRIAMIENTO.

CARACTERISTICAS TECNICAS REQUERIDAS.

- Detección de la circulación de agua a través de las tuberías galvanizadas de enfriamiento en la turbina
- Detección adecuada a las características y disposición física del sistema de tuberías de enfriamiento de la turbina.
- Solo se precisa medir la existencia o no del flujo (on-off).
- Mantenimiento mínimo
- salida compatible con entradas de PLC
- distancia entre el elemento sensor y controlador digital de aproximadamente 27 metros.

La medida de la tubería en el caso de la PCH de Sonsonate es de una pulgada de diametro, y esta situada en las cercanías de la turbina, encontrándose dispuesta en 2 ramificaciones, una que transporta el agua desde el río y la otra el agua que proviene de las tuberías de distribución municipales, para iniciar el proceso de arranque es necesario verificar la existencia de flujo, por ello el sensor se localizara en la sección de tubería que une los dos flujos. El sensor seleccionado para el diseño es el 71K1020 de Elsig Bailey Automation INC, el cual tiene las siguientes características:

- Cursor para seleccionar el flujo máximo sensado en la tubería

- Adaptable para tuberías de 1, 1 1/2, y 2.
- Salida de relé hasta de 110 VAC o ,30 Vdc , 3 amp
- Rango de medición: de 0.1 a 20 GPM
- Bajo costo de instalación

El funcionamiento de este sensor es sencillo, y consiste en posicionar el cursor instalado en el tubo graduado transparente de acuerdo a la magnitud de flujo a medir, si el flujo en la tubería sobrepasa al configurado por el cursos, el sensor activa el relé de salida para indicar esta condición.

La figura 7.15 muestra este dispositivo.

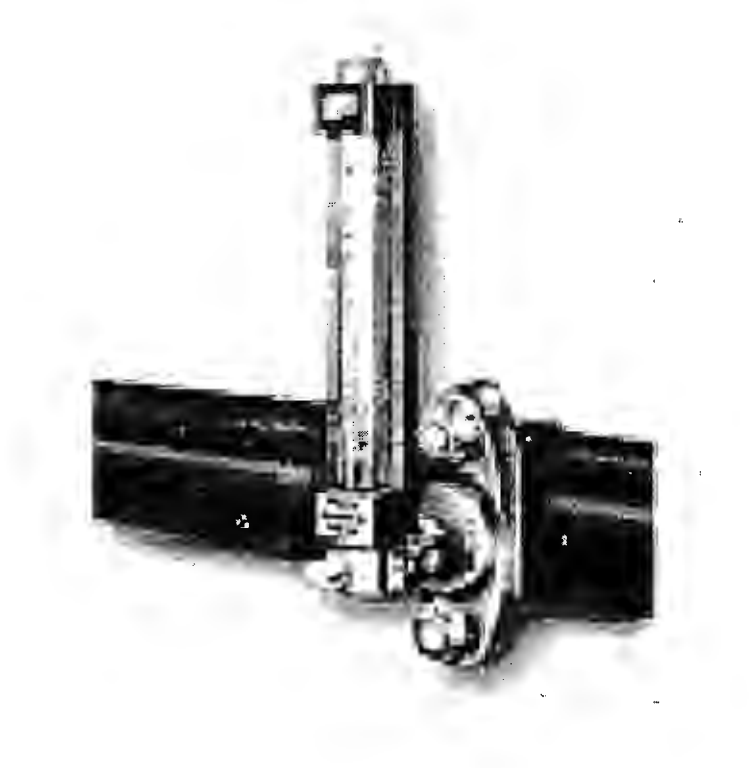


Figura 7.15 Sensor de flujo

7.4.6 SENSOR DE POSICION DE ALABES:

Durante la ejecución de todas las etapas operativas del proceso de generación de energía de la P.C.H. es necesario que el controlador o P.L.C. tenga conocimiento del valor de apertura en que se encuentran los alabes del distribuidor de la turbina, ya que en ellos es donde se aplican las acciones de control del proceso.

Para el caso de la P.C.H. de Sonsonte dicho valor de apertura de los alabes es proporcional al desplazamiento de un cursor, el cual se encuentra en el distribuidor, dicho cursor se desplaza de forma horizontal hacia delante al abrir los alabes y hacia atrás al cerrarlos.

Este cursor tiene una carrera de 0 a 12 cm, donde la posición 0 cm indica que los alabes se encuentran completamente cerrados y cuando este se encuentra posicionado a 12 cm indica que los alabes están completamente abiertos, por tanto es posible determinar el valor de apertura midiendo la posición en que se encuentra el cursor.

Por consiguiente, es necesario seleccionar un dispositivo de senso o sensor, el cual registre el movimiento del cursor, para que así proporcione al controlador una señal eléctrica la cual refleje el valor de posición de los alabes del distribuidor.

Elección del sensor de posición.

Una solución adecuada para la detección del valor de posición, es mediante la utilización de un potenciómetro lineal de extensión, cuya resistencia tenga una relación proporcional con la apertura del distribuidor, dicho potenciómetro debe acoplarse mecánicamente al cursor móvil del distribuidor de la turbina, así cuando el cursor se desplace hacia delante el potenciómetro se extenderá aumentando su resistencia, igualmente, cuando el cursor se desplace hacia atrás el potenciómetro se contraerá disminuyendo su resistencia.

De lo anterior se tendrá, que para cada valor de posición de los alabes existirá un valor de resistencia eléctrica respectivo.

Entre Las Características Que Debe Tener El Potenciómetro Están:

- Capacidad para contraerse y extenderse libremente
- Longitud de extensión mayor de 12cm, a fin de que pueda recorrer el desplazamiento total del cursor del distribuidor.
- Resistencia total mayor a 1200 ohms y menor a 6000 ohms, para obtener a 24 Vdc, una señal de corriente de 4 a 20 ma.
- Resistencia altamente lineal
- La señal producida por el sensor debe de ser compatible con la señal recibida por el modulo analógico conectado al PLC, de lo contrario se necesitaría un adecuador de señal que haga esta función,

Con el fin de aplicar el presente diseño en un contexto real práctico, se eligió como una opción viable para realizar la medición de posición al potenciómetro AP 801-300 de la Omega electronics el cual reúne las siguientes especificaciones técnicas, tabla 7.10:

Resistencia total	5000 ohms +/- 20%
Potencia de trabajo	0.75 Wats
Rangos de temperatura:	-65 a 105 °C
Longitud Efectiva	300cm
Longitud Mecánica	307.4cm

Tabla 7.10

En la figura 7.16 se muestra el potenciómetro sugerido en el diseño:

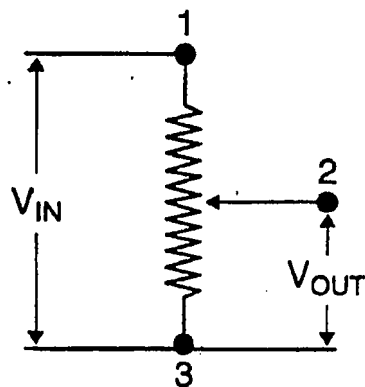
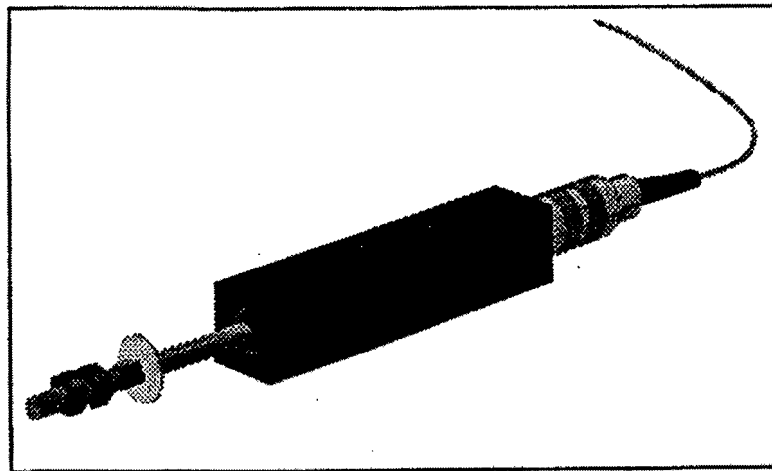


Figura 7.16 Sensor de posición

7.4.7 SENSO DE ALABES COMPLETAMENTE CERRADOS

CARACTERISTICAS TECNICAS REQUERIDAS

- Detección de alabes en posición de cierre, o sea cuando no circula o atraviesa agua por la turbina.
- Adecuar tal detección a las condiciones físicas de la turbina y su entorno.
- Alimentación de baja potencia y salida de aviso de tal situación compatible con los entradas de los módulos del PLC.
- Fácil mantenimiento e instalación

- Distancia entre el sensor y controlador digital de aproximadamente 25 mts.

Según las características físicas de la turbina de la PCH de Sonsonate, la posición extrema de los alabes ya sea cerrados o abiertos, es posible detectarla forma indirecta, por medio del sistema mecánico del gobernador utilizado para abrir y cerrar los alabes, que indican la posición de los mismos como se explico anteriormente mediante el desplazamiento de un cursor. Una forma sencilla y muy usada en la industria para detectar una posición particular es usando interruptores para final de carrera, los cuales se accionan a través de varillas, levas, etc., proporcionan una señal de mando para el desarrollo de procesos de control. En este caso el final de carrera debe de ser ubicado de tal forma que el cursor active este interruptor en la posición exacta donde los alabes se cierran.

En tareas de mando existen 3 series de aparatos con 3 diferentes ejecuciones de contacto de estos dispositivos:

- Abiertos
- En caja de material aislante.
- En caja metálica.

Con:

- Accionamiento de acción instantánea
- Accionamiento de carrera normal.
- Accionamiento de carrera normal con cruce de contactos.

Entre el diverso tipo se opta por el dispositivo de final de carrera en caja metálica, por su resistencia a golpes y condiciones industriales de trabajo, con contactos de accionamiento instantánea, para una respuesta optima.

El elemento que se adapta para este diseño es el 3SE31 (ver figura 7.17), de palanca de rodillo de ajuste fino, por el grado de posición deseada según las condiciones de trabajo. La tabla de datos técnicos se muestra en la tabla 7.11.

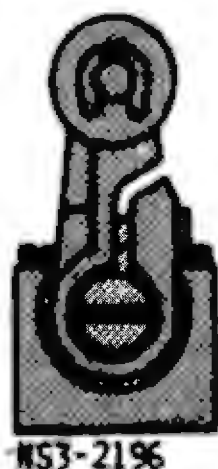


Figura 7.17 Final de carrera

TENSIÓN NOMINAL DE AISLAMIENTO U_i	AC 500V, DC 600V
TENSIÓN DE SERVICIO NOMINAL U_e	AC 500V, mayor de 380V
INTENSIDAD DE SERVICIO NOM. I_e con:	
<p style="text-align: center;">$U_e = AC$</p> <p>230V</p>	<p>6 A</p> <p>4 A</p>
<p style="text-align: center;">$U_e = AC$</p> <p>400V</p>	
TEMPERATURA AMBIENTE	-40 hasta +85 °C

Tabla 7.11

7.4.8 ELECCION DEL SENSOR DE PLENA CARGA:

La señal de plena carga es la que le indica al controlador que el generador ha alcanzado la potencia máxima que este puede producir durante la secuencia de plena carga.

Una forma de detectar cuando el sistema ha alcanzado la plena carga es, mediante la medición de la corriente en las 3 fases del sistema; la cual para la condición de plena carga es de 250 A en cada una de las fases.

Anteriormente se estableció que el requerimiento de esta señal es de tipo digital. Por lo tanto se necesita de un dispositivo capaz de emitir una señal cuando el sistema alcance la corriente de plena carga.

Un dispositivo utilizado para detectar valores de corriente es el relé bimetálico, el cual cuenta con una serie de contactos libres de potencial, (N.A. o N.C) estos actúan cuando el relé detecta un valor de corriente para el que ha sido configurado.

Debido a que el valor de corriente a detectar para este caso es considerablemente grande (250 A), es necesario emplear un dispositivo capaz de reducir esta corriente a un valor medible. De lo anterior se establece que debe de utilizarse un transformador de corriente con una razón de transformación de 250 Amp / 5 Amp, el cual se debe conectar entre una de las fases del generador y la red. Así cuando el generador llegue a los 250 A de plena carga, en el secundario del transformador existirán 5 A.

A continuación se establecen las características que debe de tener el relé bimetálico a utilizar:

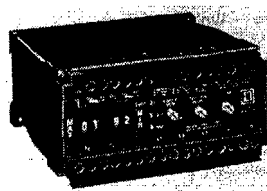
- Que sea para utilización en sistemas trifásicos.
- Que pueda detectar valores de corriente de 5 A en adelante.

El dispositivo sugerido para tal aplicación es el V3460 de la marca SQUARE D el cual cuenta con las siguientes características:

- Rango de detección seleccionable (2,3,4 y 5 Amp)
- Voltaje de línea 480 VAC
- 2 salida de relé NA y NC para límites de corriente máxima y mínima programados.
- Precisión 2%

El transformador de corriente adecuado es el 64R-251 también de la marca SQUARE D.

La figura 7.20 muestra estos sensores:



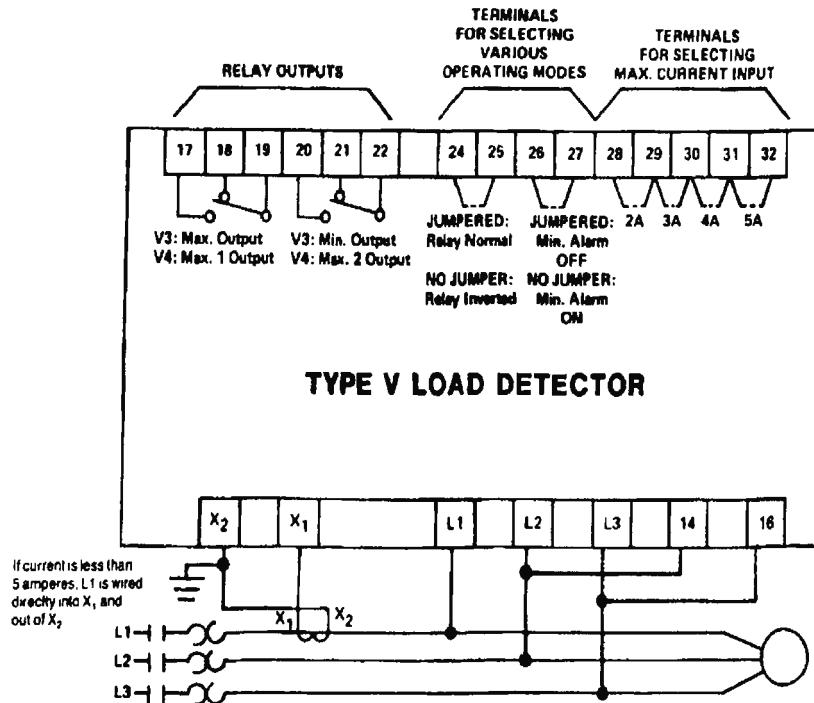


Figura 7.20 Diagrama de conexión del sensor a plena carga

Sensor de línea

Este sensor tiene como finalidad monitorear las condiciones de la línea comercial a que esta conectado el estator del generador. Dentro de las condiciones mas criticas que debe monitorear este sensor están:

- Monitoreo de la perdida de una de las tres fases de la red comercial.
- Monitoreo de inversión de fase.
- Monitoreo de cortes en la línea de distribución.

Dentro del diseño se ha considerado para esta aplicación un monitor de línea trifásico llamado EAC- 8000 LINEBACKER. Este dispositivo protege la carga contra fallas anteriormente mencionadas y además puede proteger contra desbalances de la línea y desviación de frecuencia.

Cuando se presenta alguna alarma, el protector activa una salida de voltaje de 24 Vdc., este dispositivo posee una pantalla digital que despliega el valor de voltaje de cada fase, la frecuencia y despliega una bitácora de alarmas. El protector de línea tiene una característica importante que consiste en una función de tiempo de espera por falla

(rango de 0 a 15 seg.). La pantalla digital muestra el tiempo de espera restante, siempre y cuando el voltaje de control de entrada este presente (24 VAC). Esta función es útil en el momento que se de un corte de energía momentáneo, el protector no envía la señal de desconexión sino hasta que transcurre el tiempo de espera programado, (2 seg.) exceptuando el caso en que se detecte una inversión de fases, ignorando el tiempo de espera y envía la señal de desconexión instantáneamente.

La figura 7.21 muestra el panel frontal de operación de la unidad EAC.8000:

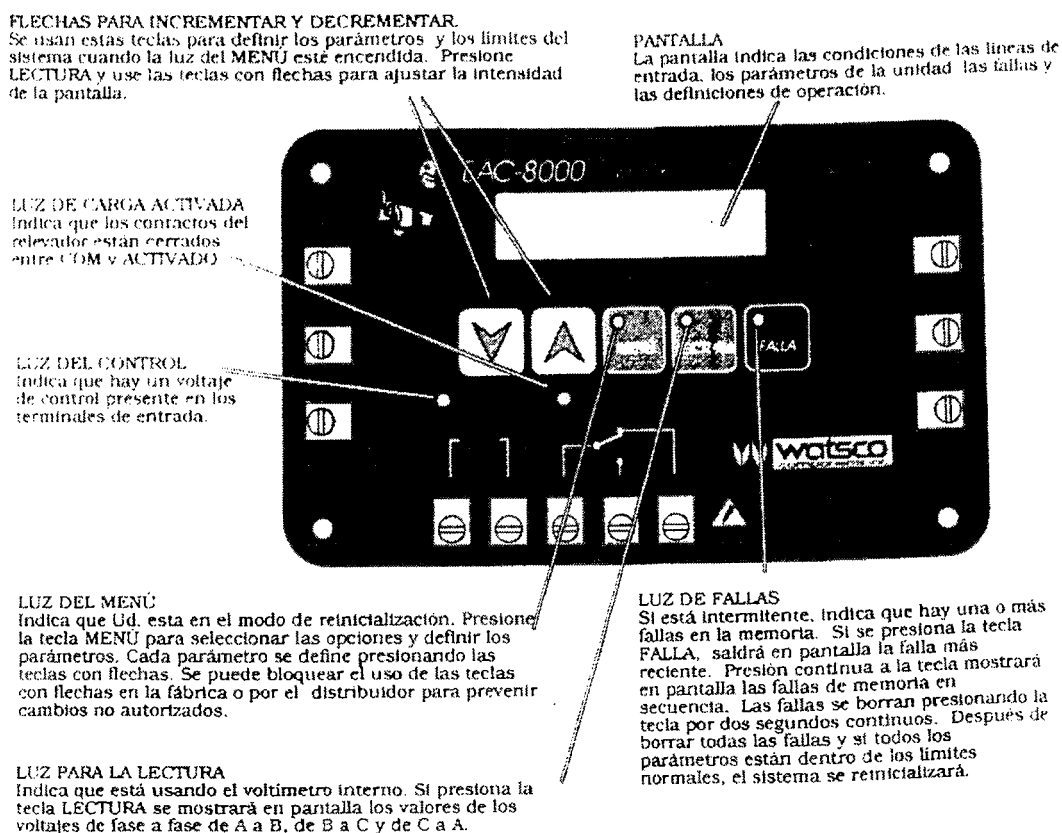


Figura 2

Figura 7.21 Sensor de línea

Un ejemplo de conexión de este dispositivo se muestra en la figura 7.22.

**EJEMPLO #1 DE CONEXIÓN:
PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE ENTRADA**

Este circuito muestra al EAC-8000 conectado para proveer el monitoreo de la carga en el lado del control del contactor y los voltajes de las líneas de entrada. El voltaje de control está conectado al circuito del termostato existente de 24 VAC. Fijese que un "anticipador de carga" extra no es necesario porque el anticipador del EAC-8000 es automático.

LÍNEA DE ALTO VOLTAJE DESCONECTADA
DE LA DELTA O DE LA Y

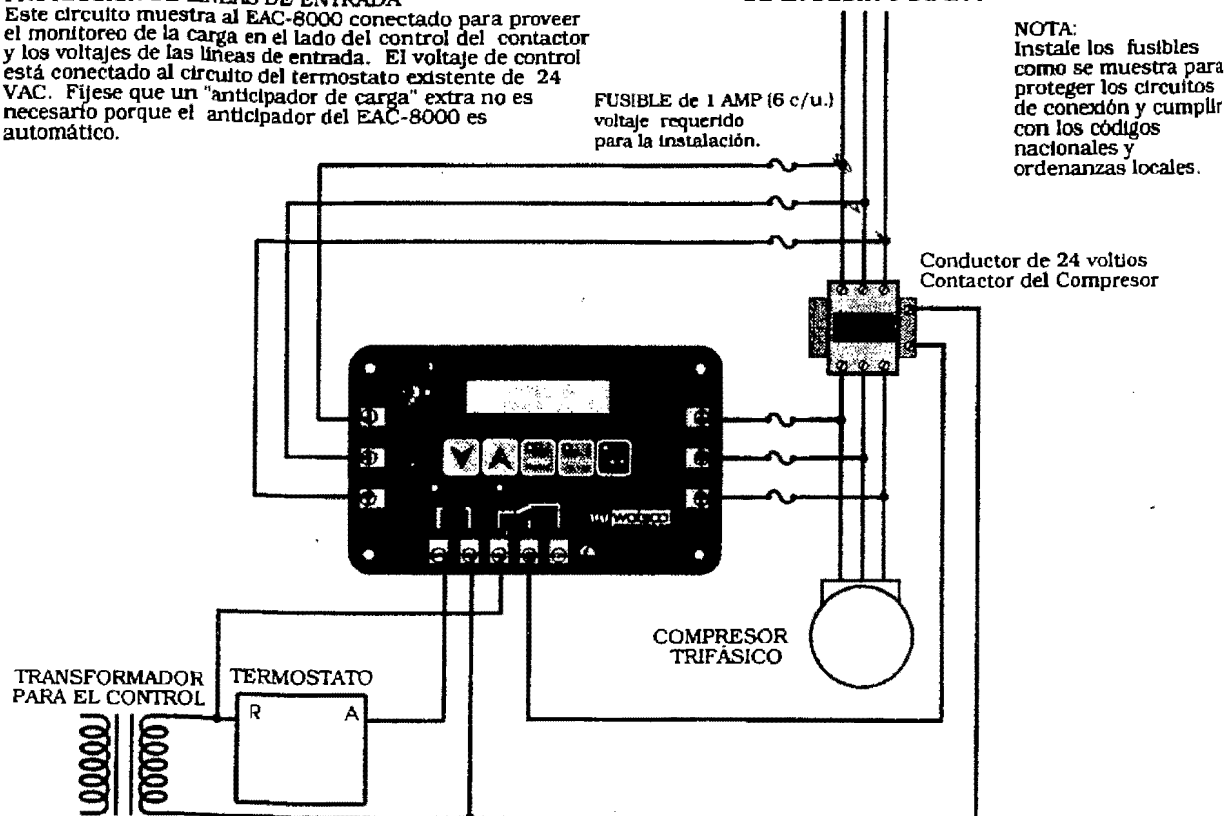


Figura 7.22 Diagrama de conexiones

En el diseño propuesto, la conexión de la señal de activación de 24 Vdc ira conectada a una entrada del algún modulo digital, para que el PLC reconozca alguna falla en la línea y este active el contactor que permitiría la desconexión e interconexión entre el generador y la línea comercial.

7.5 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS ACTUADORES DE CONTROL.

7.5.1 Electrovalvulas.

Electrovalvulas: el objetivo de este dispositivo es permitir el flujo de agua a través de las tuberías de enfriamiento que sirve para enfriar la turbina, las fuentes disponibles son agua del río o el agua de distribución municipal.

El tipo de Electrovalvulas seleccionadas para el diseño es la del tipo de válvulas solenoides, de 1". El sensor seleccionado es la válvula 1S7114 de Granzow INC. La cual es de propósito general bidireccional, para interconexión en tubería galvanizada de 1". La presión de operación es de 300 PSI, y puede operar sin la presión del líquido. Tiene un consumo de 8 Wats con un voltaje de activación entre 10 a 30 Vdc.

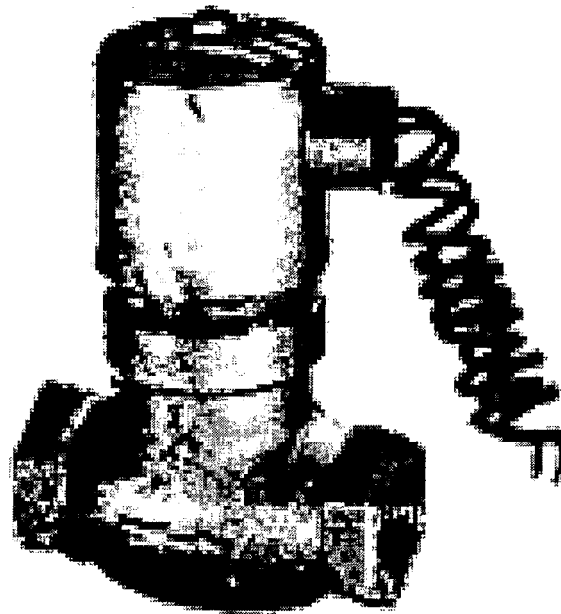


Figura 1.23 Electrovalvula

7.5.2 Servomotor.

El objetivo de este actuador es mover el sistema del distribuidor para permitir cerrar o abrir los alabes. Las características son las siguientes:

- Alimentación de 24 Vdc.
- Torque inicial alto y baja inercia: ya que debe proveer de una respuesta casi instantánea al recibir las ordene de giro

.El motor sugerido para el diseño es el GM9 de la fabrica AXIOM INC.

el cual tiene la siguientes características:

- 113 Watts
- Alimentación de 23 Vdc
- Consumo de corriente 113 Wats
- Torque: 36 Ncm
- Velocidad 3000 RPM
- 0.409 KG cm²

7.5.3 Contactores de maniobra.

El autómeta debe tener la capacidad de controlar al servomotor en ambos sentidos por lo tanto se sugiere en el diseño la siguiente configuración de la figura 7.24:

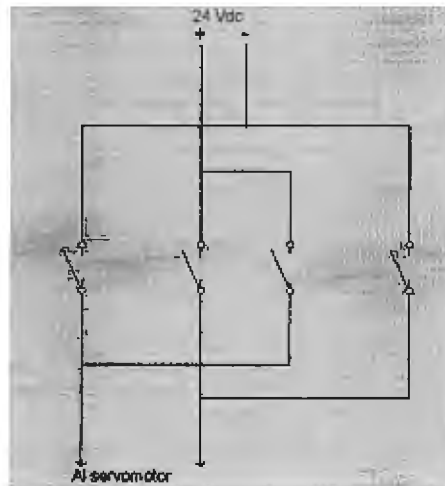


Figura 7.24 Diagrama de conexión para cambios de giro en un servomotor

Los tipos de contactores convenientes para esta aplicación son los LP1D12008BD, de la marca Telemecanique contactor de 2 polos, con voltaje DC de la bobina (24 Vdc), y una corriente máxima en los contactos de salida de 12 A

CAPITULO VIII. ALGORITMO DE CONTROL

En el presente capítulo se establecen los diagramas de flujo correspondientes a cada una de las etapas operativas del proceso, tomando en cuenta las diferentes acciones de control necesarias y las condiciones a vigilar durante el proceso. Estos diagramas de flujo servirán como base para desarrollar las rutinas de programación de control que gobernarán al autómatas programable.

La figura 8.1 muestra la secuencia lógicas de las diferentes etapas previamente definidas del proceso:

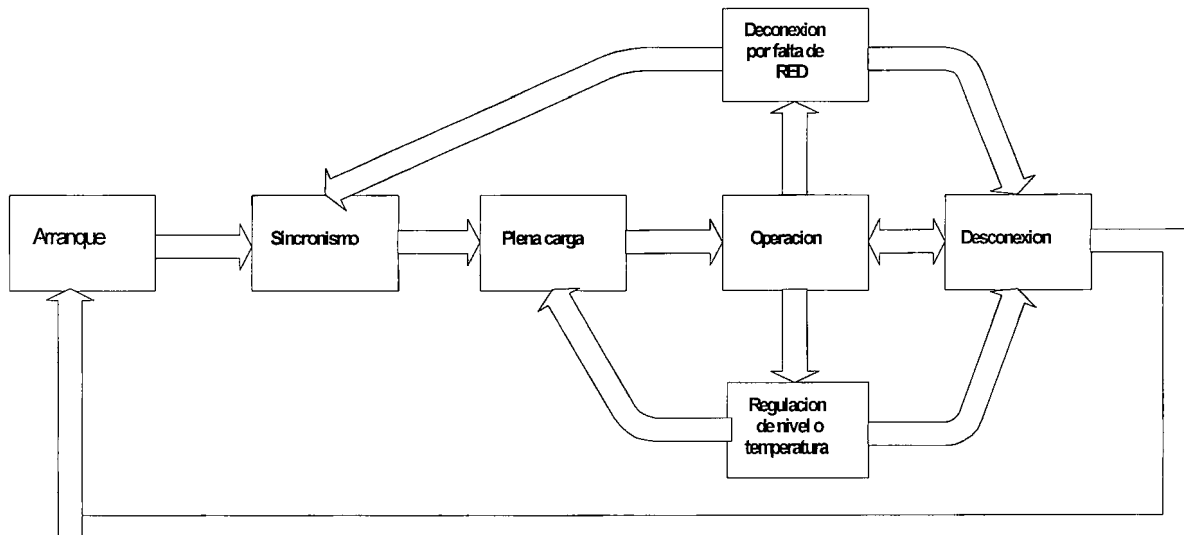


Figura 8.1.

Cada una de estas etapas representan los pasos lógicos que el PLC debe realizar. Cada una de ellas se explicaran a continuación:

Condición Preparacion para el Arranque.

El diagrama de flujo de esta etapa se muestra en la figura 8.2. Esta etapa consiste inicialmente, en verificar las condiciones siguientes:

Variables	Condición
Velocidad	0 r.p.m.
Temperatura	Temp 40°C
Nivel de aceite	Verdadero (existente)
Red comercial	Verdadero (existente)
Nivel de la cámara de carga	Nivel Mínimo de operación < Nivel real del tanque
Alabes cerrados	Verdadero

Tabla 8.1

Sí alguna de estas condiciones no se cumplen, el programa verificara y ejecutara la orden de cerrar totalmente los alabes del distribuidor, a continuación verifica nuevamente si el interruptor manual esta activado y si ha desaparecido las condiciones de fallas, de lo contrario el programa verificara en un lazo estas dos ultimas condiciones hasta que se cumplan.

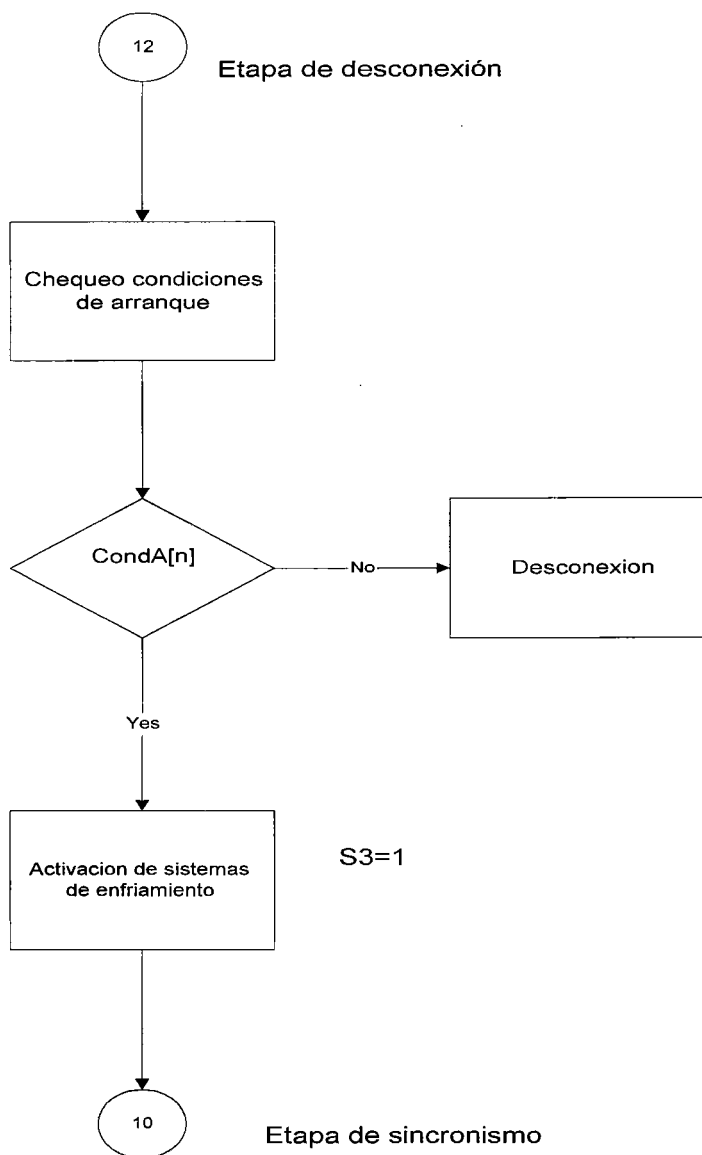
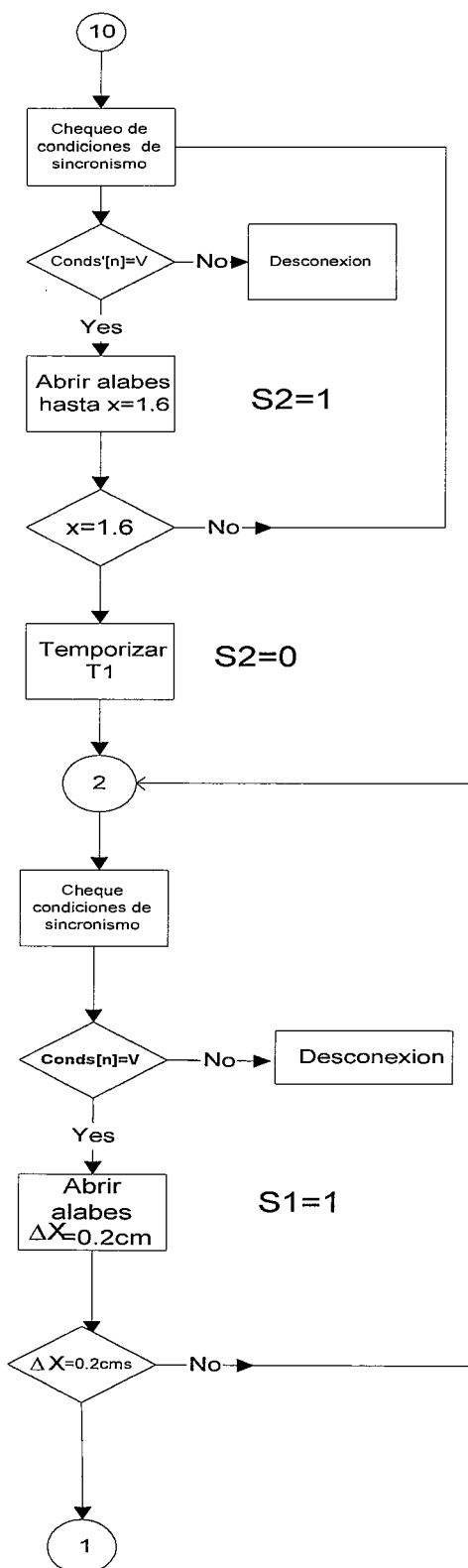


Figura 8.2 Flujograma de la etapa de arranque

Etapa de sincronismo

La figura 8.3 muestra el flujograma de esta etapa.

ETAPA DE
SINCRONISMO

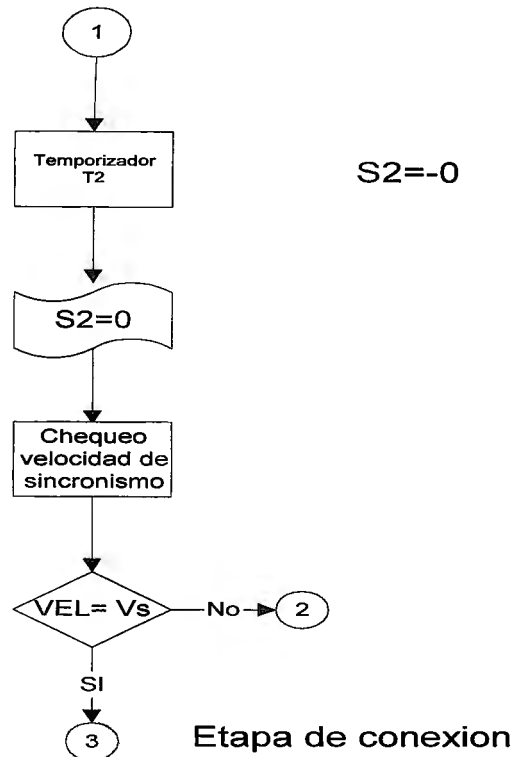


Figura 8.3 Etapa de sincronismo

En la etapa de sincronismo son leídas por el PLC las condiciones que muestra la tabla 8.2 :

Variables	Condición
Temperatura	Temp ≤ 50°C
Nivel de aceite	Verdadero
Red comercial	Verdadero
Nivel de la cámara de carga	Nivel Mínimo de operación < Nivel del tanque < Nivel máximo de operación
Agua en las tuberías de enfriamiento	Verdadero

Tabla 8.2

Sí no se cumplen cualquiera de estas condiciones el programa saltara a la rutina de desconexión, si las condiciones se cumplen, entonces los alabes se moverán un equivalente lineal del potenciómetro de 1.6 cms. Este valor de apertura (Xi) asegura que se pueda vencer la inercia del sistema turbina generador, luego espera un tiempo de 100 segundos, definido por un temporizador interno (T1) hasta que se establezca la

velocidad correspondiente a esa apertura. Se revisan nuevamente las condiciones anteriores, y si se cumplen, se comienzan a desplazar los alabes con cambios constantes a 0,2 cms hasta que se alcanza la velocidad de sincronismo, (720 r.p.m.) en cada cambio de apertura se espera un tiempo de 50 segundos(T2) para que el sistema se estabilice entre cada apertura. Una vez alcanzada la velocidad de sincronismo, el programa salta a la rutina de conexión.

Estos tiempos de espera corresponden, al tiempo de estabilización de la función velocidad - tiempo determinada en el capítulo 4.

Etapa de conexión.

El PLC revisa la siguientes condiciones de conexión de acuerdo a la figura 8.4:

Variables	Condiciones
Velocidad de sincronismo	$790 \text{ r.p.m.} \geq \text{Velocidad} \geq 720 \text{ r.p.m.}$
Temperatura	$\text{Temp} \leq 50^\circ\text{C}$
Nivel de aceite	Verdadero
Red comercial	Verdadero
Nivel de la cámara de carga	$\text{Nivel M\u00ednimo de operaci\u00f3n} < \text{Nivel del tanque} < \text{Nivel m\u00e1ximo}$
Flujo de agua en sistema de enfriamiento	Operaci\u00f3n Verdadero

Tabla 8.3

ETAPA DE CONEXION

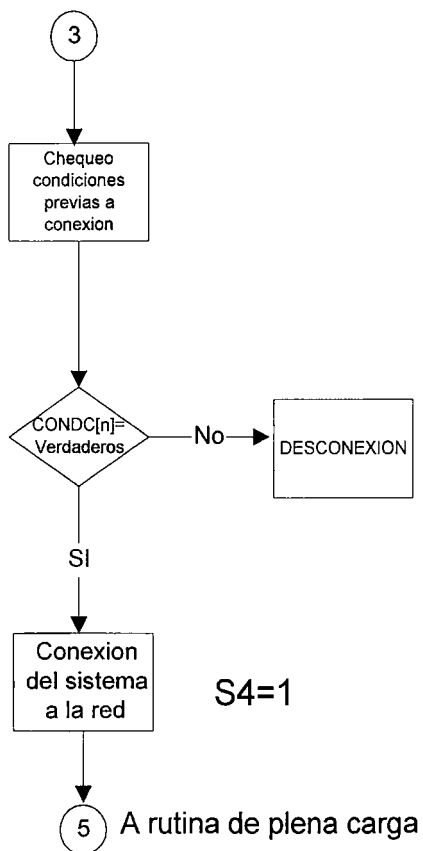


Figura 8.4. Flujograma de etapa de conexión

Si se cumplen las condiciones anteriores el PLC envía una señal para conectar el generador a la red comercial, de lo contrario salta a la rutina de desconexión.

Etapa a plena carga.

Los valores de las variables que son monitoreadas en esta etapa se muestran a continuación en la tabla 8.4:

Variables	Condición
Velocidad de sincronismo	790 r.p.m. \geq Velocidad \geq 740 r.p.m.
Temperatura	Temp. \leq 50°C
Nivel de aceite	Verdadero
Red comercial	Verdadero
Nivel de la cámara de carga	Nivel Mínimo de operación < Nivel del tanque < Nivel máximo de operación
Detector de plena carga	Verdadero
Flujo de agua en sistema de enfriamiento	Verdadero

Tabla 8.4

Sí se cumplen las condiciones anteriores los alabes serán abiertos hasta llegar a un cambio de apertura constante, (Δx) luego el programa ordenara al PLC detener los alabes y activara un temporizador igual a una constante de tiempo con el fin de lograr la estabilización en la carga del sistema, este proceso es repetido hasta llegar a cualquiera de las condiciones de plena carga que son:

- Sí el nivel llega es mayor al mínimo de operación
- La potencia generada es máxima
- Se a logrado la máxima apertura posible de los alabes.
-

La figura 8.5 muestra el flujograma de esta etapa.

ETAPA PLENA CARGA

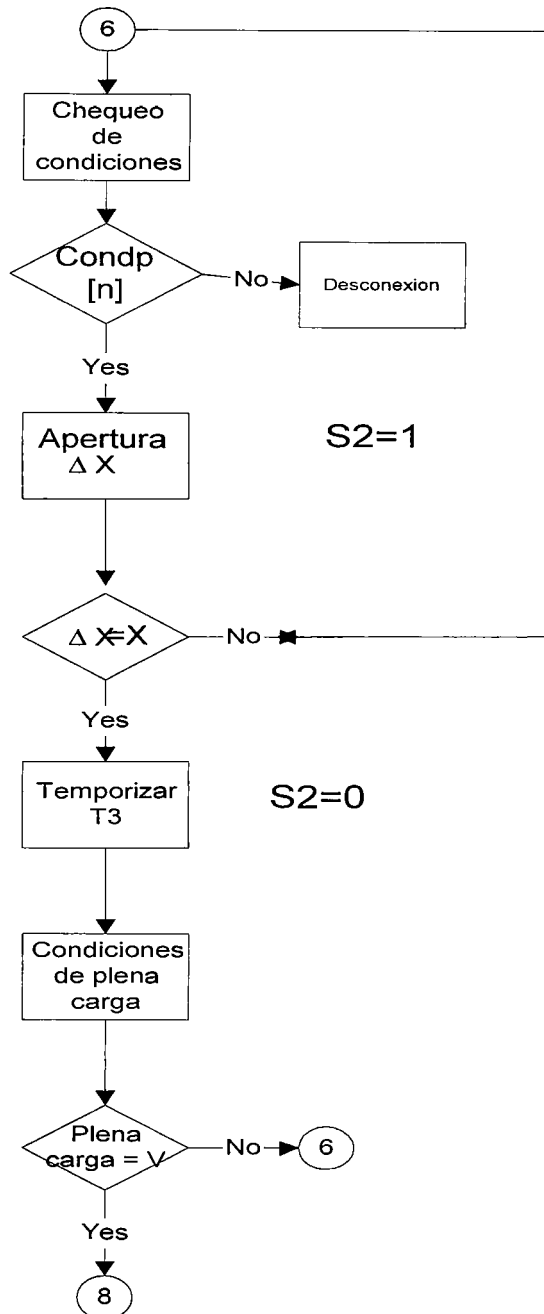


Figura 8.5 Flujograma de etapa a plena carga

Etapa de operación.

Como primer paso el PLC debe verificar estas condiciones:

Variables	Condición
Velocidad de sincronismo	$790 \text{ r.p.m.} \geq \text{Velocidad} \geq 720 \text{ r.p.m.}$
Temperatura	$\text{Temp} \leq 50^\circ\text{C}$
Nivel de aceite	Verdadero
Red comercial	Verdadero
Nivel de la cámara de carga	$\text{Nivel M\u00ednimo de operaci\u00f3n} < \text{Nivel del tanque} < \text{Nivel m\u00e1ximo de operaci\u00f3n}$
Flujo de agua en sistema de enfriamiento	Verdadero
Alabes cerrados	Verdadero

Tabla 8.5

Si las variables est\u00e1n fuera de los niveles de operaci\u00f3n, verifica el tipo de alarma si es de temperatura o nivel en cualquiera de los casos, el programa debe saltar a las respectivas subrutinas de regulaci\u00f3n, de lo contrario cualquier condici\u00f3n cr\u00edtica es suficiente para desconectar el sistema.

Si no hay ning\u00fan tipo de alarma el PLC revisa la presencia de red comercial, si no encuentra red el programa salta a una rutina de desconexi\u00f3n parcial de lo contrario se repite el proceso de monitoreo, presentado una condici\u00f3n normal de operaci\u00f3n a la m\u00e1xima carga permisible.

La figura 8.6 muestra el flujograma de la etapa de operaci\u00f3n:

ETAPA DE OPERACION

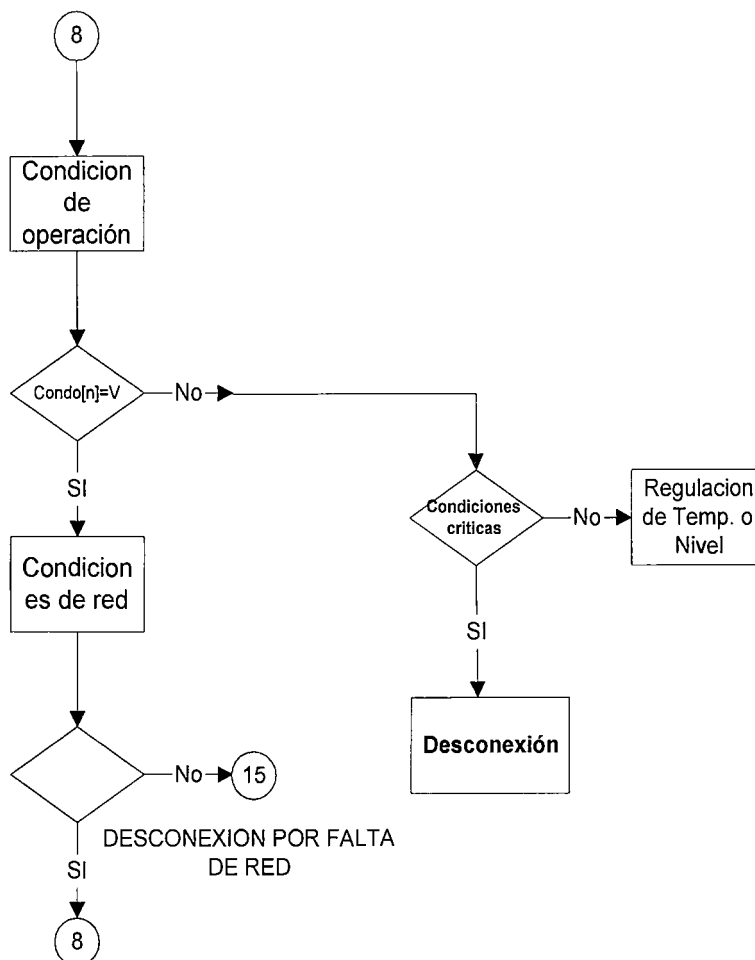


Figura 8.6 Flujo de etapa de operación

Etapa de desconexión.

Esta etapa se ejecuta siempre y cuando hay una condición que sobrepasa a los niveles normales de operación (condición crítica) y depende de la etapa en que se encuentra el proceso. El primer paso consiste en cerrar los alabes del distribuidor hasta un valor de apertura previamente almacenado, y corresponde al valor justo en que se sincronizó, luego se desconecta el generador de la red y se cierra completamente el distribuidor, y resetea las condiciones de operación. Tal como se puede observar en el diagrama de flujo de la figura 8.7, el programa queda en un lazo repetitivo hasta que las condiciones monitoreadas regresen a su estado normal.

ETAPA DE DESCONEXION

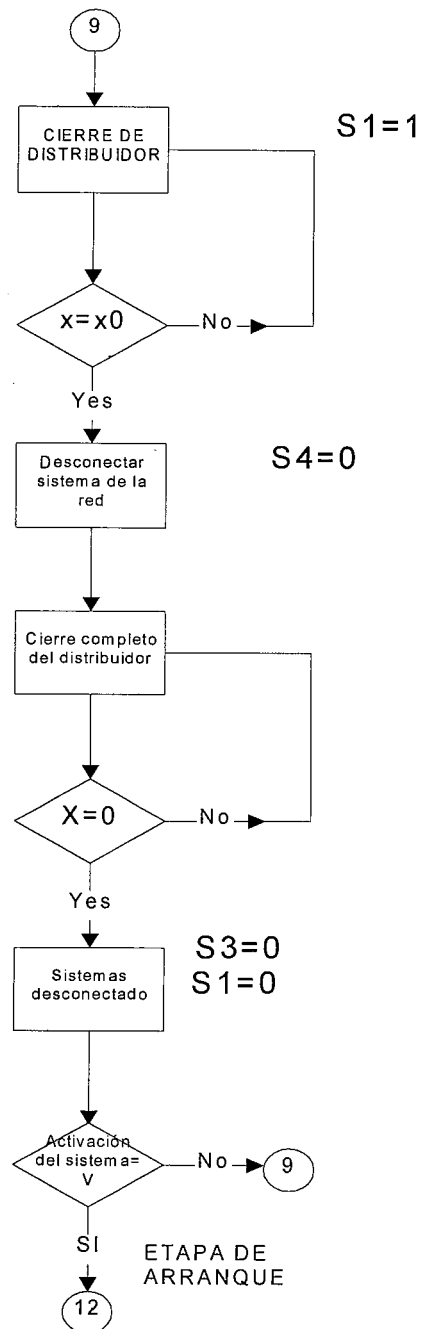


Figura 8.7 Flujoograma de desconexión

Desconexión por falta de red.

Al existir una condición de bajo voltaje, o un corte de energía, el programa saltará a la rutina de desconexión por falta de red. Al entrar el PLC en esta rutina, como primer

paso se desconectara el generador de la red comercial, luego cerrara completamente los alabes del distribuidor, después de haber ejecutado el anterior proceso el PLC se encontrara en un lazo repetitivo revisando las condiciones de línea. Sí estas vuelven a la normalidad el programa saltara a la etapa de sincronía nuevamente. En la figura 8.8 muestra el flujograma de esta etapa, donde la salida S4 se desactiva para desconectar el generador de la red y S1 se desactiva para cerrar los alabes.

DESCONEXION POR FALTA RED

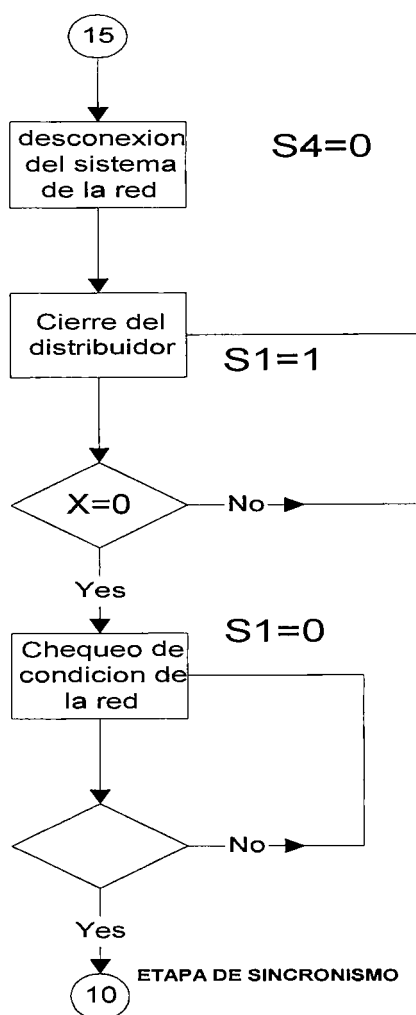


Figura 8.8 Flujograma de desconexión por falta de red

Control de temperatura

Esta entra en operación al detectarse alguna sobret temperatura en el sistema. Esta rutina de control de temperatura consiste en calcular el porcentaje de carga promedio a que debe bajar el generador, de acuerdo a ciertos rangos de temperatura establecidos antes de que esta llegue a la temperatura critica, los rangos de temperatura oscila entre 50 °C y 60 °C en decrementos de 25 % antes de llegar a desconexión, el lazo se repite hasta que la temperatura alcance nuevamente 50°C. Para determinar el porcentaje de carga de acuerdo a la temperatura en el generador y la turbina, el PLC debe leer los valores de temperatura y compararlos con los rangos siguientes:

Rango de temperatura	Porcentaje de carga
$50^{\circ} \text{ C} < T1 \leq 53^{\circ} \text{ C}$	Bajar carga a un 75 %
$53^{\circ} \text{ C} < T2 \leq 56^{\circ} \text{ C}$	Bajar carga a un 50 %
$56^{\circ} \text{ C} < T3 \leq 59^{\circ} \text{ C}$	Bajar carga a un 25 %
$T4 > 59^{\circ} \text{ C}$	Saltar a rutina de desconexión

El programa debe tener almacenado la posición de los alabes para los respectivos porcentajes de carga, estas posiciones pueden determinarse experimentalmente monitoreando la potencia de salida del generador.

La figura 8.9 muestra el diagrama de flujo de esta subrutina.

Control de temperatura

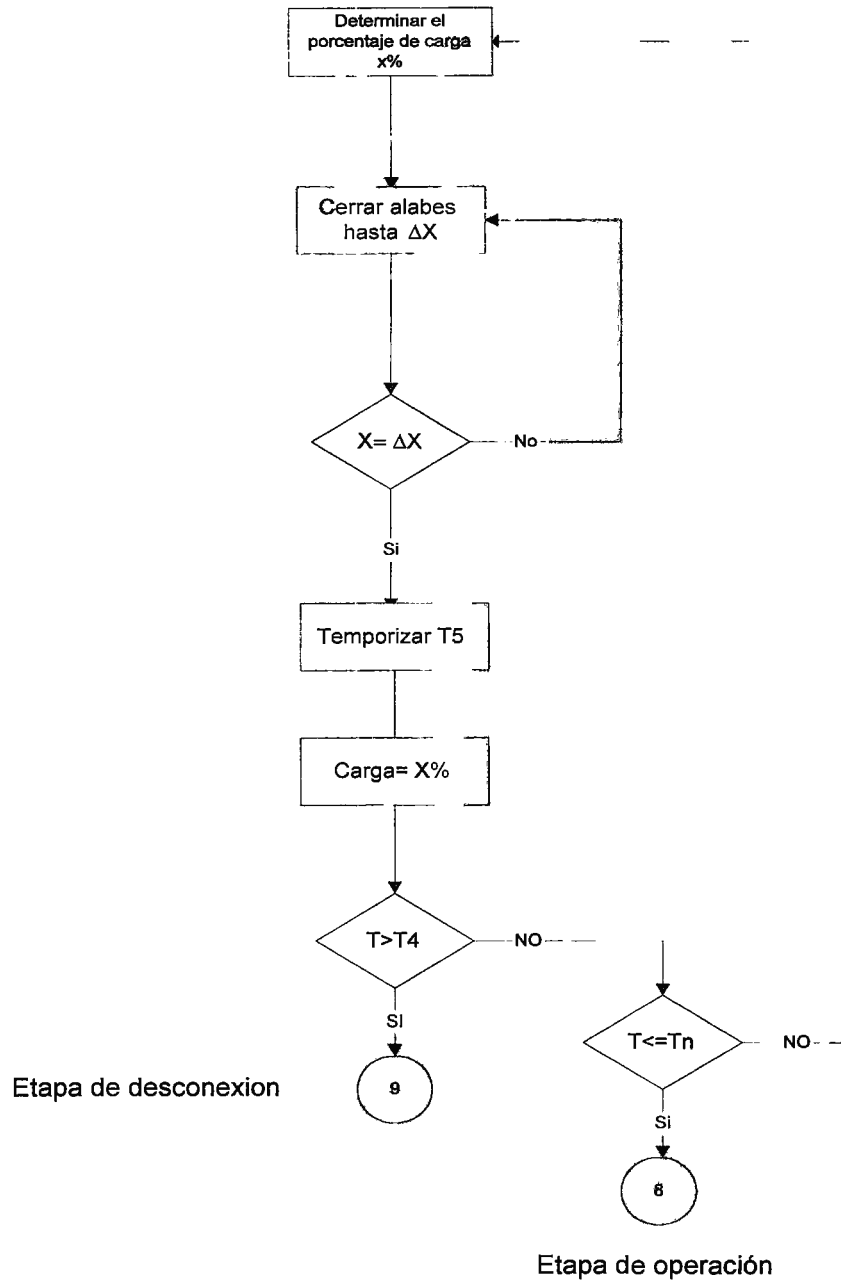


Figura 8.9 Flujo de control de temperatura

Control de nivel

En esta rutina se calcula el valor de corrección por medio de la ecuación 5. nivel-apertura (determinada en el capítulo IV):

$$\Delta X = 0.14 \Delta N + 0.16 \text{ (ecuación 5)}$$

En donde ΔN es la diferencia entre el nivel máximo de operación y el valor actual de nivel, y Δx es el cambio de posición del potenciómetro para permitir el cierre de los alabes.

Luego se activa un lazo repetitivo de cierre de alabes hasta llegar al valor de desplazamiento calculado, se activa un temporizador para que el controlador espere a que se estabilice el nivel del tanque, a continuación se lee nuevamente el valor de nivel y si está dentro del rango de operación el programa salta a la rutina de plena carga de lo contrario vuelve a repetir el lazo. La figura 8.10 muestra el flujograma de esta rutina.

Control de nivel

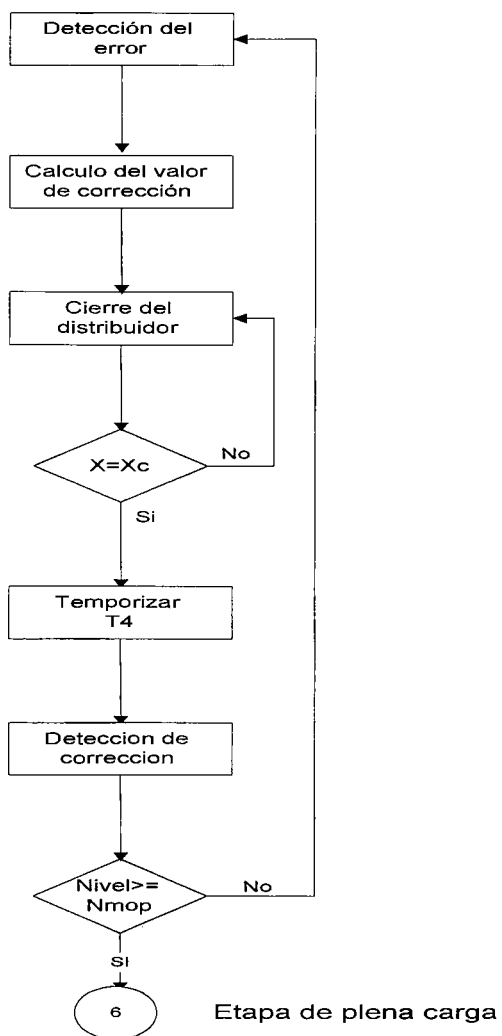


Figura 8.10 Flujograma de control de nivel

CAPITULO IX

DESARROLLO DEL PROGRAMA

Una parte importante en el desarrollo del presente diseño de automatización es la elaboración del programa de usuario, el cual se define como el conjunto de todas las instrucciones para el tratamiento de las señales, por medio de las cuales se actúa sobre la instalación a controlar (Proceso generación de energía eléctrica de la P.C.H.), de acuerdo con las necesidades de los trabajos a realizar en la planta.

Para asegurar la confiabilidad y el perfecto funcionamiento del programa, es necesario realizar durante la elaboración de este, ciertas pruebas practicas para comprobar la ejecución de las rutinas del P.L.C., estas pueden realizarse ya sea mediante una simulación del proceso, o de ser posible, en la propia instalación a controlar, siendo esto ultimo lo ideal, ya que de ese modo se prueba el funcionamiento del programa bajo condiciones reales de operación. Para poder realizar estas pruebas, ya sea mediante simulación o en la propia planta, es necesario contar con el equipo de instrumentación y control adecuados lo cual muchas veces se ve limitado por el factor económico y por la disponibilidad y funcionalidad del equipo con el que se pueda contar.

Para el caso del presente diseño, las pruebas practicas de las rutinas del programa de usuario fueron realizadas en las propias instalaciones de la P.C.H de Sonsonate para esto se tuvo acceso a un P.L.C. Simatic S5 100U y a equipo de instrumentación adecuado, los cuales fueron proporcionados por la Compañía Eléctrica Cucumacayan S.A. (C.E.C.S.A) con el fin de llevar a cabo la implementación del sistema de automatización de dicha central, en la cual colaboro desinteresadamente con el presente grupo de tesis.

Debido a lo anteriormente expuesto, con el fin de aprovechar los recursos técnicos de equipo e instalaciones proporcionados por la C.E.C.S.A, el programa modelo del diseño, se presenta en lenguaje de programación STEP 5 con lo cual se asegura el perfecto funcionamiento y fiabilidad de operación de cada una de las rutinas, ya que estas fueron

probadas y depuradas en el ambiente real de trabajo para cada una de las condiciones de operación de la P.C.H. de Sonsonate

A continuación se presenta toda la información concerniente al desarrollo del programa del P.L.C

9.1 PARAMETRIZACION DE ENTRADAS/SALIDAS MARCAS Y TEMPORIZADORES

Antes de realizar la elaboración del programa de usuario del P.L.C es necesario definir o establecer la parametrización de las variables vistas desde el P.L.C.

La parametrización se refiere a la asignación de direcciones tanto de entrada, salida como de memoria en el autómata programable, con el fin de tener acceso a ellas mediante programación.

A continuación como una referencia se presenta la parametrización tanto de entradas, salidas, marcas y temporizadores utilizados para el desarrollo del programa.

9.1.1 PARAMETRIZACION DE ENTRADAS DEL SISTEMA

Las direcciones para cada una de las entradas del sistema a utilizar en el programa son las siguientes:

ENTRADAS DIGITALES:

- E 0.0 : Entrada de paro del sistema
- E 0.1 : Entrada de plena carga
- E 0.2 : Entrada de selección de operación automática
- E 0.3 : Entrada de start
- E 0.4 : Entrada de retroalimentación de conexión
- E 0.5 : Entrada de voltaje de red
- E 0.6 : Entrada de señal de velocidad de sincronismo
- E 0.7 : Entrada de señal de sobrevelocidad
- E 1.0 : Entrada de nivel de aceite
- E 1.1 : Entrada de señal de alabes completamente cerrados

E 1.2 : Entrada de señal de flujo de agua de enfriamiento

E 1.3 : Entrada de sobrecarga del generador

E 1.5 : Entrada de sobrecarga de bomba de aceite

ENTRADAS ANALOGICAS

MW 70 : Entrada de nivel de agua en cámara de carga

MW 72 : Entrada de temperatura en chumacera 1

MW 74 : Entrada de temperatura en chumacera 2

MW 76 : Entrada de temperatura en turbina

MW 80 : Entrada de señal de posición de alabes

9.1.2 PARAMETRIZACION DE SALIDAS DEL SISTEMA

Las direcciones para cada una de las salidas son las siguientes:

A 5.0 : Señal de apertura de alabes

A 5.1 : Señal de cierre de álabes

A 5.4 : Señal de conexión del sistema

A 5.5 : Señal de activación de Electrovalvulas del sistema de enfriamiento

A 7.1 : Señal de activación de bomba de aceite

9.1.3 PARAMETRIZACION DE MARCAS

Las marcas son salidas intermedias ya sea en forma de bits, bytes o palabras las cuales son utilizadas para representar estados lógicos binarios que pueden ser consultados en cualquier momento dentro de la ejecución del programa del PLC.

Los tipos de marcas utilizados en el desarrollo del programa son las descritas a continuación:

Marcas indicadoras o de paso : Estas marcas indican la realización de una determinada rutina o acción dentro del programa, con el fin de que no se vuelva a ejecutar nuevamente a menos que sea necesario.

Marcas de iniciación de rutina: Estas marcas se encuentran generalmente al principio de una rutina o modulo y se utilizan para resetear determinadas salidas y marcas que por seguridad deben de estar reseteadas para poder iniciar una determinada rutina.

Marcas de comparación: Estas marcas contienen el resultado de alguna rutina de comparación entre un valor analógico y un punto de consigna o valor de configuración.

Marcas habilitadoras: Estas marcas son utilizadas para habilitar la ejecución de una determinada acción dentro de una rutina del programa.

Las marcas de bit utilizadas dentro del programa son las siguientes:

M 1.0 : Marca de start

M 1.1 : Marca de operación automática

M 1.2 : Marca indicadora de temporización de agua de enfriamiento

M 1.3 : Marca indicadora de flujo de agua de enfriamiento

M 2.0 : Marca de iniciación de rutina de apertura inicial

M 2.1 : Marca indicadora de cierre total de alabes

M 2.2 : Marca de comparación del modulo de apertura inicial

M 2.3 : Marca habilitadora de temporización de estabilización de velocidad

M 2.4 : Marca habilitadora de marca de apertura inicial

M 2.5 : Marca habilitadora de marca de apertura inicial

M 2.6 : Marca indicadora de activación de motor de apertura de alabes

M 2.7 : Marca de paso para saltar a modulo de sincronización-conexión

M 3.0 : Marca de iniciación de rutina de sincronización conexión

M 3.1 : Marca habilitadora de apertura de alabes durante rutina de sincronización conexión

M 3.2 : Marca de comparación de la rutina de sincronización conexión

M 3.3 : Marca habilitadora para salto a modulo de incremento

M 3.4 : Marca habilitadora de temporización para conexión

M 3.5 : Marca indicadora de sincronización

M 3.6 : Marca indicadora de apertura máxima

- M 4.0 : Marca de iniciación de modulo de plena carga-operación
- M 4.1 : Marca de comparación de modulo de plena carga-operación
- M 4.2 : Marca de comparación de modulo de plena carga-operación
- M 4.3 : Marca de paso de modulo de plena carga-operación
- M 4.4 : Marca indicadora de plena carga con apertura máxima

- M 5.0 : Marca de iniciación de modulo de desconexión
- M 5.1 : Marca de comparación de modulo de desconexión
- M 5.2 : Marca de iniciación para rutina de cierre total de alabes
- M 5.3 : Marca indicadora de cierre total

- M 6.0 : Marca de iniciación de rutina de desconexión parcial
- M 6.1 : Marca indicadora de normalización de red y de sincronización
- M 6.2 : Marca indicadora de desconexión por falta de red
- M 6.3 : Marca de activación de señal de paro

- M 7.0 : Marca de iniciación de rutina de regulación de nivel
- M 7.1 : Marca habilitadora para rutina de calculo de regulación de nivel
- M 7.2 : Marca habilitadora de cierre de alabes en rutina de regulación de nivel
- M 7.3 : Marca de comparación de rutina de regulación de nivel
- M 7.4 : Marca de comparación de rutina de regulación de nivel

- M 8.0 : Marca habilitadora de rutina de decremento de carga
- M 8.1 : Marca habilitadora de cierre de alabes en regulación de temperatura
- M 8.2 : Marca de iniciación de regulación de temperatura al 75% de carga total
- M 8.3 : Marca de comparación de regulación de temperatura al 75%
- M 8.4 : Marca de comparación de regulación de temperatura al 75%
- M 8.5 : Marca de paso por regulación de temperatura al 75%
- M 8.6 : Marca de iniciación de regulación de temperatura al 50% de carga total
- M 8.7 : Marca de comparación de regulación de temperatura al 50%

- M 9.0 : Marca de comparación de regulación de temperatura al 50%
- M 9.1 : Marca de paso por regulación de temperatura al 50%

M 9.2 : Marca de iniciación de regulación de temperatura al 25% de carga total

M 9.3 : Marca de comparación de regulación de temperatura al 25%

M 9.4 : Marca de comparación de regulación de temperatura al 25%

M 9.5 : Marca de paso por regulación de temperatura al 25%

M 24.0 : Marca para salto a regulación de nivel luego de regular temperatura

M 24.1 : Marca para saltar a regulación de nivel

M 24.2 : Marca para bajar al 75% de carga

M 24.3 : Marca para bajar al 50% de carga

M 24.4 : Marca para bajar al 25% de carga

Desde la marca M10.0 hasta la marca M23.7 son utilizadas en los módulos de comparación de variables

MARCAS DE ALARMA

M 18.0 : Marca de nivel máximo

M 18.1 : Marca de nivel de operación

M 18.2 : Marca de alarma de regulación de nivel

M 18.3 : Marca de alarma de desconexión por nivel crítico

M 19.3 : Marca de alarma indicadora de desconexión total

M 20.0 : Marca de alarma general (se activa al presentarse cualquier tipo de alarma)

M 22.3 : Marca de alarma de sobretemperatura 1

M 22.5 : Marca de alarma de sobretemperatura 2

M 22.7 : Marca de alarma de sobretemperatura 3

M 23.1 : Marca de alarma de desconexión por temperatura crítica

9.1.4 PARAMETRIZACION DE TEMPORIZADORES

A continuación se describen cada uno de los temporizadores a utilizar durante el desarrollo del programa.

T1 : Temporizador de espera de señal de flujo de agua de enfriamiento

T2 : Constante de tiempo de estabilización de velocidad para la apertura inicial X_i

T3 : Constante de tiempo de estabilización de velocidad para la apertura ΔX

T4 : Tiempo de espera luego de haber realizado conexión

T5 : Temporizador de seguridad

T6 : Tiempo de espera para iniciar rutina de plena carga

T7 : Tiempo de espera para apertura durante rutina de plena carga

T8 : Tiempo de espera para iniciar rutina de desconexión total

T9 : Tiempo de espera para iniciar rutina de cierre total de alabes

T 10 : Tiempo de espera para iniciar rutina de desconexión parcial

T 11 : Tiempo de espera de normalización de voltaje en la red

T 12 : Tiempo de espera para iniciar rutina de control de nivel

T 13 : Constante de tiempo de regulación de nivel

T 14 : Tiempo de espera para iniciar rutina de regulación de temperatura al 75% de la carga total

T 15 : Tiempo de espera para cierre del distribuidor

T 16 : Tiempo de espera para iniciar rutina de regulación de temperatura al 50% de la carga Total

T 17 : Tiempo de espera para cierre del distribuidor

T 18 : Tiempo de espera para iniciar rutina de regulación de temperatura al 25% de la carga total

T19 : Tiempo de espera para cierre del distribuidor

9.2 ELABORACION DEL PROGRAMA

Tomando como base los flujogramas presentados anteriormente los cuales representan el algoritmo o estrategia de control a utilizar en el presente diseño, se desarrollo un

programa escrito en lenguaje S5 AWL el cual puede ser ejecutado en un PLC de la familia SIMATIC 100U.

Con el lenguaje de programación STEP 5 se realizan las distintas tareas de automatización y control, mediante el programa de usuario, en conjunción con el autómeta programable SIMATIC S5.

Los programas de usuario se dividen en módulos (estructurados), la división es voluntaria y es definida por el programador. Existen varios tipos de módulos.

Los tipos de modulo utilizados en la elaboración del programa de usuario son los siguientes:

- Módulos de organización (OB) Estos módulos constituyen la interfaces entre el sistema operativo y el programa de usuario. Usualmente en el OB1 es donde se establece la ejecución de las diferentes etapas o rutinas que conlleva el proceso.
- Módulos de Programa (PB) En estos módulos se contiene normalmente la mayor parte del programa de usuario se utiliza un modulo de programa por c/u de las etapas del proceso.
- Módulos de Función (FB) Se utilizan para la programación de funciones solicitadas frecuentemente como lo son: lectura de entradas analógicas, conversión a código BCD y multiplicación de variables

La asignacion de módulos en el programa para cada una de las etapas del proceso se realizo en base al orden correlativo de estas durante la ejecución secuencial del proceso, la cual se presenta a continuación:

OB1 : Modulo de organización

PB1 : Modulo de preparación para arranque del sistema

PB2 : Modulo de apertura inicial

PB3 : Modulo de sincronia-conexión

PB4 : Modulo Plena Carga-operación

PB5 : Modulo de desconexión total

PB6 : Modulo de cierre total

PB7 : Modulo de desconexión parcial

PB8 : Modulo de control de nivel

PB9 : Modulo de control proporcional

PB10 : Modulo de regulación de temperatura al 75% de la carga

PB11 : Modulo de regulación de temperatura al 50% de la carga

PB12 : Modulo de regulación de temperatura al 25% de la carga

PB13 : Modulo de decremento

PB14 : Modulo de comparación

PB17 : Modulo de alarmas

PB18 : Modulo de lectura de posición de alabes.

9.3 ORGANIZACIÓN DEL PROGRAMA:

Mediante la organización del programa se determina cuales y en que orden tienen que ejecutarse los distintos módulos en los cuales esta dividido el programa. Para ello se establecen las llamadas (absolutas o condicionadas) a los módulos deseados, en él modulo de organización.

Intencionalmente se realiza el orden de las llamadas de los módulos correspondientes de forma que, tecnológica o funcionalmente, representen las diferentes etapas del proceso a controlar, que para este caso es el de generación de energía eléctrica en una P.C.H.

Las condiciones de salto hacia cada uno de los módulos desde el OB 1 se determinaron De acuerdo la tabla de verdad establecida en el análisis secuencial del proceso.

9.3.1CONDICIONES DE SALTOS HACIA MODULOS

A continuación se presentan Las diferentes condiciones de entrada y de salidas intermedias las cuales deben estar presentes en el modulo de organización OB1 para realizar saltos o bifurcaciones hacia los diferentes módulos del programa.

- Condiciones de salto hacia PB1 (Modulo de preparación para el arranque)

Para realizar el salto hacia PB1 tienen que cumplirse las siguientes combinaciones AND

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 1.1 : Marca de operación automática activada

UE 1.2 : Señal de flujo de agua de enfriamiento no presente (No detectada)

UNM 1.3 : Marca de detección de agua de enfriamiento no activada

- Condiciones de salto hacia PB2 (Modulo de apertura inicial)

UN E 1.2 : Señal de flujo de agua de enfriamiento presente (detectada)

UN E 0.4 : Señal de conexión del generador no detectada

UN E 1.3 : Señal de sobrecarga no presente

U E 0.5 : Señal de presencia de red detectada

UNM 3.6 : No debe de estar activada la marca de apertura máxima

UNM 2.7 : Marca de paso para modulo sincronia-conexión desactivada

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 1.1 : Marca de operación automática activada

UNM 20.0 : Marca de alarma general desactivada

UNM 6.0 : Marca de iniciación de rutina de desconexión parcial desactivada

- Condiciones de salto hacia PB3 (Modulo de sincronia-conexión)

El salto hacia PB3 se realiza al cumplirse cualquiera (OR) de estas 3 condiciones:

Condición 1:

UNM 3.6 : No debe de estar activada la marca de apertura máxima

UNM 3.5 : Marca indicadora de sincronización desactivada

UM 2.7 : Marca de paso del modulo de sincronizacion-conexión activada

UN E 0.4 : Señal de conexión del generador no detectada

Condición 2:

UNM 3.5 : Marca indicadora de sincronización desactivada

UE 0.6 : Señal de velocidad de sincronización detectada

UE 0.7 : Señal de sobrevelocidad no detectada

Condición 3

O M 6.1 : Señal de resincronización activada

- Condiciones de salto hacia PB4 (Modulo de plena carga operación)

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 1.1 : Marca de operación automática activada

UN M 8.5 : Marca de paso de regulación de temperatura al 75% de carga desactivada

UNM 20.0 : Marca de alarma general desactivada

UNM 23.7 : Alarma general de temperatura desactivada

UE 0.4 : Señal de conexión del generador detectada

UN E 1.3 : Señal de sobrecarga del generador no presente

U E 0.5 : Señal de presencia de red detectada

- Condiciones de salto hacia PB5 (Modulo de desconexión)

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 19.3 : Marca de alarma critica activada

UE 0.2 :señal de operación automática activada

UE 0.4 :Señal de conexión del generador detectada

- Condiciones de salto hacia PB6 (Modulo de Cierre total)

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 19.3 : Marca de alarma critica activada

UE 0.2 :señal de operación automática activada

UNE 0.4 :Señal de conexión del generador no detectada

- Condiciones de salto hacia PB7 (Modulo de desconexión parcial)

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 1.1 : Marca de operación automática activada

UM 6.1 : Marca de normalización de red y resincronización desactivada

UM 6.2 : Marca indicadora de desconexión por falta de red activada

- Condiciones de salto hacia PB8 (Modulo de Regulación de nivel en cámara de carga)

El salto hacia PB8 se realiza al ocurrir cualquiera de las 2 condiciones siguientes:

Condición 1:

UNM 6.0 : No este la marca de iniciación de rutina de desconexión parcial

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 1.1 : Marca de operación automática activada

UM 24.1 : Este marca de salto a regulación de nivel, luego de regulación de temperatura

Condición 2:

UNM 6.0 : No este la marca de iniciación de rutina de desconexión parcial

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 1.1 : Marca de operación automática activada

UM 24.0 : Este marca de salto a regulación de nivel

- Condiciones de salto a PB10 (Modulo de regulación de temperatura al 75% de la carga)

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 1.1 : Marca de operación automática activada

UNM 6.0 : No este la marca de iniciación de rutina de desconexión parcial

UM 24.2: Marca de salto a bajar al 75% de la carga activada

- Condiciones de salto a PB11 (Modulo de regulación de temperatura al 50% de la carga)

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 1.1 : Marca de operación automática activada

UNM 6.0 : No este la marca de iniciación de rutina de desconexión parcial

UM 24.3: Marca de salto a bajar al 50% de la carga activada

- Condiciones de salto a PB12 (Modulo de regulación de temperatura al 25% de la carga)

UM 1.0 : Marca de start activada

UM 1.1 : Marca de operación automática activada

8UNM 6.0 : No este la marca de iniciación de rutina de desconexión parcial

UM 24.4: Marca de salto a bajar al 25% de la carga activada

9.4 DESCRIPCION DEL PROGRAMA

A continuación se presenta la descripción del programa desarrollándola modulo por modulo.

OB 1: MODULO DE ORGANIZACIÓN

Este es él modulo de organización del programa y es en este donde se realizan los diferentes saltos o llamadas hacia las diferentes etapas del proceso, según lo demanden las condiciones operativas de este.

En este modulo se evalúan mediante combinaciones digitales el estado lógico de las diferentes condiciones de entrada y de salidas intermedias (marcas) dependiendo de las cuales se realizan saltos condicionales (SPB) hacia la etapa que debe ser ejecutada según el proceso de generación.

También se realizan saltos incondicionales (SPA) hacia los módulos de comparación (PB 14), modulo de alarmas (PB 17) y modulo de lectura de posición de alabes (PB 18) Además de los saltos, es en este modulo donde se realiza el arranque del sistema mediante la activación de la entrada E 0.3 (start) .

Los módulos hacia los cuales se realizan saltos desde él modulo de organización son los siguientes:

PB1 : Modulo de preparación para arranque del sistema
PB2 : Modulo de apertura inicial
PB3 : Modulo de sincronia-conexión
PB4 : Modulo Plena Carga-operación
PB5 : Modulo de desconexión total
PB6 : Modulo de cierre total
PB7 : Modulo de desconexión parcial
PB8 : Modulo de control de nivel
PB9 : Modulo de regulación de temperatura al 75% de la carga
PB10 : Modulo de regulación de temperatura al 50% de la carga
PB11 : Modulo de regulación de temperatura al 25% de la carga
PB14 : Modulo de comparación
PB17 : Modulo de alarmas
PB18 : Modulo de lectura de posición de alabes.

El listado de instrucciones correspondiente a OB1 es el siguiente:

SPA PB 14 (Salto incondicional a modulo de comparación de variables)
SPA PB 17 (Salto incondicional a modulo de alarmas)
SPA PB 18 (Salto incondicional a modulo de lectura de posición de alabes)
UNE 0.5
R A 5.4
S M 6.2
R M 6.1
UE 0.2
UNM 19.3
= M 1.1
UNE 0.2
R A 5.1
R M 6.3
R M 1.0
R A 5.0
UE 0.3 (evaluación de señal de start)

SPB PB19 (Salto condicional a modulo de reset de marcas)

UM 1.0

UNE 0.0 (evaluación de señal de paro)

SM 6.3 (set marca de paro)

UE 0.3

UNE 0.1

UE0.0

UE 0.5

UE 0.22

UNE 0.4

UNM 20.0

S M 1.0 (set de marca de start)

UM 1.0

UM 1.1

UE 1.2

UNM 1.3

SPB PB1 (Salto condicional a modulo de preparación para el arranque)

UNE 1.2

UNM 3.6

UNE 0.42

UNE 1.3

UNM 2.7

UM 1.1

UNM 20.0

UM 1.0

UNM 6.02

UE 0.5

SPB PB2 (Salto condicional a modulo de apertura inicial)

UNM 3.6

UNM 3.5

UNE 0.4

UM 2.7

= M 17.2

UNM 3.5

UM 1.0

UE 0.6

UE 0.7

= M 17.3

UNM 20.0

UM 1.0

UE 0.0

UM 1.1

UE 0.5

U(

OM 17.2

OM 17.3

OM 6.1

)

SPB PB3 (Salto condicional a modulo de sincronia-conexión)

UM 1.1

UE 0.5

UM 3.5

UNM 20.0

UM 1.0

UNM 23.7

UNM 8.5

UE 0.4

SPB PB4 (Salto condicional a modulo de plena carga-operación)

UM 19.3

UM 1.0

UE 0.22

UE 0.4

SPB PB5 (Salto condicional a modulo de desconexión)

UM 1.0

UE 0.2

UNE 0.4

UM 19.3

SPB PB6 (Salto condicional a modulo de cierre total)

UM 6.2

UNM 6.1

UM 1.0

UM 1.1

SPB PB7 (Salto condicional a modulo de desconexión parcial)

UNM 6.0

UM 1.1

U(

OM 24.0

OM 24.1

)

SPB PB8 (Salto condicional a modulo de regulación de nivel)

UNM 6.0

UM 1.0

UM 1.1

UM 24.2

SPB PB10 (Salto condicional a modulo de regulación de temperatura al 75%)

UM 1.0

UNM 6.0

UM 24.3

SPB PB11(Salto condicional a modulo de regulación de temperatura al 50%)

UM 1.0

UM 1.1

UNM 6.0

UM 24.4

SPB PB12 (Salto condicional a modulo de regulación de temperatura al 25%)

BE

PB1 : MODULO DE PREPARACION PARA EL ARRANQUE DEL SISTEMA

En este modulo se realizan las rutinas de preparación necesarias para arrancar el sistema como lo son: activación de Electrovalvulas de enfriamiento y bomba de aceite mediante la configuración de las salidas digitales A 5.5 y A 7.1 respectivamente.

Inicialmente se ejecuta la activación de las salidas A5.5 y A7.1 las cuales accionan los dispositivos de lubricación del sistema. Luego de configurar las salidas anteriores se procede a activar el temporizador T1 el cual proporciona el tiempo necesario para que el agua circule por las tuberías de enfriamiento (25 seg.) y se detecte el flujo de agua por medio de la entrada E 1.2 (al detectar flujo se pone a cero).

Al activarse la entrada E 1.2 se configura la marca M 1.3 la cual indica que se ha ejecutado completamente la rutina del modulo y que existe flujo de agua de enfriamiento, por lo tanto se puede pasar a la siguiente etapa.

El listado de instrucciones correspondiente a PB1 es el siguiente:

S A 5.5 (activación de electrovalvulas de tubería de enfriamiento)

S A 7.1 (activación de bomba de aceite)

UE 1.2

UNM 1.2

LKT 250.12

SV T1

UT1

S M 1.2

UM 1.2

UN T1

UNE 1.2 (evaluación de entrada de flujo de agua)

S M 1.3

BE

PB2 : MODULO DE APERTURA INICIAL

En este modulo se lleva a cabo la apertura de los alabes del distribuidor de forma continua, hasta un valor de apertura de 1.6 cm (Xi) el cual se carga en forma de constante en el programa mediante las instrucciones de comparación.

Inicialmente se verifica si los alabes están completamente cerrados chequeando la entrada E 1.6. Si esta condición se cumple, se procede a activar la salida de apertura del distribuidor (A 5.0).

Luego de haber activado A 5.0 se procede a la comparación entre el valor de la lectura del potenciómetro (MW 80) y el valor de apertura Xi de 1.6cm el cual se encuentra cargado como constante. Al ser estos 2 valores iguales se pone en 1 la marca M 2.2 y se resetea la salida A 5.0 deteniendo la apertura del distribuidor.

Habiendo sido realizadas las rutinas anteriores se activa el temporizador T2 el cual da el tiempo necesario para que se establezca la velocidad del eje de la turbina y se pueda proseguir con el proceso.

El listado de instrucciones correspondientes a PB2 es el siguiente:

RM 6.0

RM 3.5

UNM 2.0

R A 5.1

R A 5.0

S M 2.0

UE 1.6

= M 2.1

UNM 2.7

UM 2.1

S A 5.0 (activación de apertura de alabes)

U A 5.0

S M 2.6

LMW 80

LKF +160

> = F

= M 2.2 (indicador de que se ha llegado a la apertura inicial (Xi))

OM 2.2
 R A 5.0 (Desactivación de apertura de alabes)
 S M 2.3
 S M 2.4
 U M 2.3
 LKT 60.2
 SV T2
 U T2
 = M 2.5
 UNM 2.5
 R M 2.3
 UM 2.6
 UNM 2.5
 UNE 0.4
 UM 2.4
 S M 2.7 (habilitación de marca de paso para saltar al modulo de sincronía conexión)
 BE

PB 3 : MODULO DE SINCRONIA -CONEXIÓN

En este modulo se realizan aperturas pausadas del distribuidor en deltas de apertura de 0.2cm, con el fin de llevar la velocidad del eje turbina generador hasta 720 r.p.m. y poder realizar la conexión del generador a la red de distribución.

Esta rutina realiza un salto condicional hacia un modulo de incremento (PB 19) el cual suma el valor constante 20 (equivalente a 0.2cm de apertura del distribuidor) al valor de lectura actual del potenciómetro y guarda el resultado en la palabra de marca MW 82. Una vez realizado el incremento se activa la salida de apertura de los alabes del distribuidor A 5.0 y se mantiene comparando el valor del potenciómetro MW80 con el valor guardado en MW82, al ser iguales estos valores, se resetea la salida A5.0 y se activa el temporizador T3 el cual da el tiempo de estabilización de velocidad para aperturas de 0.2cm. Durante toda la ejecución de la rutina el sistema se mantiene chequeando el valor de la velocidad, si esta no ha llegado a 720r.pm. se procede

nuevamente a ejecutar los procedimientos anteriores hasta llegar al valor de velocidad de sincronismo.

Al detectar el P.L.C. las 720 r.p.m. (al ocurrir la combinación AND entre las entradas E 0.6 y E 0.7) se activa la salida A 5.4 la cual activa el contactor principal del sistema y se realiza la conexión entre el generador y la red de distribución.

El listado de instrucciones correspondiente a PB3 es el siguiente:

R M 2.0

UNM 3.0

R A 5.0

R A 5.1

R M 3.5

S M 3.0

UE 0.6

UE 0.7

RM 6.2

RM 6.1

RM 6.0

S A 5.4 (Conexión del generador a la red)

UNE 0.4

UNT3

UNM 3.1

SPB PB19 (Salto condicional a modulo de incremento)

UM 3.1

UNE 0.4

UNM 3.3

UNM 3.6

S A 5.0 (Habilitación de apertura de alabes)

LMW 802

LMW 82

> = F

= M 3.2 (indicador de desplazamiento de 0.2cm en el distribuidor)

UM 3.2

R M 3.1

OM 3.6

OA 5.4

OM 3.2

R A 5.0 (Deshabilitación de apertura de alabes)

UNE 0.4

UM 3.2

LKT 30.2

SV T3 (activación de tiempo de estabilización de velocidad)

U T3

S M 3.3

UNM 3.4

UE 0.4

LKT 030.2

SV T4

UNT4

UE 0.4

SM 3.4

UM 3.4

UN T3

R M 3.3

S M 3.5 (Indicador de conexión del generador a la red)

R M 4.0

LMW 80

LKF 1100

! = F

= M 3.6

UA 5.4

LKT 010.2

SVT5

BE

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 19 es el que se presenta a continuación :

LMW 80

LKF +20

+F

TMW 82

S M 3.1

R M 3.3

BE

PB4 : MODULO DE PLENA CARGA-OPERACIÓN

En este modulo se realiza la rutina de toma de carga hasta lograr la máxima potencia que el sistema pueda generar según las condiciones operativas del proceso.

Esta rutina inicialmente realiza un salto condicional hacia un modulo de incremento (PB19) el cual adiciona el valor de una constante al valor tomado en la lectura del potenciómetro y el resultado es almacenado en la palabra de marca MW82.

Luego de haber realizado el incremento se activa la salida de apertura de alabes A5.0 y se compara el valor de lectura del potenciómetro con el valor almacenado en la palabra de marca MW82, al detectar que ambos valores son iguales se activa la marca M 4.1 y se resetea la salida A5.0 . Realizada esta acción se activa el temporizador T7 el cual da el tiempo de espera necesario entre cada apertura.

Esta rutina se repite hasta detectarse cualquiera de las condiciones OR siguientes :

- Al activarse la entrada de señal de plena carga E 0.1
- Al producirse el nivel mínimo de operación en la cámara de carga (M 18.2)

Al presentarse cualquiera de estas condiciones se finaliza la rutina de toma de carga activándose la marca M 4.3 la cual indica que el sistema se encuentra en la rutina de operación, monitoreando las condiciones de las variables de entrada.

El listado de instrucciones correspondiente al PB4 es el siguiente:

R M 3.0

R M 7.0

UNM 4.0

R A 5.0

R A 5.1

R M 3.1

R M 3.3

UN M 4.0

LKT 050.1

SV T6

U T6

S M 4.0

UNM 3.1

UN T6

UN T7

UNM 4.2

SPB PB 19 (Salto condicional a modulo de incremento)

UM 3.1

UNM 4.2

UNM 4.3

UNM 3.3

S A 5.0 (Activación de apertura de alabes)

LMW 80

LMW 82

> = F

= M 4.1

UM 4.1

R M 3.1

LMW 80

LKF 1100

> = F

= M 4.2

UM 4.2

S M 4.4 (Indicador de apertura máxima)

OM 4.2

OE 0.1

OM 18.2
 OM 20.0
 OM 4.1
 = M 4.3 (Indicador de potencia de plena carga)
 UM 4.3
 R A 5.0 (Detener apertura de alabes)
 U M 4.1
 UN T6
 UNM 4.2
 LKT 003.3
 SV T7
 U T7
 S M 3.3
 BE

PB5 : MODULO DE DESCONEXION

Este modulo opera al ocurrir alguna alarma critica durante la ejecución del proceso. En esta rutina se realiza el cierre de los alabes del distribuidor de forma continua hasta un valor de apertura en el cual no se corra el riesgo de sobreacelerar la turbina y se procede luego a la desconexión del contactor principal (se resetea la salda A5.4).

Inicialmente se activa la salida de cierre del distribuidor A 5.1 luego se compara la lectura del potenciómetro (MW 80) con el valor de apertura seteada (2.5cm) , al ser estos 2 valores iguales se activa la marca M 5.1 y se resetean las salidas de cierre de alabes A 5.1 y la de conexión del contactor principal A 5.4.

El listado de instrucciones correspondiente a PB 5 es el siguiente:

UN M 5.0
 R A 5.1
 R A 5.0
 UN M 5.0
 LKT 5.2

SV T8
U T8
S M 5.0
UM 5.0
UN T8
UNM 5.1
S A 5.1 (Activación de cierre de alabes)
LMW 80
LKF 250
< = F
= M 5.1 (Indicador de apertura de desconexión)
UM 5.1
UM 19.3
R A 5.1 (Desactivación de cierre de alabes)
UN T8
UM 5.1
R A 5.4 (Desconexión del contactor principal)
BE

PB6 : MODULO DE CIERRE TOTAL DE ALABES

Este modulo se ejecuta después de la rutina de desconexión total (PB 5) y es acá donde se realiza el cierre total de los alabes del distribuidor y el reseteo de las marcas de operación.

Inicialmente se configura la salida de cierre de alabes A 5.1 con lo cual se produce el cierre de los alabes de forma continua, a la vez que el PLC se mantiene consultando el estado de la entrada E 1.1. Al producirse la activación de la entrada E 1.1 esta indica que los alabes están cerrados por completo y se procede a resetear la salida A 5.1 y la marca de activación del sistema M 1.0 desactivando el sistema completamente.

El listado de instrucciones correspondiente al PB6 es el siguiente:

UNM 5.2

R A 5.1

R A 5.0

UN M 5.2

LKT 003.2

SV T9

S M 5.2

U E 1.1

UN T9

S A 5.1 (Activar cierre de alabes)

UN T9

UNE 1.1

= M 5.3 (indicador de alabes completamente cerrados)

R M 6.3

R M 1.0

R A 5.1 (Desactivar cierre de alabes)

BE

PB7 : MODULO DE DESCONEXION PARCIAL

Esta rutina entra en funcionamiento al detectarse la ausencia de voltaje en la red de distribución a la que se encuentra conectado el sistema.

En este modulo se realiza la desconexión del contactor principal luego se procede al cierre completo de los alabes y se espera hasta que se normalice el voltaje en la red de distribución.

Inicialmente se resetea la salida A 5.4 con lo cual se desconecta el contactor principal, habiendo realizado la rutina anterior se activa la salida de cierre de alabes A 5.1 y se resetea al detectar la señal de entrada de alabes completamente cerrados E 1.1 .

Al detectar que los alabes se encuentran completamente cerrados se activa el temporizador T11 el cual proporciona el tiempo de espera mínimo al reactiva el sistema nuevamente al normalizarse el voltaje.

Al detectarse la presencia de voltaje E 0.5 se procede a configurar la marca M 6.1 la cual indica al PLC que regresó el voltaje de la red y que se va a proceder a sincronizar nuevamente.

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 7 es el que se presenta a continuación :

R M 3.0

UNM 6.0

R A 5.1

R A 5.0

R A 5.4 (Desconexión del contactor principal)

UNM 6.0

LKT 001.2

SV T10

U T10

S M 6.0

UM 6.0

UN T10

UN T11

U E 1.1

S A 5.1 (cerrar alabes)

UN E1.1 (Evaluación de alabes completamente cerrados)

R A 5.1 (Detener cierre de alabes)

UN T10

UNE 1.1

UE 0.5 (

LKT 300.2

SV T11

UN T11

UNE 1.1

UE 0.5 (Evaluación de señal de voltaje de red)

S M 6.1 (Activación de ruina de resincronización)

R M 6.2

R M 4.0

R M 6.0

BE

PB8 : MODULO DE CONTROL DE NIVEL

Este modulo entra en acción al detectarse durante la operación del proceso la alarma de control de nivel (M 18.2).

Al ser detectado el rango de regulación de nivel (M 18.2) se realiza un salto condicional hacia el modulo de regulación proporcional PB9, en el cual se realiza el calculo del valor donde deben de cerrarse los alabes del distribuidor para corregir el error en el nivel de la cámara de carga. Este valor de corrección es almacenado en la palabra de marca MW 84.

Luego de calcular el valor de corrección se activa la salida de cierre de alabes A 5.1 y se compara el valor de lectura del potenciómetro con la palabra de marca MW 84, al detectar que son iguales, se resetea la salida de cierre de alabes A 5.1 y se activa el temporizador T13 el cual proporciona la constante de tiempo de estabilización del nivel. Si terminada la temporización de T13 no se corrige el error, se procede a repetir la rutina anterior hasta que el nivel suba al rango de operación (M 18.1) o hasta que se llegue al 25% de la apertura máxima.

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 8 es el que se presenta a continuación:

UNM 7.0

R M 3.1

R A 5.0

R A 5.1

R M 7.2

R M 7.1

UNM 7.0

LKT 030.1

SV T12

U T12

S M 7.0

UM 7.0

UN T12

UNM 7.4

UM 18.2 (Evaluación de marca de alarma de regulación de nivel)

UNM 18.3 (evaluación de marca de alarma de nivel crítico)

UN T13

UNM 7.1 (Marca habilitadora para salto a modulo de regulación proporcional)

SPB PB9 (Salto condicional a modulo de regulación proporcional)

UNM 7.1

UNM 7.2

UM 18.2

S A 5.1 (Activación de cierre de alabes)

LMW 80

LMW 84

< = F

= M 7.3

UM 7.3

R M 7.1

OM 7.3

OM 7.4

R A 5.1 (Desactivación de cierre de alabes)

UN T12

UN T13

UM 7.3

LKT 20.2

SV T13

U T138

S M 7.2

LMW 80

LKF 250

< = F

= M 7.4

BE

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 9 es el que se presenta a continuación:

LKF 2050
LMW 70
-F
TMW 32
LKF 14
TMW 34
SPA FB 242
NAME : MUL : 16
Z1 MW32
Z2 MW34
Z3 = 0 M 7.5
Z32 : MW36
Z31 : MW38
LMW 38
LKF 16
+ F8
TMW 40
LMW 80
LMW 40
-F
TMW 84
S M 7.1
R M 7.3
BE

PB 10, PB11, PB12 : MODULOS DE REGULACION DE TEMPERATURA

En estos módulos se realiza el control de temperatura tanto en turbina y chumaceras mediante el cierre en forma pausada, de los alabes del distribuidor, hasta un valor de

carga en el cual no siga aumentando la temperatura, el valor de carga al cual se cierran los alabes depende del valor de sobrettemperatura detectada.

Al detectarse cualquier marca de alarma de temperatura se realiza un salto condicional al modulo de decremento (PB13) en el cual se le resta un valor constante al valor de lectura del potenciómetro, guardando el resultado en la palabra de marca MW 42, activando luego la salida de cierre de alabes A 5.1

A continuación el PLC procede a comparar el valor de lectura del potenciómetro con el valor almacenado en la palabra de marca MW 42 , al detectar que estos valores son iguales se resetea la salida A 5.1 y se activa un temporizador de espera.

Esta rutina se repite hasta llegar al valor de carga establecido, según la alarma de temperatura que se encuentre activada.

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 10 es el que se presenta a continuación:

R M 7.0

UNM 8.2

R A 5.0

R A 5.1

R M 8.0

R M 8.1

R M 4.0

UNM 8.2

LKT 030.1

SV T14

U T14

SM 8.2

UN M 8.4

UN T14

UN T15

U M 22.3 (Evaluación de marca de alarma de regulación de temperatura al 75%)

UN M 8.3

UN M 8.0

SPB PB13 (Salto condicional hacia modulo de decremento)

UNM 8.1

UM 8.0

UM 22.3

UNM 8.4

S A 5.1 (Habilitar cierre de alabes)

LMW 80

LMW 42

< = F

= M 8.3

LMW 80

LKF 800

< = F

= M 8.4 (indicador de que se llevo al valor del 75% de carga)

OM 8.3

OM 8.4

R M 8.0

R A 5.1 (Detener cierre de alabes)

UN T14

UN T15

UM 8.4

S M 8.5

UN T14

UN T15

U(

OM 8.3

OM 8.4

)

LKT 050.12

SV T15

U T15

S M 8.1

BE

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 11 es el que se presenta a continuación :

R M 7.0

UNM 8.6

R A 5.0

R A 5.1

R M 8.0

R M 8.1

R M 4.0

UNM 8.6

LKT 030.1

SV T16

U T16

SM 8.6

U M 8.6

UN T16

UN T17

U M 22.5

UN M 9.0

UN M 8.0

SPB PB13

UNM 8.1

UM 8.0

UM 22.5

UNM 8.7

UNM 9.0

S A 5.1

LMW 80

LMW 42

< = F

= M 8.7

LMW 80

LKF 550

< = F

= M 9.0

OM 8.7

OM 9.0

R M 8.0

R A 5.1

UN T16

UN T17

UM 9.0

S M 9.1

UN T16

UN T172

U{

OM 8.7

OM 9.0

)2

LKT 050.1

SV T17

U T17

S M 8.1

BE

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 12 es el que se presenta a continuación :

R M 7.0

UNM 9.2

R A 5.0

R A 5.1

R M 8.0

R M 8.1

R M 4.0

UNM 9.2

LKT 030.1

SV T18
U T18
SM 9.2
U M 9.2
UN T18
UN T19
U M 22.7
UN M 9.4
UN M 8.0
SPB PB13
UNM 8.1
UM 8.0
UM 22.7
UNM 9.3
UNM 9.4
S A 5.1
LMW 80
LMW 42
< = F
= M 9.3
LMW 80
LK2F 350
< = F
= M 9.4
OM 9.3
OM 9.4
R M 8.0
R A 5.1
UN T18
UN T19
UM 9.4
S M 9.5
UN T18
UN T19

U(
 OM 9.3
 OM 9.4
)
 LKT 050.1
 SV T19
 U T19
 S M 8.1
 BE

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 13 es el que se presenta a continuación :

LMW 80
 LKF 50
 -F2
 TMW 42
 S M 8.0
 R M 8.1
 BE

PB 14, PB 15, PB 16 : MODULOS DE COMPARACION DE VARIABLES

En estos módulos se realizan las lecturas de los valores de las diferentes variables a monitorear durante el proceso como lo son: nivel en la cámara de carga y temperaturas en turbina y chumaceras, y se comparan con los diferentes puntos de consigna prefijados.

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 14 es el que se presenta a continuación:

SPA PB 18
 LMW 70
 L KF +2050

< = F

= M 10.0

U M 10.0

S M2 15.0

UN M 10.0

R M 15.0

SPA PB 20

LMW 70

LKF +2300

> F

= M 10.1

UM 10.1

S M 15.1

UNM 10.1

R M 15.1

SPA PB20

LMW 70

LKF +2450

> = F

= M 10.2

U M 10.2

S M 15.2

UN M 10.2

R M 15.2

SPA PB21

LMW 72

LKF 430

> F

= M 10.3

LMW 72

LKF 450

< F

= M 10.4

U M 10.3

U M 10.4
S M 15.3
UN M 10.3
R M 15.3
LMW 72
LKF 450
> = F
= M 10.5
LMW 72
LKF +470
< F
= M 10.6
U M 10.5
U M 10.6
S M 15.4
UN M 10.5
R M 15.4
LMW 72
LKF +470
> F
= M 10.7
LMW 72
LKF +510
< F
= M 11.0
UM 10.7
UM 11.0
SM 15.5
UNM 10.7
R M 15.5
LMW 72
LKF +510
> F
= M 11.1

LMW 72
LKF +530
< F
= M 11.2
UM 11.1
UM 11.2
S M 15.6
UNM 11.1
R M 15.6
LMW 72
LKF +530
> F
= M 9.6
U M 9.68
S M 15.7
UNM 9.6
R M 15.7
SPA PB 15
BE

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 15 es el que se presenta a continuación:

SPA PB22
LMW 74
LKF 400
> F
= M 11.3
LMW 74
LKF 430
< F
= M 11.4
U M 11.3
U M 11.4

S M 16.0
UN M 11.3
R M 16.0
LMW 74
LKF 430
> = F
= M 11.5
LMW 74
LKF +450
< F
= M 11.6
U M 11.5
U M 11.6
S M 16.1
UN M 11.5
R M 16.1
LMW 74
LKF +450
> F
= M 11.7
LMW 74
LKF +480
< F
= M 12.0
UM 11.7
UM 12.0
SM 16.2
UNM 11.7
R M 16.2
LMW 74
LKF +480
> F
= M 12.1
LMW 74

LKF +530

< F

= M 12.2

UM 12.1

UM 12.2

S M 16.3

UNM 12.1

R M 16.3

LMW 74

LKF +530

> F

= M 12.3

U M 12.3

S M 16.4

UNM 12.3

R M 16.4

SPA PB 16

BE

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 16 es el que se presenta a continuación :

SPA PB23

LMW 76

LKF 580

> F

= M 12.4

LMW 76

LKF 600

< F

= M 12.5

U M 12.4

U M 12.5

S M 16.5

UN M 12.4
R M 16.5
LMW 76
LKF 600
> = F
= M 12.6
LMW 76
LKF +650
< F
= M 12.7
U M 12.6
U M 12.7
S M 16.6
UN M 12.6
R M 16.6
LMW 76
LKF +650
> F8
= M 13.0
LMW 76
LKF +680
< F
= M 13.81
UM 13.0
UM 13.1
SM 16.7
UNM 13.0
R M 16.7
LMW 76
LKF +680
> F
= M 13.2
LMW 726
LKF +710

< F

= M 13.3

UM 13.2

UM 13.3

S M 17.0

UNM 13.2

R M 17.0

LMW 76

LKF +710

> F

= M 13.4

U M 13.4

S M 17.1

UNM 132.4

R M 17.21

BE

PB 17 : MODULO DE ALARMAS

En este módulo se realiza la activación o desactivación de las diferentes alarmas que pueden presentarse durante la ejecución del proceso.

El conjunto de instrucciones correspondiente al PB 17 es el que se presenta a continuación :

U M 15.0

UNM15.1

UNM 15.2

= M 18.0

UNM 15.0

UNM 15.1

UNM 15.2

= M 18.1

UNM 15.0

UM 15.1
UNM 15.2
= M 18.2
UNM 15.0
UM 15.1
UM 15.2
= M 18.3
OM 15.3
OM 16.0
OM 16.5
=M 22.0
UM 22.0
SM 22.1
UNM 22.0
RM 22.1
OM 15.4
OM 16.1
OM 16.6
= M 22.2
UM 22.2
S M 22.3
UNM 22.2
R M 22.3
OM 15.5
OM 16.2
OM 16.7
= M 22.4
UM 22.4
S M 22.5
UNM 22.4
R M 22.5
OM 15.6
OM 16.3
OM 17.0

=M 22.6
UM 22.6
S M 22.7
UNM 22.6
R M 22.7
OM 15.7
OM 16.4
OM 17.1
=M 23.0
UM 23.0
S M 23.13
UNM 2.0
R M 23.1
OM 22.3
OM 22.5
OM 22.7
OM 23.1
OE 1.2
ON E 0.0
= M 23.2
UM 23.2
S M 20.0
UN M 23.2
R M 20.0
UM 18.2
UM 22.3
UNM 22.5
UM 8.5
= M 23.3
UM 18.2
UM 22.5
UNM 22.7
UM 9.1
= M 23.4

UM 18.2
UM 22.7
UNM 23.1
UM 9.5
= M 23.5
OM 23.3
OM 23.4
OM 23.5
= M 24.0
OM 22.3
OM 22.5
OM 22.7
= M 23.6
UM 23.6
S M 23.7
UM 18.2
UNM 23.6
= M 24.1
UM 22.3
UNM 22.5
UNM 23.3
=M 24.2
UM 22.5
UNM 22.7
UNM 23.4
= M 24.3
UM 22.7
UNM23.1
UNM 23.5
= M 24.4
O M 23.1
OM 18.3
OE 1.3
O(

UE 0.4

UNE 1.4

UN T3

UN T4

UN T5

)

OE 1.5

OM 6.3

S M 19.3

BE

CAPITULO X

10.1 ANALISIS ECONOMICO

Una vez elegida la alternativa técnica para el presente proyecto, planteada en los capítulos anteriores : En los cuales se describen y justifican las soluciones y elementos necesarios para concretar nuestro objetivo, como conclusión se presenta el análisis de costos que consiste en determinar y distribuir los costos de la inversión física y de los de operación del proyecto, en términos totales y unitarios, a dos de las alternativas propuestas, en este caso el PLC SIMATIC S7 CPU-214 y GE-FANUC 90-30. Una vez situados en esta fase se observara desde un punto de vista económico, si la alternativa elegida es viable. La parte de un análisis económico pretende la determinación del monto de los recursos económicos necesarios para la realización del proyecto, y así otra serie de indicadores que sirven como base para la parte final, la evaluación económica.

10.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS.

Costo es una palabra muy utilizada, pero no definida con exactitud, debido a una amplia aplicación, pero se puede decir que es un desembolso en efectivo o en especie hecho en el pasado, presente, futuro o de forma virtual.

También sería importante señalar que la mayoría de evaluaciones a nivel contable no son tan rigurosas, lo cual se plasma al redondear cifras al millar mas cercano. Esto es debido , a que no hay que olvidarse que se trata de predecir lo que sucederá en el futuro, por ende no hay forma de efectuarlo, quedando claro que el redondeo de las cifras a miles no afecta en absoluto la evaluación económica y no se viola ningún principio contable, puesto que aquí no se trata de controlar las cifras del proyecto, pues sería como querer controlar con dicha rigurosidad el futuro, lo cual resulta ser imposible.

De forma general los costos se agrupan de la siguiente forma :

- **Costos de producción** : Los elementos que se enunciaran serán los comunes al presente proyecto :

- **Mano de obra directa** : Es la que influye directamente sobre las pruebas e instalación de los dispositivos del sistema de automatización.
- **Mano de obra indirecta** : Necesaria para la prueba e instalación de los dispositivos sensores y actuadores, pero que no interviene directamente en dicha acción, no obstante en el diseño y cálculo del sistema a implementar, acá se pueden incluir : Personal de supervisión, etc. Los 2 tipos de costo deben incluirse durante la implementación del proyecto (Automatización del proceso) incluyéndose además el costo de capacitación del personal por la adquisición de nueva tecnología.
- **Costo de insumos** : Todo proyecto productivo requiere de una serie de insumos para su funcionamiento, estos pueden ser agua, energía eléctrica, combustibles, transporte, adquisición de equipo especializado... etc. En el caso del proyecto de automatización en Sonsonate deberán de tomarse los gastos, combustible (necesario para la movilización en transporte), energía eléctrica (en el momento de las pruebas de sensores e instalación del sistema).
- **Costos de mantenimiento** : Servicio contabilizado por separado, se puede dar mantenimiento preventivo y correctivo al equipo y ala planta. El costo de materiales y mano de obra que se requieran se carga a mantenimiento. Para fines de evaluación, en general se considera un porcentaje del costo de adquisición de los equipos. Dato proporcionado por el fabricante y en el se especifica el alcance del servicio de mantenimiento que se proporcionara.
- **Costos de administración** :
Costos provenientes de realizar la función de administración de la empresa, durante la ejecución del proyecto.

■ **Costos de Financieros :**

Son los intereses que se deben de pagar en relación con capitales obtenidos en préstamo.

■ **Inversión total inicial :**

Sería la suma de todos los gastos de adquisición, transporte y montaje de los dispositivos de sensores, control, y aparatos exigidos por el proyecto para iniciar las operaciones de producción además de inversiones del tipo intangible como: Asistencia técnica o transferencia de tecnología, gastos preparativos y de instalación, estudios de ingeniería, capacitación del personal.

A efecto de calculo se ha dividido el sistema o el proyecto de automatización en los elementos que se han considerado mas importantes y comunes además de incluir los gastos de obra directa e indirecta :

• **CONTROLADOR LOGICO:**

PLC SIMATIC S7- CPU-214

• **MODULOS DIGITALES :**

■ **ENTRADA : Cantidad 2.**

Modelo : 8XDC24V 6ES5431-8MA11

■ **SALIDA : Cantidad 2.**

Modelo : 8XDC24V/0.5A 6ES5441'8MA11

■ **MODULOS ANALOGICOS :**

■ **ENTRADA : Cantidad : 1**

Modelo : 4X +4....20mA 6ES5464'8ME11

■ **ELEMENTOS SENSORES**

■ **Sonar Bero 3RG61 144. Cantidad : 1**

■ **Dispositivo evaluador : 3RX2 110. Cantidad : 1**

■ **Bero inductivo. Cantidad : 2**

■ **Controlador de sobre velocidad : SX2 DX. Cantidad : 1**

- PT100. Cantidad 3
- VIBRACON . Cantidad : 1
- Flujo de agua : Cantidad : 1
- AP 801-300 : Cantidad : 1
- 3SE31. Cantidad : 1
- R2 D13. Cantidad : 1
- EAC-8000 LINEBACKER. Cantidad : 1

■ ELEMENTOS ACTUADORES

■ SISTEMA DE INSTALACION ELECTRICO GENERAL

Todo lo anterior representa la inversión total y parte de mano de obra directa e indirecta.

■ INGENIERIA Y DIRECCION DE OBRA.

Esto queda representado dentro de los rubros de inversión total, mano de obra directa e indirecta y costos de administración.

Todos los elementos antes expuestos, pueden ser considerados de forma común a P.C.H, con las mismas características de generación eléctrica, por ende características de control similares. Desde este punto de vista los costos pudieran ser generalizados, en función de las características que influyen en la automatización : Numero de entradas digitales y analógicas, numero de salidas digitales, cantidad de variables o situaciones a controlar (lazos de control), potencia del generador, velocidades de sincronismo,...etc. Resultaría evidente que en cada elemento existirán otros factores como : Ventajas técnicas en manejo directo de elementos de potencia en A.C., programación en forma mas amigable a el operador, precio,.....etc. los cuales influyen en el coste en mayor o menor medida y no se tomarían en cuenta. Por tanto se considera que el coste de la automatización en la P.C.H de Sonsonate, enmarcaría una inversión real desde el criterio de diseño utilizado.

Cabe decir que el coste de las acciones de ingeniería y dirección de la obra dependerá del volumen del proyecto y su dificultad, esta radica en el sistema a controlar y por ende

la complejidad del programa a desarrollar. En el caso de Sonsonate las características de control son relativamente complejas, ya que se detecta la evidencia del control de nivel en la cámara de carga y temperatura de turbina y chumaceras, esto implica efectuar dicha regulación a través del programa (software), así como las implicaciones de acciones secuenciales en los distintos estados del proceso involucrándose acciones de función lógica, aritméticas en ambos casos, de temporización, y acciones de tomas de decisión, en fin estamos hablando de un programa no muy extenso, con la ocupación de un OB, y algunos PB, como muchos temporizadores y marcas, calculándose un tiempo estimado de desarrollo e implementación de aproximadamente un mes, en la mayoría de los casos se engloba el costo como de un 6% a 10% del costo total de la inversión, en este caso se pretende regirse por tal criterio además de considerar el tiempo invertido y la complejidad del programa.

10.2 CALCULO DE COSTES.

A continuación se enumeran en la tabla 10.1 los costos debidos a los elementos comunes en el sistema, como lo son los sensores y actuadores, los cuales deberán sumarse a los costos en la elección individual de un PLC (tabla 10.2 y 10.3), así de esta forma es posible apreciar la inversión a efectuar.

SENSORES Y ACTUADORES, Y DEMAS EQUIPO.				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	SONAR BERO JUNTO CON DISPOSITIVO EVALUADOR	1	3,100.00	3,100.00
2	SONAR BERO INDUCTIVO	2	875.00	1,750.00
3	TACOMETROS (MEDIDORES DE PULSO)	2	2,580.00	5,160.00
4	SENSORES DE TEMPERATURA	3	1,300.00	3,900.00
5	SENSOR DE NIVEL TIPO CAPACITIVO	1	4,500.00	4,500.00
6	SENSOR DE CAUDAL	1	3,100.00	3,100.00
7	SENSOR DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN RED ELECTRICA.	1	3,200.00	3,200.00
8	POTENCIOMETRO	1	1,945.00	1,945.00
9	FINAL DE CARRERA	1	875.00	875.00
10	CONTACTORES	6	350.00	2,100.00
11	BOMBA DE ACEITE	1	1,050.00	1,050.00
12	SERVOMOTOR	1	1,560.00	1,560.00
13	CONTACTOR DE TRANSFERENCIA	1	3,100.00	3,100.00
14	INDICADORES (ALARMAS)	3	1,000.00	3,000.00
15	SISTEMA DE INSTALACION ELECTRICO EN GENERAL	1	8,865.00	8,865.00
TOTAL				47,205.00

NOTA : La cantidades están en colones.

Tabla 10.1 Costos debido a sensores, actuadores y demas equipo.

PLC SIMATIC S7-200 SIEMENS CPU-214				
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Base de montaje de 10 SLOTS con CPU 214, con 8 entradas y 6 salidas discretas incorporadas 1.3 mseg/k INSTRUCCIONES	1	4,700.00	4,700.00
2	FUENTE DE ALIMENTACION 120/230VAC, 24 VDC out.	1	1,500.00	1,500.00
3	MODULO DE 8 ENTRADAS DISCRETAS TIPO RELE, 24VDC	2	2,000.00	4,000.00
4	MODULO DE 8 SALIDAS DISCRETAS, TIPO RELE, 2A	2	2,000.00	4,000.00
5	MODULO DE 8 ENTRADAS ANALOGICAS	1	2,750.00	2,750.00
6	Dotapanel TIPO TD200 para visualizacion y ajuste de parametros del proceso 2 lineas por pagina, 20 CARACTERES/LINEA	1	12,500.00	12,500.00
7	SENSORES Y ACTUADORES	1	47,205.00	47,205.00
TOTAL				76,655.00

NOTA: Las cantidades están en colones.

Tabla 10.2 Costo de alternativa PLC SIMATIC S7-200

PLC SERIE 90-30 GE FANUC				
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	BASE DE MONTAJE DE 10 SLOTS CON CPU, 0.6 mseg/k INSTRUCCIONES	1	4,850.00	4,850.00
2	SOFTWARE	1	10,000.00	10,000.00
3	MODULO DE 16 ENTRADAS DISCRETAS 120 VAC	1	2,450.00	2,450.00
4	MODULO DE 16 SALIDAS DISCRETAS TIPO RELE, 2A	1	2,225.00	2,225.00
5	MODULO PARA CONEXIÓN A TERMOCOPLAS, 8 CANALES DE MEDICION	1	7,420.00	7,420.00
6	DATA PANEL TIPO K PARA VISUALIZACION Y AJUSTE DE PARAMETROS DEL PROCESO, 100 PAGINAS DE INFORMACION, 6 LINEAS DE 42 CARACTERES POR PAGINA	1	10,500.00	10,500.00
7	MODULO DE ENTRADA DE 4 CANALES ANALOGICOS VOLT-CORRIENTE PARA MEDICION DE POSICION DEL EJE Y NIVEL DE AGUA	1	4,500.00	4,500.00
8	SENSORES Y ACTUADORES	1	47,205.00	47,205.00
TOTAL				89,150.00

NOTA: Las cantidades están en colones.

Tabla 10.3 . Costo alternativa PLC GE-FANUC 90-30

Como podrá observarse el PLC Simatic presenta un precio relativamente bajo, que es compensado con la versatilidad de programación de el PLC GE-FANUC que en la mayoría de los casos es en programación que se elevan los costos en este tipo de inversiones.

CONCLUSIONES

- Una de las soluciones más inmediata y clara, para la modernización de una planta en explotación o no, es posible mediante la instrumentación y control del proceso, es decir; realizar la modernización a través de la sustitución puntual o global, transformación o sustitución total del equipo de instrumentación y control.
- La generación hidroeléctrica a pequeña escala es una de las formas de producir energía eléctrica más económicas y que menor daño produce al medio ambiente, debido a esto, actualmente las tendencias apuntan a la reactivación de este tipo de centrales, como una solución alternativa a la crisis energética actual. Para justificar dicha reactivación las centrales deben ser rentables económicamente, ante tal situación se plantea como alternativa de solución la automatización de estas; con lo cual se garantiza minimizar los costos de operación de las centrales, optimizar la generación de energía aprovechando al máximo los recursos existentes y reducir las fallas y daños en la maquinaria, asegurando la factibilidad de inversión en tales sistemas. A su vez su implementación y desarrollo, resulta factible ya que en dicha área se cuenta con estudios realizados, tecnología adecuada para su implementación, y una cantidad considerable de recurso natural (el agua) aun no explotado.
- Las pequeñas centrales hidroeléctricas de "Hilo de agua" son implementadas a corto plazo, al no poseer embalse de acumulación, a su vez no provee de un gran impacto negativo hacia el medio ambiente. Son a la vez insensibles a variaciones de carga en la red de distribución comercial, por tanto es necesario un gobernador menos costoso y con la implementación de un sistema de control no muy complejo ; desde este punto de vista son aptas para la automatización, además de funcionar como soporte a la red eléctrica nacional.
- El proceso de generación de una central hidroeléctrica con generador asincrónico consta de las siguientes fases: Etapa de arranque de el sistema, etapa de sincronización, conexión a la red, etapa de plena carga y operación.

- La generación hidroeléctrica asincrónica, presenta regulación y vigilancia de las distintas variables involucradas de una forma no muy compleja, en cuanto a la sincronización del sistema, así debido a la naturaleza de el proceso que involucra la generación hidroeléctrica en una P.C.H. tipo asincrónica los tipos de control a utilizar para el diseño de el Control Automático serán tanto de Control por Orden de los Eventos (control secuencial), como también Control de Variables Físicas. Es por ello que la factibilidad de realizar el diseño de este sistema es viable ya que se cuenta con los conocimientos suficientes sobre estos temas.
- El controlador ideal para automatizar este tipo de procesos es el Autómata Programable (P.L.C) debido a su versatilidad en cualquier tipo de aplicación industrial y demás características.
- De acuerdo a la operación de una P.C.H. las variables a controlar para automatizar tal sistema son: Nivel en cámara de carga, velocidad en el grupo turbina - generador, temperaturas en turbina y apertura de los alabes en el distribuidor.
- El control de velocidad en el eje del generador asincrónico, es económico y muy poco complicado, ya que solo basta alcanzar y registrar una velocidad angular de dicho eje, ligeramente superior o igual a la velocidad de sincronismo del sistema para asegurar la generación de energía eléctrica.
- El tipo de señal analógica que se sugiere para los sensores, adecuadores de señal y entradas analógica en el diseño es de lazo de corriente de 4...20mA, debido a que el PLC puede detectar cuando este lazo es interrumpido, evitando la posibilidad de generar respuesta de control erróneos.
- El modelo de P.L.C. en el cual se basará el diseño es el P.L.C. SIMATIC S5 103U por las razones anteriormente expuestas además de que cumple con los requerimientos mínimos del diseño, aunque el PLC ideal para el diseño es el GE

FANUC 90-30 CPU 314, debido a su flexibilidad de hardware y en lenguajes de programación, y además de soportar en su programación los cálculos lógicos y matemáticos de las acciones de control.

- El programa de usuario se diseño en base a un modulo de organización desde el cual se realiza las llamadas a los módulos de programa a los cuales fuero asignados las rutinas de control de cada una de las etapas del proceso.

ANEXO A

ASPECTO MEDIOAMBIENTAL.

La automatización del proceso de generación de energía eléctrica de la pequeña central hidroeléctrica (P.C.H) de Sonsonate, pretende la rehabilitación de la misma, bajo el concepto de la automatización del proceso de generación, incentivando así a la modificación de muchas P.C.H en existencia e instalación de nuevas. Todo proyecto de generación de energía eléctrica afecta o beneficia al medio ambiente que lo rodea. Es por ello que deberá de tomarse en cuenta algún plan en función del mismo, ya que como personas que fomentan tales proyectos bajo la automatización, se deben proveer de reglamentos y procedimientos para disminuir el impacto ambiental de los mismos, con fines ecológicos y conforme a las leyes que rigen tal situación.

A continuación se describen los pasos antes enunciados de evaluación a seguir para proveerse de un plan en función del medioambiente. Siendo útil distinguir 4 estados cualitativos de la instalación, ósea identificar :

1. Estado preoperacional : o punto cero, con 2 momentos diferentes sobre todo el medio social :
 - Sin la existencia (o conocimiento por parte del entorno del proyecto)
 - Con la existencia del proyecto (en fase de borrador y diseño) y conocimiento de esta existencia por parte del entorno.
2. Estado o fase de construcción: Supone conocer las modificaciones que va a sufrir el entorno con motivo de las obras.
3. Fase de explotación : Supone captar la incidencia en el entorno durante la vida de la instalación, como consecuencia de su funcionamiento y explotación.
4. Agotada Vida útil: Estado del entorno una vez dada tal situación.

Como es de saber, que la P.C.H de Sonsonate ya automatizada se ubica en P.C.H en su fase de explotación. A continuación se presentan las fases de estudio en general del impacto ambiental, en la fig. (A.1) se presenta dicho diagrama de bloques y en el se pueden identificar las funciones o pretensiones de la evaluación.

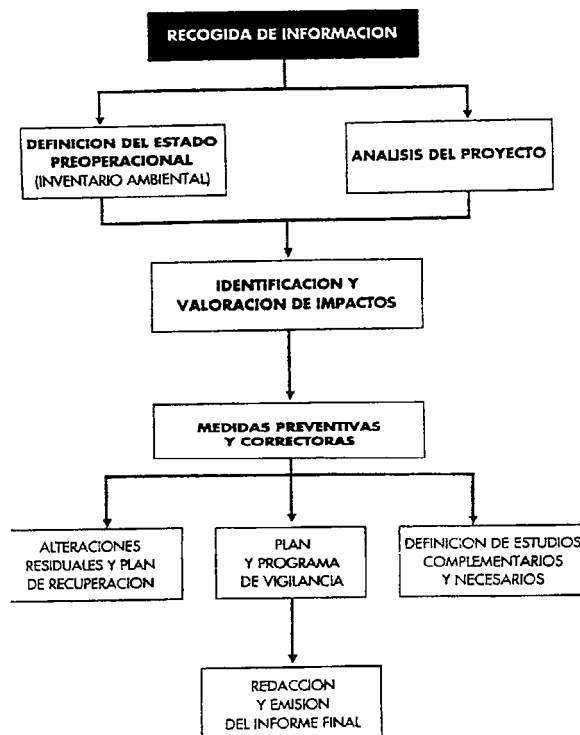


Figura A.1

A continuación se explican en detalle los contenidos y función de cada uno de los elementos presentados en la gráfica.

A.1 INVENTARIO AMBIENTAL.

Objetivo ; caracterizar el entorno, en el cual esta situado el proyecto, para ello : Inventariar los elementos básicos del medio ambiente, describiéndolos y considerando la repercusión que sobre ellos tengan los posibles efectos que pueda producir el proyecto.

El grado y detalle del análisis de los factores ambientales dependerá de las necesidades que se deriven del entorno donde se actúa y del tipo de proyecto. Los factores ambientales se consideran en el siguiente cuadro. (Tabla A.1)

FACTORES AMBIENTALES BASICOS

MEDIO FISICO	
MEDIO INERTE	
CLIMA	CARACTERISTICA BIOCLIMATICA, PARAMETROS
CALIDAD DE AIRE	COMPONENTES, PRESENCIA DE EMISIONES
GEOLOGIA	LITOLOGIA, RIESGOS GEOLOGICOS, ESTABILIDAD
GEOMORFOLOGIA	UNIDADES MORFOLOGICAS, PENDIENTES.
HIDROLOGIA SUP.	REGIMEN DE CURSOS, CALIDAD AGUA SUPERFICIAL.
HIDROGEOLOGIA	REGIMEN HIDRICO SUBSUELO, CALIDAD DE AGUA SUBTERRANEA
MEDIO BIOTICO	
EDAFOLOGIA	CALIDAD DE SUELOS, EROSIONALIDAD
VEGETACION	ESPECIES DE INTERES, FORMACIONES.
FAUNA	ESPECIES DE INTERES, HABITATS
ECOSISTEMAS	TIPOS DE SISTEMAS, AREAS DE INTERES
MEDIO HUMANO O SOCIOECONOMICO	
CALIDAD DE VIDA	CONDICIONES AMBIENTALES DE LA CALIDAD DE VIDA
REACCION SOCIAL	GRUPO DE OPINION
SOCIOECONOMIA	DEMOGRAFIA, ESPECIALIZACION ECONOMICA, EMPLEO
APROV. RECURSOS	USOS PRODUCTIVOS DEL SUELO, MINERIA, OCIO, AGUA
PATRIMONIO	LUGARES DE INTERES NATURAL, ARQUEOLOGICO, HISTORICO
RUIDO	
RUIDO	NIVEL DE RUIDO

Tabla A.1

A.2 ANALISIS DEL PROYECTO.

Este análisis identificara las posibles causas de impacto que se pueden producir ya sea en la fase de construcción y explotación del proyecto.

Parámetros básicos de p.c.h's a identificar :

- Objetivos de la P.C.H

- Presencia de otras minicentrales en el tramo del río.
- Potencia instalada
- Caudales mínimos de equipamiento y servidumbre
- Azus o presa prevista
- Cámara de carga características
- Edificios : Tipología constructiva
- Presencia del canal de desagüe
- Epocas de explotación prevista.

A.3 IDENTIFICACION Y VALORIZACION DE IMPACTOS.

Identificar posibles impactos que se puedan producir y valorar o considerar la gravedad que tendría cada operación ambiental de acuerdo a distintos criterios.

A. IDENTIFICACION DE IMPACTOS

ALTERACION DURANTE LA FASE DE CONSTRUCCION.

- Pérdidas de suelos y erosión provocada por las diversas obras civiles.
- Destrucción de vegetación debida a las distintas obras, pistas de acceso y tendido eléctrico.
- Desaparición de especies o comunidades animales en la zona, por degradación o destrucción de su hábitat.
- Efectos sobre la calidad y cantidad de agua y fauna acuática, por la desviación de caudales y construcción de la presa o azud.

ALTERACIONES DURANTE LA EXPLOTACION.

- Erosión hídrica a la salida de las aguas turbinadas y erosión remontaste.
- Inmersión de suelos y vegetación.
- Detracción de caudales y efectos sobre la calidad de aguas por embalsamiento, descarga temporal de limos y disminución de la capacidad de dilucion del tramo del río afectado.

- Desaparición o cambio poblacional de las comunidades de anfibios, peces y distintas especies de fauna acuática por la detración de caudales, cambios en la calidad de aguas y creación de la lamina de agua.
- Posible desaparición de lugares de reposo y/o reproducción de especies animales.
- Impacto de aves en el tendido eléctrico.
- Efectos de barrera para especies piscícolas emigrantes o con movimientos locales debido a la presencia de la presa o azud y a la detración de caudal.
- Cambios en las vías de acceso, bien peatonales (caminos, sendas, etc.) bien para vehículos (pistas, principalmente)
- Destrucción de la productividad agropecuaria en la zona embalsada
- Cambios en los usos recreativos del agua (bañismo, canoas, pesca, etc.)
- Detración de caudales aprovechables para otros usos.
- Perdida de zonas de interés naturalístico, paisajístico y arqueológico.
- Aumento del nivel sonoro y su efecto sobre poblaciones cercanas o sobre la población estacional

Al termino de estas secciones hemos identificado los factores ambientales que puedan sufrir algún impacto, los cuales ya han sido identificados según las fases en las cuales se encuentre la minicentral. A continuación necesitamos luego de haber hecho la identificación antes descrita, predecir o calcular hasta que grado existe tales impactos en nuestra minicentral.

B. VALORACION DE IMPACTOS.

Un sistema utilizado es el de las matrices de valoración, que consiste básicamente en establecer la gravedad de cada impacto.

Estas matrices se estructuran como una tabla rectangular, en las casillas de la columna de la izquierda, aparecen enumerados los factores ambientales básicos enumerados anteriormente junto con los impactos que se pudiesen producir. En las casillas de la fila superior, figuran la caracterización de impactos(duración, recuperabilidad, etc.), el dictamen sobre la previsión de medidas correctoras y el nivel de impacto que nos indica la importancia y gravedad de la alteración producida. Suele ser general el efectuar 2

1. Siempre que se pueda es preferible incidir en el diseño del proyecto de tal manera que no se produzca la alteración.
2. En el caso de que esta se produzca puede tener o no medidas correctoras.
3. Existen ciertas medidas correctoras que deben ser articuladas según los resultados del plan de vigilancia.

Otro punto a considerar de las medidas correctoras es que los efectos sobre el medio pueden reducirse considerablemente si durante la fase de construcción se posee una sensibilidad medioambiental, de forma; evitar destrucciones de vegetación innecesarias. La mayoría de medidas consideradas en este apartado son del tipo orientativa, y al llevarlas a cabo es imprescindible considerar su valoración en términos de viabilidad, eficacia y costes.

MEDIDAS QUE SE PUEDEN APLICAR DURANTE:

FASE DE CONSTRUCCION

ALTERACIONES	MEDIDAS CORRECTORAS
Perdidas de suelos por erosión	Revegetación de taludes, terraplenes y superficies desnudas
Destrucción de la vegetación y del hábitat de ciertas especies animales	Cuidado durante la fase de obra.
Efectos sobre la calidad de aguas debidos a : <ul style="list-style-type: none"> • Desviación de caudales • Construcción de la presa. 	Evitar vertidos accidentales
Alteraciones paisajistas debidas a : <ul style="list-style-type: none"> • Movimientos de tierra • Construcción del edificio • Tuberías forzadas y canales de derivación • Pistas de acceso 	<ul style="list-style-type: none"> • Revegetación y remodelación de las pendientes • Respetar la tipología constructiva de la zona • Enterrar las tuberías. Medidas de apantallamiento vegetal. • Reposición de vegetación.

FASE DE EXPLOTACION

ALTERACIONES	MEDIDAS CORRECTORAS
Erosión hídrica a la salida del agua turbinada Erosión remontante Inmersión de suelos y vegetación	Establecer un canal de descarga
Detracción de caudales	Mantenimiento de un caudal ecológico y de servidumbre
Efectos sobre la calidad de agua por : <ul style="list-style-type: none"> • Embalsamiento • Descarga temporal de limos. • Disminución de la capacidad de dilucion. 	Evitar la termociclina con vertidos de fondo para centrales de regulación propia y saneamiento de la cuenca. Evitar realizar en los momentos delicados(estiaje, freza de peces). A ser posible, efectuado gradualmente. Mantener unos caudales mínimos
Efectos en las comunidades acuáticas por cambios en la calidad de agua.	Medidas correctoras sugeridas respecto a los cambios de la calidad de aguas.
Destrucción de lugares de reposo y/o reproducción de la fauna terrestre por inmersión.	Creación de zonas alternativas
Impacto de aves en el tendido eléctrico	Diseño de los apoyos e instalar "salvapajaros"
Efectos de barrera por la presa o azud Destrucción de la actividad agropecuaria	Instalar escalas de peces.
Cambios en los usos recreativos.	Reposición de zonas alternativas
Detracción de caudales aprovechables para otros usos	Mantenimiento de caudales
Pérdidas de zonas de interés naturalístico, paisajístico y arqueológico.	Respetar en el diseño y obra estos enclaves
Aumento de los niveles sonoros	Insonorización del edificio y de las turbinas
Cambio en las vías de acceso	Reposición de las vías

Hasta este punto es posible que los niveles de impacto disminuyan, pero para lograr que ellos permanezcan en un rango mínimo de incidencia, debemos establecer un programa de vigilancia el cual garantice tal situación, es importante transmitir a las demás personas que laboran en la planta la necesidad de vigilancia de tales parámetros para así crear una conciencia ambiental protectora, con el objetivo de minimizar el impacto no solo en nuestra zona de trabajo.

A.5 PROGRAMA DE VIGILANCIA AMBIENTAL.

La función del programa de Vigilancia Ambiental es establecer el sistema de control que llevara acabo el seguimiento de la evolución de las alteraciones ambientales inducidas por el proyecto decir, de los impactos, incluyendo en consecuencia, la eficacia de las medidas preventivas y correctoras que se ejecutaron para reducirlos.

Una vez aplicadas las medidas correctoras , todavía quedan alguna serie de impactos, que resultan imposibles de evitar. En el caso de una minicentral, se puede decir que los impactos principales residuales debido a construcción y funcionamiento de la instalación, son:

1. Perdidas de suelo productivo, cobertura vegetal y fauna terrestre por inundación del terreno destinado al embalse.
2. Disminución en el caudal de ríos y arroyos, alteraciones en la calidad de las aguas y sus repercusiones sobre la fauna acuática.
3. Impactos sobre el paisaje, debidos a la integración de las estructuras de obra y a la construcción de una presa o azud.

En un programa de vigilancia, el principal aspecto a controlar es todo aquello relacionado con el agua, que constituye el recurso fundamental de este tipo de instalación y se refiere en particular a lo siguiente:

- Mantenimiento de un caudal mínimo en el curso fluvial afectado por el proyecto.
- Mantenimiento de la calidad del agua en los niveles aceptables para la conversión de la fauna acuática.

Otro aspecto a considerar es la evolución de la vegetación en los lugares que hayan sido repoblados, bien para proteger zonas inestables (taludes, márgenes erosionables).

Para dicho programa habrá de establecerse un calendario adecuado, en el que se especifique la frecuencia de los muestreos, análisis y otras labores que sean necesarias.

La frecuencia de vigilancia de los caudales y la calidad del agua etapa también determinada por el régimen de caudal y por la realización de ciertas operaciones relacionadas con el funcionamiento de la minicentral como puede ser la descarga de Limos del fondo de un embalse y otras acciones que puedan alterar las características del agua.

Convendría asimismo efectuar un seguimiento estacional del estado de la fauna acuática en el tramo fluvial afectado.

Las medidas de revegetación deberán vigilarse hasta que se haya logrado el establecimiento de las plantas y se hayan cumplido los objetivos que determinaron la adopción de dichas medidas.

A.6 EFECTOS POSITIVOS DESDE EL PUNTO DE VISTA AMBIENTAL.

Una de las ventajas que presenta la energía hidroeléctrica es el de cubrir necesidades energéticas sin tener que utilizar recursos naturales agotables.

Algunos de los efectos positivos, son:

- La energía hidroeléctrica presenta un mínimo impacto ambiental en comparación con las tecnologías que emplean combustibles fósiles. La principal consecuencia medio ambiental es, por tanto, el efecto positivo producido por esta situación.

- La energía hidroeléctrica constituye un recurso renovable con, entre otras, las siguientes ventajas:
 - No emiten CO₂ a la atmósfera y por tanto evitan el proceso de calentamiento terrestre como secuencia del efecto invernadero.
 - No contribuyen a la formación de lluvia ácida.
 - No requieran sofisticadas medidas de seguridad.
 - No producen resumidos tóxicos de difícil, o imposible, tratamiento o eliminación.

Los posibles impactos generados por la energía hidroeléctrica son de menor dimensión y de carácter local; por tanto su vigilancia correcta resulta menos gravosa.

En la mayor parte de los casos, los impactos originados no tienen un carácter permanente, ya que no se prologan mas allá de la utilización de la fuente de energía y la reversibilidad de los impactos causados es total.

Se suprimen radicalmente los impactos originados por los combustibles durante su extracción, transformación y combustión, lo que incide beneficiosamente en la atmósfera, el suelo, el agua, la fauna, la vegetación, etc.

ANEXO B

TURBINA HIDRAULICAS Y GENERADORES.

La primera turbina de que se tiene noticia fue diseñada en Egipto por Heron en el año 20 Antes de Cristo . Era una turbina de vapor, de reacción, de forma esférica, con dos toberas tangenciales. no se sabe si fue efectivamente construida alguna vez.

En Europa existían ya en el siglo XVII las llamadas ruedas hidráulicas, que aprovechaban la energía hidráulica de los ríos para obtener fuerza motriz, generalmente para mover molinos. La transmisión de la fuerza se realizaba mediante correas o engranajes muy toscos. Las ruedas hidráulicas empleadas eran pesadas, lentas, de modesto rendimiento y potencia pequeña. Según el punto de aplicación de la fuerza hidráulica sobre la rueda, había tres tipos:

- 1- De aplicación tangencial superior**
- 2- De aplicación en el medio**
- 3- De aplicación tangencial en el nivel inferior.**

El primer constructor de turbinas y bombas fue Leonardo Davinci (1452-1526), quien utilizaba la fuerza centrífuga para el bombeo . En Francia, Denis Papin (1647 -1714) siguió la idea de Davinci haciendo girar agua en un cilindro cerrado, por medio de una rueda excéntrica. Por su parte el francés Belidor, de (1737 -1753), diseño ruedas para turbinas y bombas helicoidales . El Suizo Daniel Bernulli (1667 -1748) demostró en 1730 la forma de actuar del agua sobre las maquinas hidráulicas.

La primera turbina hidráulica de reacción fue la del Alemán Segner (1750), medico y profesor de matemáticas en Goettingen . El suizo Leonardo Euler, (1707 - 1783) presento en 1754 su teoría de las turbinas y construyo el primer aparato distribuidor, para regulación del caudal .

Debido al rozamiento, su invención no alcanzo un rendimiento elevado. En 1835, el ruso Sablukow presento la primera bomba centrífuga con rodete y caja en una sola unidad . En Francia, el constructor Burdin introdujo por primera vez la terminología "Turbina". B.

Forneyron, discípulo de Burdin, creó una turbina centrífuga con distribuidor semejante ala de Euler.

En 1840 surgieron en Europa diversas construcciones: la turbina axial, de Jonval, cuya teoría fue presentada por Poncelet y otras construcciones como las turbinas de Henschel, Zuppinger, Banki, etc.

La primera regulación utilizada fue la de Fontaine (1843), por medio de placas móviles para reducir la sección disponible y variar así el caudal . También estaba la regulación de Irard (mediante Válvulas) . Ambas producían vórtices y tenían mal rendimiento . Otras turbinas eran reguladas con sistemas diferentes (Banki, etc.). El primer sistema eficiente de regulación fue creado por el profesor Fink en 1877 y presentado en la exposición mundial de París en 1900. Es el anillo distribuidor de alabes móviles (directrices) . La turbina Francis, equipada con este aparato distribuidor de Fink, triunfó finalmente sobre las otras turbinas de su época .

De forma general estas turbomaquinas permiten la transferencia de energía del agua transformándola a energía mecánica, aprovechando la energía cinética y potencial del agua para producir movimiento de rotación, que transferido mediante un eje al generador produce energía eléctrica.

En cuanto al modo de funcionamiento, las turbinas hidráulicas se pueden clasificar en dos grupos:

1. Turbinas de acción.
2. Turbinas de reacción.

TURBINAS DE ACCION.

Son aquellas que aprovechan solo la energía cinética del agua, ya que la tubería de presión en la entrada del rodete está dispuesta como una tobera recibiendo el nombre de inyector (convirtiéndose la carga de altura, en energía cinética), el inyector (distribuidor) está provisto de una aguja de cierre para regular el gasto.

La figura B.1 a continuación muestra la instalación de una turbina de acción.

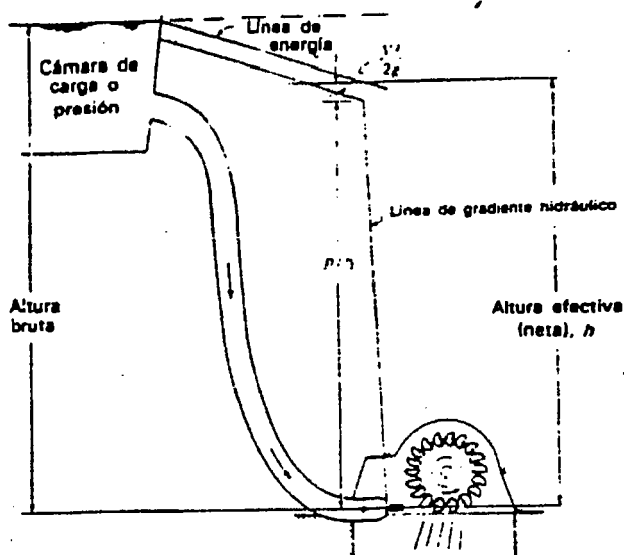


Figura B.1 Instalación de una turbina de acción.

Entre las turbinas de este tipo se tiene la "PELTON", que consta de un disco circular, o rodete, que tiene montados en su periferia una especie de cucharas de doble cuenco o alabes. El chorro de agua, dirigido y regulado por uno o varios inyectores incide sobre estas cucharas provocando el movimiento de giro de la turbina.

En las paradas de emergencia se utilizara un deflector de chorro, que lo dirige directamente hacia el desagüe. Evitando así el embalamiento de la maquina. De esta forma se puede realizar un cierre lento de los inyectores sin provocar golpes de presión en la tubería forzada.

Aplicación.

- Estos tipos de turbina son aprovechados en saltos elevados y pequeño caudal. $H \geq 50$ metros
- El rendimiento de estas maquinas es superior al 90% en condiciones de diseño.

Instalación.

Se pueden instalar en posición horizontal y vertical. En disposición horizontal se puede proveer de 1 o 2 inyectores, el rodete es más accesible para su inspección (mantenimiento), así como sus inyectores y existe la posibilidad de instalación de turbinas gemelas.

En disposición vertical: Se requiere de más de 2 inyectores, encareciéndose el coste del distribuidor y se acorte la longitud del eje turbina - generador.

La diferencia entre las turbinas de acción respecto a las de reacción es que las primeras aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua para hacerlas girar, mientras que las de reacción aprovechan además, la presión que le resta a la corriente en el momento de contacto.

TURBINAS DE REACCION.

En una turbina de reacción, el flujo de agua sobre el rodete (elemento rotatorio) se efectúa bajo presión en una cámara cerrada, este tipo de turbinas aprovechan tanto la energía cinética como la energía de presión, en la figura B.2 se muestra la instalación de una turbina de reacción.

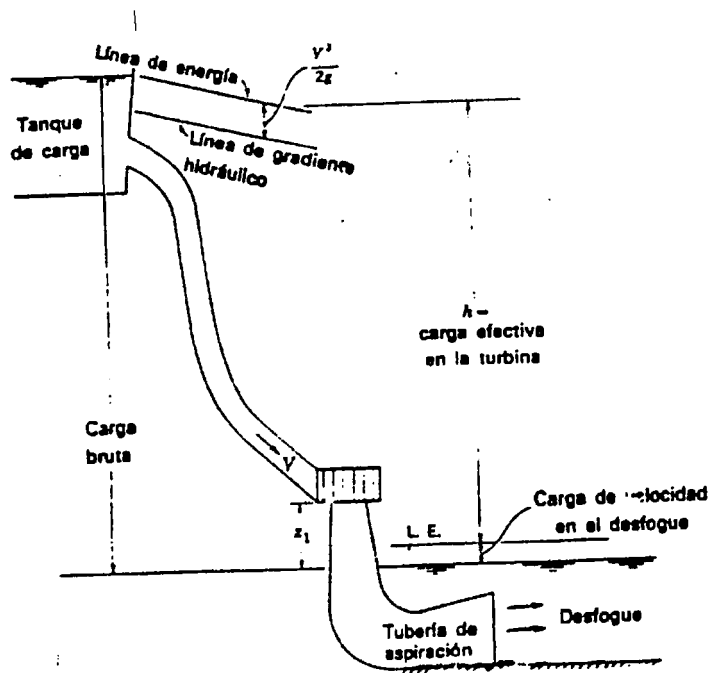


Figura B.2 Instalación de una turbina de reacción.

A continuación enfatizaremos en las turbinas de reacción, específicamente en las turbinas FRANCIS, debido a que es el tipo de turbina instalada en la P.C.H. de Sonsonate, por lo tanto se hará mención de su funcionamiento y descripción de sus componentes y demás generalidades.

TURBINA FRANCIS.

Se considera la típica turbina Hidráulica de reacción de flujo radial; Es muy versátil para ser utilizada en un amplio rango de salto y caudal en potencias elevadas aunque su aplicabilidad óptima es para saltos y caudales medios. Existen dos tipos fundamentales de turbinas Francis:

- a) Turbina Francis pura o radial. Pacíficamente toda la energía es transferida del fluido al rotor, en el momento en que este pasa a través de los alabes todo el tiempo en dirección radial y de afuera hacia dentro aprovechando al máximo la acción centrípeta dando un recorrido radial relativamente largo. Su aplicación se justifica en los sitios de mucha altura y poco caudal

- b) Turbina Francis Mixta. En este tipo de turbina, el agua recorre los alabes en forma radial y de afuera hacia dentro pero lo hace solamente en la parte superior de los alabes finalizando su recorrido en dirección axial por entre los mismos. La ponderación de la acción radial y axial, puede establecerse en forma gradual según las exigencias de carga y caudal. En general las turbinas Francis tiene una eficiencia comprendida entre el 83% al 90 %

Componentes principales de las turbinas FRANCIS :

1. El Rodete móvil o Rotor : Esta conformado por una corona de paletas fijas, torsionadas de forma que reciben el agua en dirección radial y lo orientan axialmente, estas están ubicadas en un plato perpendicular al eje de la maquina, de cuyo plato arrancan siguiendo la dirección axial, tomando en forma progresiva un alabeo y abriéndose hacia la dirección radial con lo que el conjunto presenta forma abocardada, haciéndose cada vez mas acentuada cuanto mayor es la acción axial exigida a la turbina.
2. El Distribuidor: Contienen una serie de álabes fijos o móviles que orientan el agua hacia el rodete, la turbina hidráulica se acopla rígidamente a un alternador o generador eléctrico, al cual mueve para generar energía eléctrica. Este debe girar siempre a una velocidad fija. La potencia absorbida por el generador varia según las exigencias de la demanda de energía eléctrica del sistema al que esta conectado. Así la turbina debe ser capaz de modificar su potencia, en cada momento, de acuerdo con las necesidades del generador. Dicha regulación de potencia se realiza por medio del distribuidor, modificando convenientemente el gasto. La potencia de la turbina se define por las variables : Caudal (Q) y altura (H), así :

$$P = \eta \gamma \times Q \times H$$

Como se puede observar de la ecuación la variable H depende exclusivamente de condiciones naturales del río, por tanto es preciso recurrir a la modificación de Q, para poder variar la potencia. El caudal depende del área de paso y de la velocidad, según la ecuación de continuidad. En estas turbinas el agua tiene acceso por su área circunferencial lateral, o sea el área normal a la dirección radial, cuyo valor es constante en una turbina determinada. Entonces cabe solamente modificar la velocidad radial V_r de paso por esta área.

$$Q = A \times V_r$$

Donde :

Q : Caudal

A : Área de paso lateral.

V_r : Velocidad radial, la cual es posible modificar cambiando la dirección de la velocidad absoluta de entrada, por medio de los alabes del distribuidor.

Así el distribuidor está constituido por una serie de alabes directores en forma de persiana circular, cuyo paso se puede modificar con la ayuda de un servomotor, lo que permite imponer al fluido la dirección de ataque exigida por el rodete móvil y además regular el gasto de acuerdo con potencia pedida a la turbina, desde valores máximos a un valor cero, en posición cerrada. El distribuidor transforma parcialmente la energía de presión en energía cinética. En la figura B.3 se muestra un distribuidor de alabes móviles.

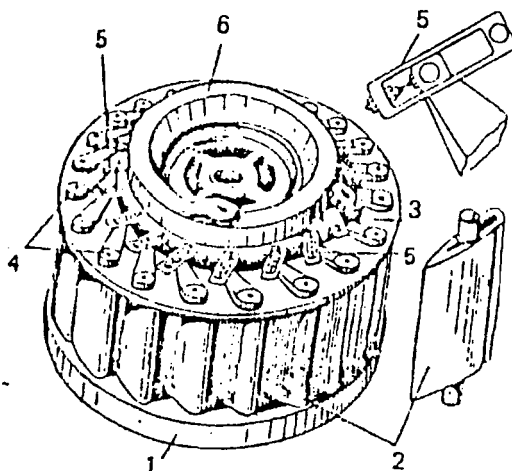


Figura B.3 Distribuidor con alabes móviles.

Donde :

1. Anillo de soporte inferior
 2. Alabes móviles
 3. Anillo de soporte superior.
 4. Bielas
 5. Bielas
 6. Anillo de control.
3. La carcaza, caja espiral o caracol: Es un ducto alimentador, de sección generalmente circular y diámetro decreciente, que circunda al rotor, procurando el fluido necesario para la operación de la turbina.
 4. Portillas de acceso: Paletas direccionales fijas a la carcaza.
 5. Tubo de desfogue o difusor: Tiene como función dar la salida al agua de la tubería y al mismo tiempo procura una ganancia en carga estática hasta el valor de la presión atmosférica, debido a su forma divergente. Se tiene así a la salida del rotor una presión mas baja que la atmosférica y, por tanto, un gradiente de presión dinámica mas alta a través del rodete . Su forma puede ser simplemente cónica o mas compleja cuando es acodada.

Instalación :

Estas pueden ser implementadas en eje horizontal o en eje vertical, ya sea en cámara abierta o en cámara cerrada (con uso de caracol), la dos disposiciones descritas anteriormente de acuerdo al eje se muestran en la figura B.4 siendo en cámara abierta, ya que la P.C.H de Sonsonate esta provista de tal tipo de turbina en eje vertical.

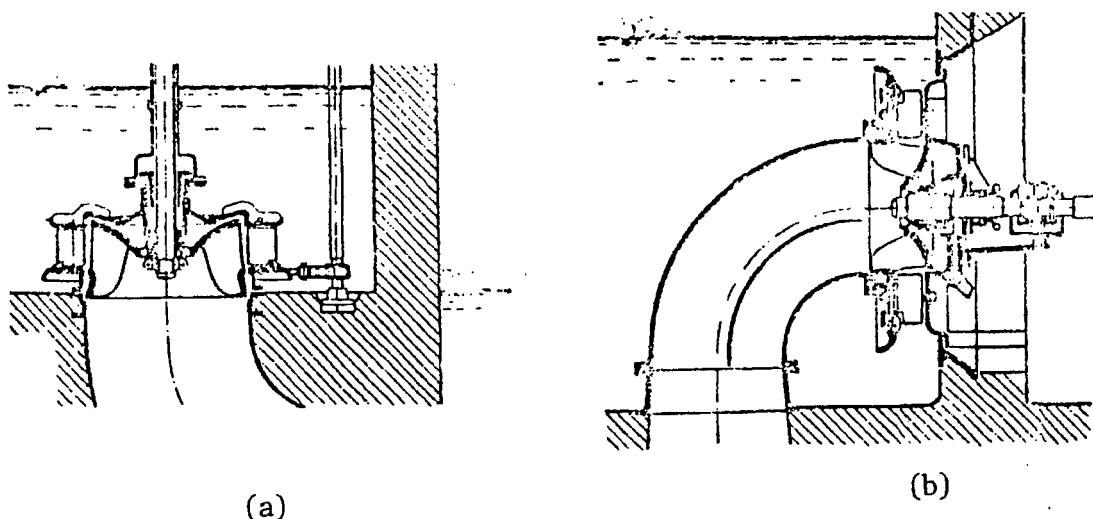


Figura B.4 Turbina Francis de cámara abierta instalación horizontal (a) y vertical (b)

GENERADORES DE CORRIENTE ALTERNA.

Los generadores son maquinas de C.A que convierten la energía mecánica en energía eléctrica de C.A. Existen dos clases de generadores de C.A los generadores **síncronos** y **asíncronos**, de acuerdo a la manera en que se suministra el campo magnético exitatriz. La corriente de campo de los generadores síncronos es suministrada por una fuente externa de C.C, mientras que en los generadores asíncronos es suministrado mediante inducción magnética (acción transformadora) dentro de un embobinado de campo. Esta inducción magnética en los embobinados de campo y con la interacción del movimiento de giro del rotor, se produce un **campo magnético giratorio** que induce un sistema trifásico de voltaje de ca en los embobinados del inducido localizados en el estator.

GENERADORES SINCRONOS.

Si en un generador se aplica al embobinado del rotor una corriente continua, se producirá un campo magnético en el rotor. Entonces, el rotor de generador se impulsara por medio de un motor primario, lo cual producirá un campo rotatorio dentro de la maquina. Este campo magnético rotatorio, inducirá un sistema trifásico de voltaje dentro del embobinado del estator del generador.

GENERADORES ASINCRONOS.

En estos generadores el voltaje del rotor es inducido en el embobinado del rotor, en lugar de conectarse físicamente por medio de conductores. La característica que distingue a un generador asíncrono es que **no necesita una corriente de campo de c.c** para poner a funcionar la maquina.

Si un motor externo en este caso la turbina maneja al generador asíncrono a una velocidad mayor que la de sincronismo se invertirá el sentido de su momento de torsión inducido se producirá una potencia eléctrica, que es proporcional al momento aplicado por la turbina.

Tal como muestra la figura B.5 hay un momento de torsión inducido máximo posible aplicado, Este momento de torsión se le conoce como **momento de torsión resistente máximo**. Si la turbina aplica un momento de torsión mayor que el momento de torsión resistente al eje del generador de inducción, este girará a velocidad excesiva (condición de embale).

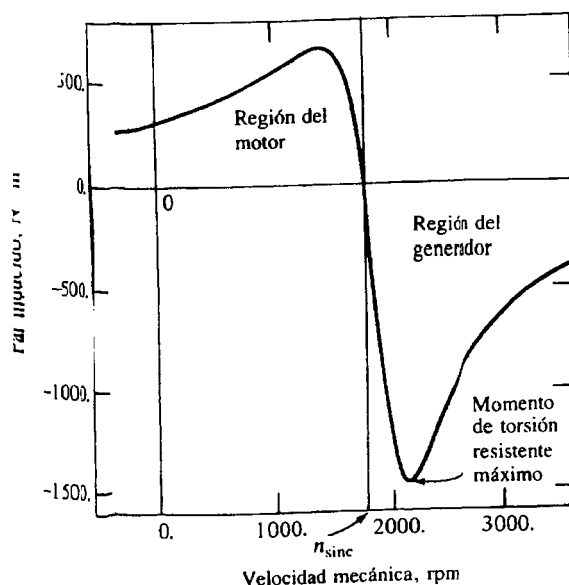


Figura B.5 **Curva característica de momento de torsión - velocidad**

Una de las desventajas principales de este generador es que no puede controlar su propio voltaje de salida. Normalmente, el voltaje del generador se mantiene por medio del sistema de potencia externa al cual está conectado. La mayor ventaja de este generador es su simplicidad. Un generador de inducción no necesita un circuito de campo separado y no tiene que ser accionado continuamente a una velocidad fija. Mientras la velocidad de la máquina tenga un valor mayor que la velocidad de sincronismo, para el sistema de potencia que está conectado, funcionará como generador. Cuanto más grande sea el momento de torsión aplicado al eje, más grande será la potencia de salida resultante.

DEFINICIÓN DE TERMINOS EN ENERGIA HIDROELECTRICA (GLOSARIO).

ALTURA BRUTA Y ALTURA NETA.

ALTURA BRUTA: Diferencia total en elevaciones entre el nivel del agua en la corriente en el punto de la derivación y el nivel de agua en la corriente, en el punto donde se regresa el agua después de haber sido utilizada para la generación.

ALTURA UTIL: Desnivel entre la superficie libre del agua en la cámara de carga y el nivel de desagüe en la turbina.

ALTURA NETA: Diferencia entre altura útil y las pérdidas de carga producidas a lo largo de todas las conducciones.

EFICIENCIA HIDRAULICA: Relación entre la altura neta y la altura bruta, y la eficiencia global o total de la central es igual a la eficiencia hidráulica, multiplicada por la eficiencia de las turbinas y generadores.

$$\eta \text{ Hidráulica} = H \text{ neta} / H \text{ bruta}$$

$$\eta \text{ Total} = \eta \text{ Hidráulica} \times \eta \text{ Turbina} \times \eta \text{ Generador}$$

La altura neta varía con el caudal turbinado ya que las pérdidas de carga son función del caudal circulante. Las pérdidas se pueden enumerar o son debidas generalmente a conducción por tubería forzada, embocadura de la cámara de carga, codos, reducciones, válvulas, etc.

CAUDAL INSTALADO :

Caudal total que atravesará a todas las turbinas en funcionamiento normal, este no debe ser ni el máximo ni el mínimo registrado en el lugar. En el primer caso el rendimiento de la central sería bajo, al funcionar las turbinas durante largo tiempo lejos del régimen nominal, que suele ser el de óptimo rendimiento, siendo además mayor el costo de una central con turbinas sobredimensionadas, en el segundo caso quedaría sin utilizarse durante mucho tiempo gran parte del caudal disponible.

La selección del caudal a instalar es objeto de un estudio técnico - económico basado en:

- Variación del caudal del río en el sitio (diario, mensual, anual,...etc)
- Precio de maquinaria e instalaciones.
- Demanda de energía o mercado a satisfacer
- Precio de venta de la energía eléctrica.

La elección de dicho caudal puede efectuarse a través de la curva de caudales clasificados que proporciona una valiosa información gráfica sobre el volumen de agua existente, el volumen turbinado y el volumen vertido por servidumbre, mínimo técnico o caudal ecológico.

En la figura B.6 se representan estos conceptos que definimos a continuación:

Q_M : Caudal máximo alcanzado en el año o caudal de crecida.

Q_m : Caudal mínimo del año, o de estiaje.

Q_{sr} : Caudal de servidumbre que es necesario dejar en el río por su cauce normal (se engloban el caudal ecológico y el necesario para otros usos).

Q_{mt} : Caudal mínimo técnico.

Q_e : Caudal equipamiento.

Dependiendo del tipo de turbina que se utilice en la instalación será necesario tener en cuenta un caudal mínimo técnico (Q_{mt}) que es directamente proporcional al caudal de equipamiento (Q_e) con un factor de proporcionalidad K que depende del tipo de turbina.

$$Q_{mt} = K \times Q_e$$

El coeficiente K toma en una primera aproximación los siguientes valores:

- Turbinas PELTON: $K = 0,10$;
- Turbinas KAPLAN: $K = 0,25$;
- Turbinas SEMIKAPLAN: $K = 0,40$, y
- Turbinas FRANCIS: $K = 0,40$.

El caudal de equipamiento (Q_e) se elige de forma que el volumen turbinado sea máximo, es decir, el área encerrada entre los puntos A, B, C, D, E, A sea máxima. (Ver figura B.6)

Construcción de la curva de caudales clasificados

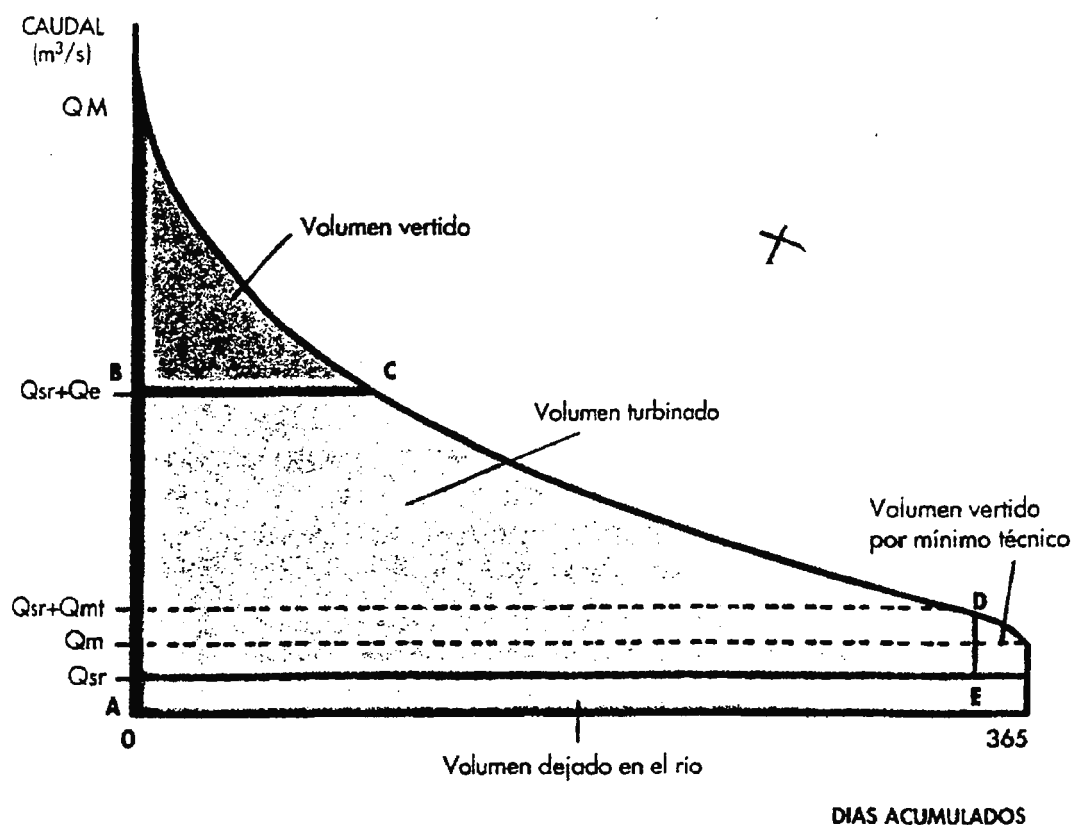


Figura B.6 Construcción de la curva de caudales clasificados.

POTENCIA O CAPACIDAD INSTALADA.

La potencia disponible en la central hidroeléctrica varía en función del caudal turbinado y el salto en cada instante. Y a su vez es la potencia que puede desarrollar la central trabajando con el caudal instalado y la altura neta en el punto de rendimiento total máximo.

$$P_i = Q_i \times \gamma_{H_2O} \times H_{\text{neta}} \times \eta_{\text{total}}$$

Donde :

Q_i : Caudal instalado

H neta: Altura neta

η total : Eficiencia total de la central

“ Q_i ” debe ser adecuado de forma que la energía producida sea la máxima posible en función a la hidrología, a su vez la altura neta es la máxima permitida por la topografía del terreno, dentro de los límites que marcan la viabilidad de la inversión y la afección al medio ambiente.

ANEXO C

ANÁLISIS DE ERROR DE ESTADO ESTACIONARIO

PARA SISTEMAS DE PRIMER ORDEN.

Después de observar la respuesta en el tiempo de sistemas de primer orden, se detecta la inclusión de cierto error al transcurrir el tiempo, en la amplitud del sistema, sin embargo, para dejar constancia de ella, a continuación se analizará si poseen o no, error de estado estacionario, que afecten o indiquen un valor erróneo de las variables a manejar y controlar, provocando inexactitud en el sistema.

En la figura (C.1) se muestra el diagrama de bloque de un sistema de primer orden típico.

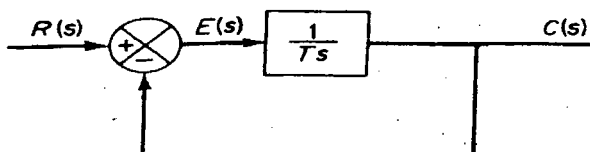


Figura C.1 Diagrama de bloques sistema de primer orden.

Cuya función de transferencia es:

$$C(S)/R(S) = G(S)/(1+(G(S) \times H(S))) = 1/(Ts+1)$$

Del diagrama, despejando E(S), tenemos:

$$E(S) = (1/(1+G(S)H(S))) \times R(S) = (Ts / (Ts + 1)) \times R(S)$$

El error de estado estacionario es:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \times E(s) = (S/(1+G(S)H(S))) \times 1/S = 1/(1+G(0)H(0))$$

$$\text{Del diagrama } G(S)H(S) = 1 / TS$$

En los sistemas de control se definen coeficientes, uno de los cuales es: Constante K_p de error estático de posición, la cual determina la "bondad" de un sistema en cuanto a su exactitud de posición a su salida y se define como :

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(S)H(S) = G(0)H(0) = 1 / TS$$

Así, sustituyendo tal asunción en la ecuación que relaciona a e_{ss} , tenemos:

$$e_{ss} = 1 / (1 + (1/TS)), \text{ para } S=0$$

$$e_{ss} = 0 \text{ y } K_p = \infty$$

De esta manera para una entrada escalón unitario, siendo K_p infinito y e_{ss} igual a cero, dicho sistema se identifica como sistema tipo 1 o superior, ya que al aumentar el número de tipo, se aumenta la exactitud, siendo su error de estado estacionario cero, demostrándose que se estabiliza a medida el tiempo transcurre, ya que a las entradas que se someten el sistema son escalón en su mayoría.

ANEXO D

D.1 CARACTERÍSTICAS DE EL P.L.C. SIMATIC S5 103U :

Estructura modular : Dicha estructura permite según la CPU una configuración máxima de hasta 256 entradas y salidas digitales. El AG S5 103U se adecua por ello para controles de maquinas así como también para la automatización y vigilancia de procesos de tamaño medio (entre 128 y 500 entradas salidas, capacidad de memoria hasta 32K). La posibilidad de espacio por pequeños escalones y la gran variedad de tipos de módulos permite adaptar siempre óptimamente este P.L.C. a la tarea de control requerida.

1. Construcción robusta y fácil montaje : Todos los módulos adaptables a este P.L.C. son bloques pequeños, manejables y robustos. Funciona sin necesidad de ventilador ; electrónica inmune a las interferencias. Los módulos se conectan en elementos de bus, donde se atornillan a prueba de vibraciones. Los elementos de bus se enganchan sobre un carril normalizado, y pueden configurarse en una o varias líneas y montarse tanto vertical como horizontalmente.
2. Fácil programación : Como lenguaje de programación se utiliza el Step 5, el cual posee un extenso juego o set de instrucciones con tres formas de representación. Dicha programación puede realizarse con todos los aparatos de programación de la serie U. Los programas pueden cargarse también desde módulos de memoria sin necesidad de utilizar algún aparato de programación. La forma de elaboración de programa es cíclica, o sea que después de la elaboración de la ultima instrucción existente en memoria, la unidad de control empieza nuevamente con la primera instrucción existente en memoria.

3. Toda la familia Simatic S5, utiliza un único lenguaje de programación, Step 5 el cual posee módulos funcionales standard los cuales permiten escribir programas de forma rápida y rentable, eliminando toda circuitería analógica y digital que se pueda implementar para una tarea determinada solo con el efecto de efectuar o realizar el software.

A continuación se presentan los datos técnicos de la CPU de este PLC:

Datos técnicos de la CPU 103:

Tipo de procesador: Procesador de bit

Capacidad de memoria:

- Memoria interna: RAM 10240 instrucciones (10Kbytes)
- Módulo de memoria: EPROM/EEPROM

Tiempo de ejecución:

- De cada operación binaria: 1.6×10^{-6} s
- De cada operación de palabra: 125×10^{-6} s

Tiempo de vigilancia de ciclo: 500×10^{-6} s

Marcas: 2048, de ellas 2048 remanentes.

Temporizadores: 128; 0.01...9990s

Contadores: 120, de ellos 8 remanentes; 0...999

Numero máximo total de entradas/salidas digitales: 256

Numero máximo total de entradas/salidas analógicas: 32

Módulos de organización: OB 1, 2, 13, 21, 22, 31, 34, 251.

Módulos de programa: 0...255

Módulos funcionales:

-Programables: 0...255

-Integrados: 240...243, 250, 251

Módulos de paso: 0...255

Módulos de datos: 0...255

Volumen de ordenes: 180.

En la figura D.1 se muestra el CPU 103U

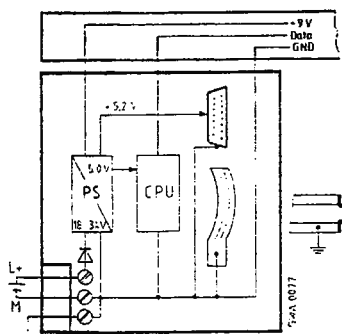
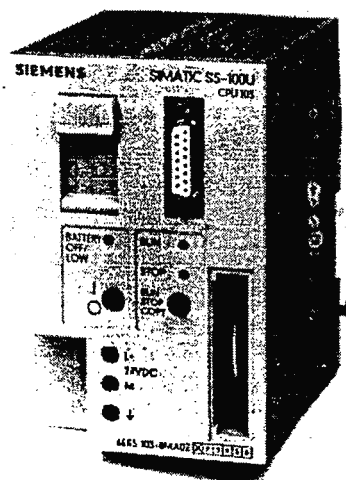


Figura D.1

D.2 FIABILIDAD DE LOS APARATOS Y COMPONENTES SIMATIC S5

Con el objeto de respaldar la selección del P.L.C. SIMATIC S5 103U para su utilización en el presente diseño, se presentan a continuación algunas de las medidas que son tomadas por el fabricante durante la fase de desarrollo y en el proceso de fabricación de los aparatos SIMATIC S5 con las cuales se asegura su fiabilidad al utilizarlos para el desarrollo de un sistema de automatización:

- Utilización de componentes de alta calidad
- Comprobación sistemática y controlada por computador de todos los componentes suministrados.
- Rodaje o prueba a alta temperatura de todos los circuitos integrados, por ej. memorias, microprocesadores, etc.
- Utilización de medidas de seguridad para evitar cargas electrostáticas durante la manipulación de circuitos MOS.
- Utilización de controles visuales en las distintas fases de la fabricación
- Se realiza un test o prueba controlada por computador de todos los componentes y de su funcionamiento conjunto.
- Realización de pruebas del fabricante de exposición a temperaturas superiores al de la ambiente, durante largos periodos.

ANEXO E

A continuación se muestran los datos reales obtenidos durante las diferentes pruebas practicas realizadas en la P.C.H. de Sonsonate:

DATOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS DE VELOCIDAD:

En la siguiente tabla se muestran los datos promedio de velocidad en el eje de la turbina generador obtenidos durante las pruebas de velocidad, para diferentes valores de apertura del distribuidor:

X= apertura del distribuidor

TIEMPO DE DURACION DE LA PRUEBA(segundos)	VELOCIDAD(r.p.m.)			
	X=1.4cm	X=1.6cm	X=1.8cm	X=2.0cm
0	0	449	528	622
10	70	464	545	634
20	130	475	559	645
30	170	485	570	655
40	206	497	580	664
50	223	502	586	670
60	245	505	593	677
70	294	510	598	681
80	313	514	602	684
90	335	516	607	687
100	352	518	610	689
110	369	518	614	690
120	384	518	616	691
130	396	518	618	692

140	404	518	618	692
150	410	518	618	693
160	417	518	618	693
170	424	518	618	693
180	427	518	618	693
190	432	518	618	693
200	434	518	618	693
210	434	518	618	693

**DATOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS DE NIVEL EN LA CAMARA DE
CARGA**

En la tabla siguiente se presentan los datos promedio obtenidos durante las pruebas de nivel realizadas en la planta para diferentes valores de apertura del distribuidor (X) referenciados a partir de la apertura de conexión.

TIEMPO DE DURACION DE LA PRUEBA(Segundos)	DECREMENTO EN EL NIVEL (NIVEL INICIAL -NIVEL FINAL)(cm)		
	X=1cm	X=4cm	X=8cm
0	0	0	0
10	4	7	0.2
20	5.5	11	3
30	6	17.5	9
40	6	17.5	14
50	6	21	17

60	6	22	22
70	6	22	27
80	6	22	27.5
90	6	22	27.8
100	6	22	27.8
110	6	22	27.8
120	6	22	27.8
130	6	22	28.5
140	6	22	28.5
150	6	22	28.5
160	6	22	29
170	6	22	29
180	6	22	29

BIBLIOGRAFIA.

ANGULO USATEGUI JOSE MA. MICROPROCESADORES. Curso sobre aplicaciones en sistemas industriales (Madrid 1985).

ANIBAL OLLERO BATURONE. CONTROL POR COMPUTADORA. Descripción interna y diseño óptimo. (Barcelona 1990.).

K. OGATA. INGENIERIA DE CONTROL MODERNO. (Universidad de Minesota, 1993).

CREUS, SOLE. CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES. (Barcelona, 1988).

FU. K. S. ROBOTICA . Una Introducción (Barcelona, 1993).

MAYOL BADIA. AUTOMATAS PROGRAMABLES. (Barcelona, 1989).

SHAPMAN J. MAQUINAS ELECTRICAS. (Mexico, 1993).

GLOSARIO

A.C. : Siglas en ingles para designar a la corriente alterna.

Abocardada : De forma semejante a la de la trompeta.

Acoplamiento a la red: es la acción de conectar el generador a la red de distribución estando este a la misma frecuencia y voltaje.

Acoplamiento mecánico. Unión entre ejes para transmitir una fuerza.

Algoritmo : Método y notación en las formas del calculo.

Analógico. Señal de características continuas, tomando distintos valores ya sea dentro de un rango a medida que transcurre el tiempo.

AND : Función lógica elemental que reemplaza a la multiplicación de operaciones algebraicas. Como compuerta de su resultado será lógica solo cuando todas la encuentran en tal estado.

Asincrono : Falta de coincidencia o concordancia con los hechos, falta de simultaneidad en el tiempo.

Autómata. Controlador lógico para la implementación de procesos con identidad automática

Automatización: proceso de mecanización de las actividades industriales con el fin reducir la mano de obra, simplificando el trabajo.

Axial : Relativo al eje.

Biela : Barra que en las máquinas sirve para transformar el movimiento de vaivén en otro de rotación o viceversa.

Binario : Sistema de numeración de base dos, posee únicamente dos números 0 y 1 con los cuales se expresan los demás.

Bit : Dígito binario (0 ó 1).

Byte. Secuencia de bits operados bajo unidad y usualmente acortados como una palabra en computadoras

C.A. : Siglas que representan en español a la corriente alterna.

Calibración. Acción de ajuste de los instrumentos de medición para asegurar una lectura real de la variable medida.

Campo de medida. Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o transmisión del instrumento.

Chumacera: Pieza en que descansa y gira un eje.

CO₂: Dióxido de carbono, gas incoloro, inodoro, incombustible y asfixiante, se produce naturalmente en la combustión en la respiración animal y la fermentación.

Control Proporcional: Amplificador de ganancia ajustable, que suprime el error existente según la proporción de este.

Delta. Desplazamiento o porción de cambio de forma constante de una variable, sistema o condición en particular

Detracción : Acción y efecto de detraer, o sea restar, sustraer quitar parte de alguna cosa.

Diagrama de estados: Diagrama en el cual se muestra todos los estados lógicos que pueden tomar un proceso así como sus respectivas variables de entrada, salida y restricciones.

Digital : Pertenece o relativo a los números, se le denomina a la lógica sobre la base del código binario, o lógica de dos estados.

Discreto. Concerniente a separar, partes discretas

Divergente : Irse apartando progresivamente una de otras, dos o más líneas o superficie, discordia, discrepar, disentir.

Electrovalvula : Dispositivo mecánico de alguna máquina o instrumento, que permite cerrar o abrir y suspender atómicamente y alternativamente la comunicación entre dos de sus órganos o con el medio exterior sirve para iniciar, detectar o regular el flujo de un líquido (agua, aceite, petróleo) o aire, el vapor del agua u otros gases, excitando por una corriente eléctrica.

Embobinado : Arrollar o devanar hilos, alambre, etc. en una bobina conjunto de las espiras de una bobina.

EPROM. Programablemente borrada memoria de solo lectura.

Erosión : Desgaste de una superficie producido por el rozamiento. .

Escala. Señal de identificación que en matemática posee comportamiento definido

Escorrentias : Corriente de agua que se vierte al rebasar su depósito o cause naturales o artificiales.

Estado lógico. Estado en el cual se encuentra la secuencia de un determinado proceso.

Estándar. Modelo o patrón.

Gradiente : Relación de la diferencia de alguna variable entre dos puntos.

Hábitat : Medio ambiente, conjunto de condiciones físicas y químicas externas al que se ha adaptado y en que vive y crece naturalmente.

Impulso. Señal de identificación que en matemática posee comportamiento definido

Inducción : Acción de inducir, producción de una fuerza eléctrica o magnética en un conductor por la aproximación de un cuerpo electrizado o magnetizado.

Lazo. Trayectoria de la energía o corriente eléctrica en un sistema

LED. Diodo emisor de luz

Limo : Lodo o Légamo.

Linealidad. Aproximación de una curva de precisión a una línea recta especificada.

Magnética : Relativa al magnetismo, que posee la propiedad de imán: hierro magnético.

Maquina motriz. Maquina eléctrica la cual puede ser utilizada tanto como motor o generador.

Microprocesador. Unidad central de una microcomputadora que contiene los elementos lógicos de manipulación de datos y ejecuciones aritméticas y de operaciones lógicas.

Momento : Mínimo espacio en que se divide el tiempo, ocasión

Motorización: Situación en el cual el generador deja de comportarse como tal y absorbe potencia de la red comercial.

P.C.H: Pequeña central hidroeléctrica

P.L.C. Controlador lógico programable

Persiana : Especie de celosía formada de tablillas, gralte, móviles, colocadas de modo que dejen pasar el aire y no el sol.

Perturbación. Es una señal que tiende a afectar inversamente el valor de la salida en un sistema.

Planta: Es un equipo funcionando conjuntamente, cuyo objetivo es realizar una operación determinada en este caso se refiere a la central de generación.

Plena carga: Estado o condición de un proceso de generación de energía eléctrica a su mayor potencia de suplo.

Panel de control: Tablero en el cual se visualiza un panorama general de lo que ocurre en el proceso de una planta y desde el cual el operador puede realizar las acciones correspondientes para el control del sistema.

Precisión: En instrumentación define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio.

Procesador: Computador capaz de recibir datos, manipularlos y suplir los resultados

Proceso: Operación o desarrollo natural, caracterizado por una serie de cambios graduales, progresivamente continuos, que se suceden uno a otro y que tienden a un determinado resultado, que para este caso es la producción de energía eléctrica.

Punto de consigna: Valor de referencia el cual representa el valor estimado de salida de la planta.

Punto de consigna: Valor de referencia el cual representa el valor estimado de salida de la planta.

R.P.M Siglas que corresponden a la velocidad angular de un eje o sistema en revoluciones por minuto.

Rack: Percha o conector físico de señales eléctricas

RAM. Memoria de acceso aleatorio. Técnica de almacenaje en la cual el tiempo requerido para obtener un dato es independiente de su localización

Señales: Signo que identifica a la forma de propagación o actuación de una variable específica

Sensor: Dispositivo que recibe impulsos o estímulos y los transmite.

Sincrono : Dicese de las cosas que suceden al mismo tiempo dos o más movimientos o fenómenos.

Sistema de control realimentado. Se denomina sistema de control realimentado a aquel que tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y alguna entrada de referencia, comparándolos y utilizando la diferencia de señales como medio de control.

Sistema Dinámico. Conjunto de procesos y partes relacionadas entre efectuando una acción en continuo movimiento.

Sistema: Colección de partes y procedimientos unidos en una regulada interacción e interconexión para ejecutar una función.

Switch: Interruptor o conmutador.

Tacómetro: Instrumento que mide la velocidad de rotación de un eje mediante un método particular.

Temporizador : Acomodarse al gusto o parecer ajeno.

Tipología : Ciencia que estudia los distintos tipos de una especie.

Torsión : Acción y efecto de torcer o torcerse una cosa en forma helicoidal.

Transductor: Recibe una señal de entrada en función de una o más cantidades físicas y las convierte modificada o no a una señal de salida.

Turbina: Maquina giratoria que convierte la energía cinética de un río a energía mecánica.

Ultrasonido: Onda sonora inaudible de mas de 20,000 vibraciones por segundo.

Umbral: Parte inferior o superior de alcance

Variable de proceso: Son las distintas variables que interactuan conjuntamente en la operación de un determinado proceso.

Velocidad de sincronismo: Velocidad angular del eje rotativo del generador, al cual se considera en fase o en norma con la frecuencia de un sistema de generación de energía eléctrica de corriente alterna

XOR : Función lógica denominada "OR" exclusiva, proporcionada una salida lógica 1, cuando solo una de sus entradas se encuentra en 1 lógica.