

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA EL SISTEMA ÓLEO HIDRÁULICO DE LA TURBINA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN FRANCISCO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

JUAN ANDRÉS LUDEÑA CHALACÁN

Juan-cat666@hotmail.com

DIRECTOR: PhD. LUÍS CORRALES

luisco5049@yahoo.com

Quito, Enero 2009

DECLARACION

Yo Juan Andrés Ludeña Chalacán, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Juan Andrés Ludeña Chalacán

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Andrés Ludeña Chalacán,
bajo mi supervisión.

PhD. Luís Corrales

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Mi profundo agradecimiento a mi padre y mi madre por la dedicación, esfuerzo y buen ejemplo, porque todo lo que he logrado es gracias a ellos.

Un especial agradecimiento al PhD. Luís Corrales y al personal técnico de la Central Hidroeléctrica San Francisco por la confianza y el tiempo dedicado a la elaboración de esta Tesis de Grado.

Juan Andrés

DEDICATORIA

El presente trabajo, lo dedico con profundo sentimiento de amor, respeto y consideración a mis Padres, hermanos y todas aquellas personas que me apoyaron con esmero y dedicación para poder culminar mi carrera profesional.

Juan Andrés

CONTENIDO

RESUMEN	1
PRESENTACIÓN.....	3
CAPITULO 1	5
DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD Y LAS TURBINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN FRANCISCO	5
1.1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA TURBINA FRANCIS	9
1.2.1 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA TURBINA	9
1.2.2 COMPONENTES DE LA TURBINA	10
1.2.2.1 CÁMARA ESPIRAL.....	11
1.2.2.2 DISTRIBUIDOR	14
1.2.2.3 RODETE.....	18
1.2.2.4 TUBO DE SUCCIÓN.....	19
1.2.2.5 EJE DE LA TURBINA.....	20
1.2.2.6 SELLO DEL EJE.....	22
1.2.2.7 COJINETE GUÍA.....	23
1.3 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL REGULADOR DE VELOCIDAD	24
1.3.1 GENERALIDADES.....	24
1.3.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	25
1.3.3 VARIABLES DE CONTROL	26
1.3.4 LIMITADORES DINÁMICOS	27
1.3.5 ACTUADOR HIDRÁULICO	27
1.3.6 SISTEMA DE MONITOREO DE VELOCIDAD INDEPENDIENTE.....	28
1.3.7 RELES DE VELOCIDAD	28
1.3.8 RELÉ DE MÁQUINA PARADA	29
1.3.9 RELÉS DE VELOCIDAD DEL RVX 300.....	29
1.3.10 CONDICIONES PARA REGULADOR LISTO.....	30
1.3.11 PARTIDA EN VACÍO.....	30
1.3.12 SINCRONIZACIÓN DEL GENERADOR	31
1.3.13 PARADA DE EMERGENCIA	32
1.3.14 PARADA GRADUAL	33

1.3.15	PARADA RÁPIDA.....	33
1.3.16	SUPERVISIÓN DE FALLAS.....	34
CAPITULO 2.....		35
DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA ÓLEO-HIDRÁULICO.....		35
2.1	DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA UNIDAD OLEO-HIDRÁULICA	35
2.1.1	SISTEMA DE BOMBEO	35
2.1.2	VÁLVULAS	40
2.1.3	SENSORES.....	42
2.1.4	SISTEMA OFF-LINE DE REFRIGERACIÓN	43
2.2	DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA VÁLVULA MARIPOSA.....	46
2.2.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA VÁLVULA MARIPOSA.....	46
2.2.2	CARCASA DE LA VÁLVULA	48
2.2.3	DISCO DE LA VÁLVULA	49
2.2.4	SERVOMOTORES.....	51
2.2.5	CONTRAPESOS	51
2.2.6	VÁLVULA BY-PASS	53
CAPITULO 3.....		54
DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL DEL PLC		54
3.1	GENERALIDADES DEL AUTÓMATA PROGRAMABLE	54
3.2	CONFIGURACIÓN Y CABLEADO DEL PLC SIEMENS S7-300.....	58
3.2.1	FUENTE DE ALIMENTACIÓN (PS).....	59
3.2.2	MODULO DE SALIDAS DIGITALES (DO)	60
3.2.3	MÓDULO DE ENTRADAS DIGITALES (DI)	61
3.2.4	MÓDULO DE ENTRADA ANALÓGICO (AI).....	62
3.3	COMUNICACIÓN	64
3.4	PARAMETRIZACION Y CONFIGURACIÓN DEL PLC SIEMENS S7-300	65
3.4.1	CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO.....	66
3.4.2	CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO S7-300	69
3.4.3	LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN.....	74

3.5	DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL	75
3.5.1	DIAGRAMA DE FLUJO.....	90
CAPITULO 4		93
DESARROLLO DE LA INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA PARA SUPERVISAR Y OPERAR LA UNIDAD HIDRÁULICA.....		93
4.1	CARACTERÍSTICAS DE LA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA.....	93
4.2	CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE TOP SERVER.....	94
4.3	ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ HOMBRE MAQUINA.....	104
4.3.1	PANTALLA PRINCIPAL	105
4.3.2	PANTALLA DE OPERACIÓN.....	107
4.3.3	PANTALLA DE ALARMAS	109
4.3.4	PANTALLA SETUP.....	109
4.3.5	PANTALLA DE MODO DE OPERACIÓN	111
CAPITULO 5		113
SIMULACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL		113
5.1	VERIFICACIÓN DE LAS ALIMENTACIONES DEL PANEL DE LA UNIDAD HIDRAULICA.....	113
5.2	ALIMENTACIÓN DA LAS BOMBAS DE LA UNIDAD HIDRÁULICA – VCA	115
5.3	AJUSTES DEL SISTEMA HIDRÁULICO	116
5.4	VERIFICACIÓN DE COMANDOS Y ESTADOS DE LA HMI.....	118
5.6.1	MODO DE OPERACIÓN TEST	118
5.6.2	MODO OPERACIÓN LOCAL.....	120
5.6.3	MODO OPERACIÓN REMOTO	121
5.5	EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA UNIDAD HIDRÁULICA	124
5.6	EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL ACUMULADOR.....	125
5.7	MEDICIÓN DE LOS TIEMPOS DE LA VÁLVULA MARIPOSA	125
CAPITULO 6		127

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	127
CONCLUSIONES	127
RECOMENDACIONES	130
BIBLIOGRAFÍA	133
GLOSARIO	134
ANEXOS	136

RESUMEN

El proyecto que se ha desarrollado en esta tesis estudia y analiza el funcionamiento de una de las partes más fundamentales de la Central Hidroeléctrica San Francisco que son sus turbinas, además de sus componentes que la controlan para tener un sistema estable, uno de estos componentes de control es la central óleo hidráulica que es la encargada de brindar y mantener un rango de presión necesario en el sistema para que el regulador de velocidad que gobierna las turbinas tenga la presión suficiente para mover los álabes en el sentido de apertura o cierre de acuerdo al comando ejecutado por el regulador electrónico de velocidad cuando la unidad necesite subir o bajar carga de acuerdo a las exigencias del sistema nacional interconectado.

El control que se desarrolla en esta tesis es el encargado de mantener la presión a través del manejo de las bombas que posee la central óleo hidráulica, para lo cual controla en forma intermitente las válvulas que están a la salida de las bombas para mandar la presión al tanque de reserva o al sistema presurizado; otra de las funciones que tiene este sistema de control es el de brindar las condiciones necesarias para la apertura de la válvula mariposa y el By-pass durante el arranque de la turbina. Todo esto es monitoreado por una HMI de donde se puede visualizar y cambiar las principales variables que intervienen en el control, además de poder manejar manual y automáticamente todo el sistema que compone la central óleo hidráulica.

Adicionalmente, la HMI permite mostrar todas las alarmas activas consecuencia de cualquier falla presente por alguna irregularidad en el sistema de control.

Otra de las acciones importantes que se desarrolla en el control es el de manipular la válvula que permite inyectar aire al tanque de presión cuando el sistema está con nivel muy alto de aceite.

Como una ayuda de mucha importancia para el personal de mantenimiento se totaliza las horas de funcionamiento de cada una de las bombas para su respectiva intervención cuando se requiera un mantenimiento mayor de los equipos en referencia.

PRESENTACIÓN

En la actualidad la Central Hidroeléctrica San Francisco dispone de un PLC (Programador Lógico Controlable) exclusivo programado por la empresa REIVAX. Este PLC controla en forma automática la unidad óleo-hidráulica, por medio de reguladores de velocidad, que controla una válvula que permite abrir o cerrar los álabes ya sea para el control de potencia o para acciones de mantenimiento en la turbina. Este sistema es cerrado y el personal de mantenimiento no puede realizar ninguna modificación al mismo cuando requiere hacer cambios de acuerdo a sus necesidades.

Para evitar fallas en el sistema que conlleva a una parada de la central, y además tener la dependencia total de la transnacional REIVAX, se ha diseñado un sistema de control automático en base a un PLC comercial y de fácil adquisición en el mercado local, que es el SIEMENS S7- 300. Una de las ventajas de esto, es que se pueda realizar mejoras en el sistema de control ya que es un sistema abierto y adicionalmente existen muchos profesionales nacionales que tienen un cabal conocimiento de la programación en Step 7.

Adicionalmente a esto, la HMI (Interfaz Hombre Máquina) está diseñada con el software INTOUCH de WONDERWARE. Esta HMI está estructurada de manera similar a la actual HMI que existe, la razón de esto es evitar confusión entre los operadores en el caso de un reemplazo ya sea por daño o por decisión de los Directivos de Hidropastaza en querer implementar lo desarrollado en este trabajo, que les permitiría seguir operando sin realizar cambios en el cableado del tablero y la confiabilidad del sistema implementado sería muy alta.

Este proyecto que se ha desarrollado, brinda la posibilidad de tener un sistema de respaldo en el caso de falla del sistema actual que se encuentra operando, lo que permitiría una rápida e inmediata solución sin tener que hacer cambios en el cableado de la lógica tradicional de relés y contactores que está implementado en el tablero de la unidad hidráulica, además éste cambio en caso de falla del sistema actual, ahorraría al país alrededor de USD 113.000 diarios, que es el costo por un día de no operación de la Central Hidroeléctrica San Francisco.

CAPITULO 1

DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD Y LAS TURBINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN FRANCISCO

1.1 INTRODUCCIÓN

La Central Hidroeléctrica San Francisco se encuentra localizada en la región central del Ecuador, en las estribaciones de la cordillera de Los Andes, en la cuenca media del río Pastaza, inmediatamente aguas abajo de la central Agoyán, la Central Hidroeléctrica San Francisco al estar ligada con la Central Agoyán, recibirá todas sus aguas turbinadas.

El caudal de diseño de la Central San Francisco es de $116 \text{ m}^3/\text{s}$ y una caída neta de 200 metros. Las principales obras de ingeniería civil son subterráneas, debido a las características topográficas de la zona y a las condiciones del macizo rocoso.

Las principales obras de la central hidroeléctrica son las siguientes:

Obras civiles:

- Túnel de interconexión revestido de hormigón de 6,4 m de diámetro interior, que permite desviar las aguas turbinadas en la central Agoyán hacia la Cámara de Interconexión.
- Cámara Subterránea de Interconexión de 10 m de ancho, 20 m de alto y 100 m de longitud.
- Túnel de carga de 11,2 Km de longitud compuesto por dos secciones distintas en función del método de excavación de cada tramo, así:

- a) Tramo en excavación convencional con sección tipo herradura de 7,50 m de diámetro.
 - b) Tramo en excavación con un TBM (topo mecánico) con sección circular de 7,0 m de diámetro.
- Chimenea de equilibrio superior constituida por un túnel inclinado de 545 m de longitud, 10% de pendiente y sección tipo baúl con 5,6 m de ancho y 5,6m de altura, provisto de revestimiento de hormigón en su interconexión al túnel de conducción. Su tramo superior será vertical, circular con 3 m de diámetro con 58 m de altura.
 - Tubería de presión vertical, de 171 m de desnivel. El tramo vertical inferior y curva inferior, con cerca de 86 m de longitud y 5 m de diámetro, serán blindados en acero y termina en un bifurcador simétrico con dos ramales de 3,5 m de diámetro y 33 m de longitud cada uno. El tramo superior horizontal, curva superior y vertical, con 192 m de longitud y 5,7m de diámetro no blindado, será revestido de hormigón.
 - Casa de máquinas en caverna, de 76 m de largo, 19 m de ancho y 42 m de altura, en la que se instalarán dos turbinas Francis. En la misma caverna se alojará la subestación en SF6 (Hexafluoruro de azufre), éste gas es cinco veces más pesado que el aire y es incoloro, inodoro y no tóxico, la rigidez dieléctrica del SF6 es en promedio 2,5 la del aire.
 - Chimenea de equilibrio inferior de 24 m de largo, 7,5 m de ancho y 24 m de altura, y túnel de restitución con 234,6 m de longitud y 6,4 m de diámetro, para descargar las aguas al río Pastaza, en la cota 1275,00 m.s.n.m.

Equipo Mecánico:

- a) Dos turbinas hidráulicas tipo Francis de eje vertical de 115 MW de potencia hidráulica individual, generando 212 MW de Potencia Eléctrica Nominal de la Central.
- b) Dos reguladores de velocidad tipo PID, electrohidráulicos.
- c) Dos válvulas tipo mariposa biplana de diámetro 3000 mm.
- d) Un puente – grúa de 210 ton., de capacidad en el gancho principal y 15 ton., para el gancho auxiliar.
- e) Sistemas auxiliares para enfriamiento, sellos, drenaje, agua potable, ventilación, aire acondicionado, aire comprimido, sistema contra incendio.

Equipo Eléctrico

- a) Dos generadores sincrónicos trifásicos con factor de potencia inductivo de 0,9, 13,8kV, 60Hz, incluidos los sistemas de excitación, regulación de tensión, enfriamiento y contra incendios.
- b) Dos sistemas trifásicos de barras de generador y equipo de 13,8 kV.
- c) Dos transformadores trifásicos elevadores, 13,8Kv/230 Kv y accesorios, incluyendo sistema contra incendios.
- d) Una subestación de 230 Kv, en SF6, esquema de doble barra, completa, con sus accesorios.

- e) Dos circuitos trifásicos de cables de 230 Kv, con aislamiento de XLPE (Polietileno reticulado estrujado), incluidos sus accesorios y los elementos de anclaje, fijación y soporte.
- f) Dos posiciones de arranque de líneas de transmisión de 230 Kv y accesorios (pórtico doble).
- g) Instrumentación de mando, supervisión, medición y protección convencionales para las dos unidades generadoras, la subestación de 230 Kv, las líneas de transmisión y sus equipos auxiliares; y el equipo de control remoto a instalarse en la Central Agoyán.
- h) Sistema de Telecontrol consistente en computadoras de proceso en tiempo real, con sus periféricos respectivos, estaciones terminales remotas y equipos auxiliares a ser instalados en las centrales San Francisco, incluido el sistema de transmisión digital por fibra óptica.
- i) Equipos y dispositivos para la alimentación de equipos auxiliares, en corriente alterna y continua, incluido el grupo diesel de emergencia (750KVA, 480VAC, 60Hz), de la Casa de Máquinas; y los sistemas de iluminación, comunicación y telemando.
- j) Cableado eléctrico para los circuitos de fuerza y para los sistemas de mando, supervisión, protección, señalización, comunicación, iluminación y tomacorrientes, soportes, ductos, bandejas.
- k) Sistemas de telecomunicación, teletransmisión de datos, busca personas.

- l) Sistema de conexión a tierra de neutros y cubiertas de equipos.

Equipo Hidromecánico

- a) Blindaje de la tubería de presión, codo, bifurcador y ramales del distribuidor.
- b) Compuertas planas con ruedas: Descarga de la central Agoyán, cámara de interconexión y túnel de restitución.
- c) Una válvula tipo mariposa biplana de diámetro 3000 mm y una válvula By Pass .
- d) Compuertas de cierre para las chimeneas inferiores San Francisco.
- e) Tapón y blindaje para la ventana de construcción No. 4.
- f) Sistemas de mando óleo hidráulicos y eléctricos para el control de las compuertas.
- g) Grúa pórtico y monorraíles.

1.2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA TURBINA FRANCIS

1.2.1 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA TURBINA

Las turbinas que se utilizan para el Proyecto Hidroeléctrico San Francisco son tipo Francis de eje vertical. Estas turbinas son conocidas como turbinas de sobrepresión por ser variable la presión en las zonas del rodete, o de admisión

total ya que éste se encuentra sometido a la influencia directa del agua en toda su periferia.

La aplicación de este tipo de turbinas es muy extenso, pueden emplearse en saltos de distintas alturas dentro de una amplia gama de caudales entre 2 y 200 m³/s aproximadamente, para el caso de la Central San Francisco, el caudal es de 116 m³/s y la caída neta es de 200 metros.

Las Turbinas Francis tienen, como característica especial, que son de rendimiento óptimo, pero solamente entre unos determinados márgenes, los cuales están entre 60 % y 100 % del caudal máximo. Esta característica es una de las principales razones por la que se disponen varias unidades en cada central, con el objeto de que ninguna trabaje, individualmente, por debajo de valores del 60 % de la carga total.

1.2.2 COMPONENTES DE LA TURBINA

Las características técnicas básicas de las Turbinas instaladas en la central hidroeléctrica se las enumera en la tabla 1.1:

TABLA 1.1	
CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA	
Tipo de la Turbina	Francis Simples
Cantidad de Turbinas	2
Diámetro del rotor de la Turbina	2,45 m
Diámetro del rodete en la salida	3,03 m
Número de Alabes del Rodete	13 álabes
Número de Alabes Directrices	20 álabes directrices
Rotación de la Turbina	327,27 rpm
Rotación de disparo	548 rpm
Potencia nominal	115 MW
Caída neta nominal	213 m
Eficiencia máxima	95,5%
Sentido del Giro	Horario (Visto de arriba)
Eje	Vertical
Número de cojinetes de la turbina	1

Tipo de cojinete	Cojinete guía autolubrificante tipo casquillo.
Diámetro de la Válvula Mariposa	3,0 m
Tipo de accionamiento	Accionamiento por los servomotores y cierre por contrapeso
Densidad del agua	0,99985 g/cm ³
Aceleración de la gravedad	9,777m/s ²
Temperatura del agua	16°C

Para un mejor entendimiento de las características técnicas se va a describir individualmente los principales componentes de las turbinas instaladas en la central hidroeléctrica.

- Cámara espiral.
- Distribuidor.
- Rodete.
- Tubo de succión.
- Eje.
- Equipo de sellado del eje de turbina.
- Cojinete guía de turbina.
- Cojinete de empuje.

1.2.2.1 CÁMARA ESPIRAL

La cámara espiral está en el tramo final de la tubería de presión y después de la válvula mariposa, está constituida por la unión sucesiva de secciones, las mismas que se unen con soldadura de obra y cuyos ejes de las secciones forman una espiral.

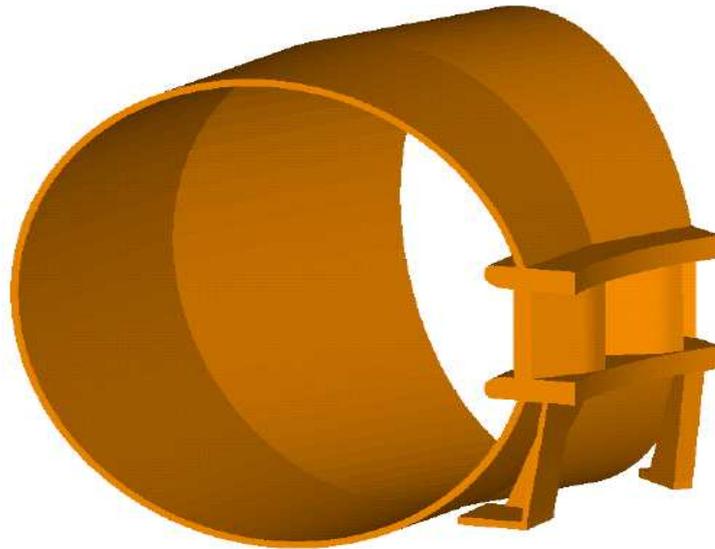


Figura 1.1 Sección de la cámara espiral

Desde el acoplamiento con la tubería forzada, donde el diámetro interior de la sección correspondiente alcanza su valor máximo, la sección interior va decreciendo paulatinamente hasta que se realiza el cierre de la cámara sobre sí misma, cuyo diámetro interior se reduce considerablemente. Esta disposición de las secciones se las conoce como el caracol de la turbina, en el que, debido a su diseño, se consigue que el agua circule con velocidad aparentemente constante y sin formar torbellinos, evitándose pérdidas de carga.

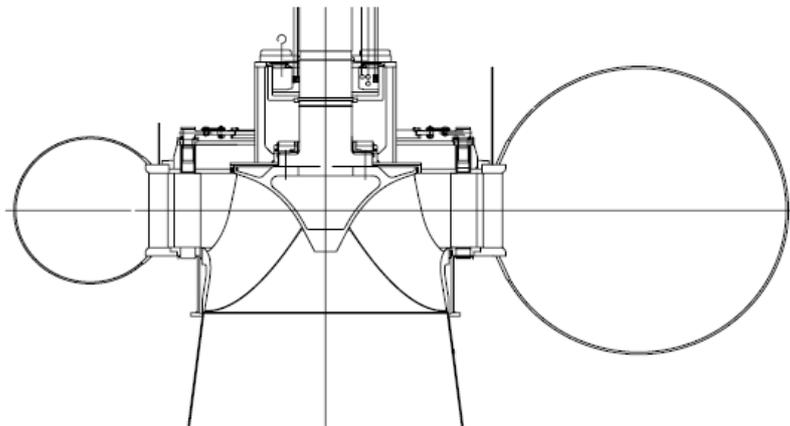


Figura 1.2 Corte de la cámara espiral

En la zona periférica interna, totalmente concéntrica con el eje de la turbina, y siguiendo planos paralelos, perpendiculares a dicho eje, se encuentra una abertura circular, formando un anillo, cuyos extremos están enlazados perpendicularmente por una sucesión de álabes fijos, situadas equidistantemente unas de otras, a lo largo del contorno de la circunferencia descrita por dicho anillo, a través del cual, y por toda su periferia, fluirá el agua, cubriendo la totalidad de los orificios así formados. La zona mencionada, se suele denominar pre distribuidor.

El número de álabes fijos es variable de acuerdo con el diseño de la turbina, para el caso de central Hidroeléctrica San Francisco el número de álabes es de 13.

El pre distribuidor es parte integrante de la cámara espiral, está formado por anillos superior e inferior rígidamente ínter ligados por medio de álabes fijos que tienen la forma y arreglo adecuados para orientar el flujo de agua para los álabes directrices e introducir un mínimo de pérdida de carga.

En el pre distribuidor están previstos dos agujeros a través del cuerpo de dos álabes fijos más cercanos a la entrada de la caja espiral, que permiten el drenaje por gravedad del pozo turbina. En caso de obstrucción de los agujeros existe también sistema de control de nivel de agua que comanda el arranque y parada de una bomba eléctrica auto-cebado para control de inundación del pozo.

Dada la curvatura y orientación de los álabes fijos, se consigue que la proyección del agua salga dirigida casi radialmente, hacia el centro del espacio circular limitado por el anillo mencionado.

Para acceso a la caja espiral existe un agujero de hombre estanco completo (man hold), con dos soportes, sellos y pasadores, tornillos de fijación. La tapa del agujero de hombre está articulada para abrir hacia afuera de la caja espiral.

A continuación, en la figura 1.3, se puede apreciar la cámara espiral con cada una de las secciones que la componen

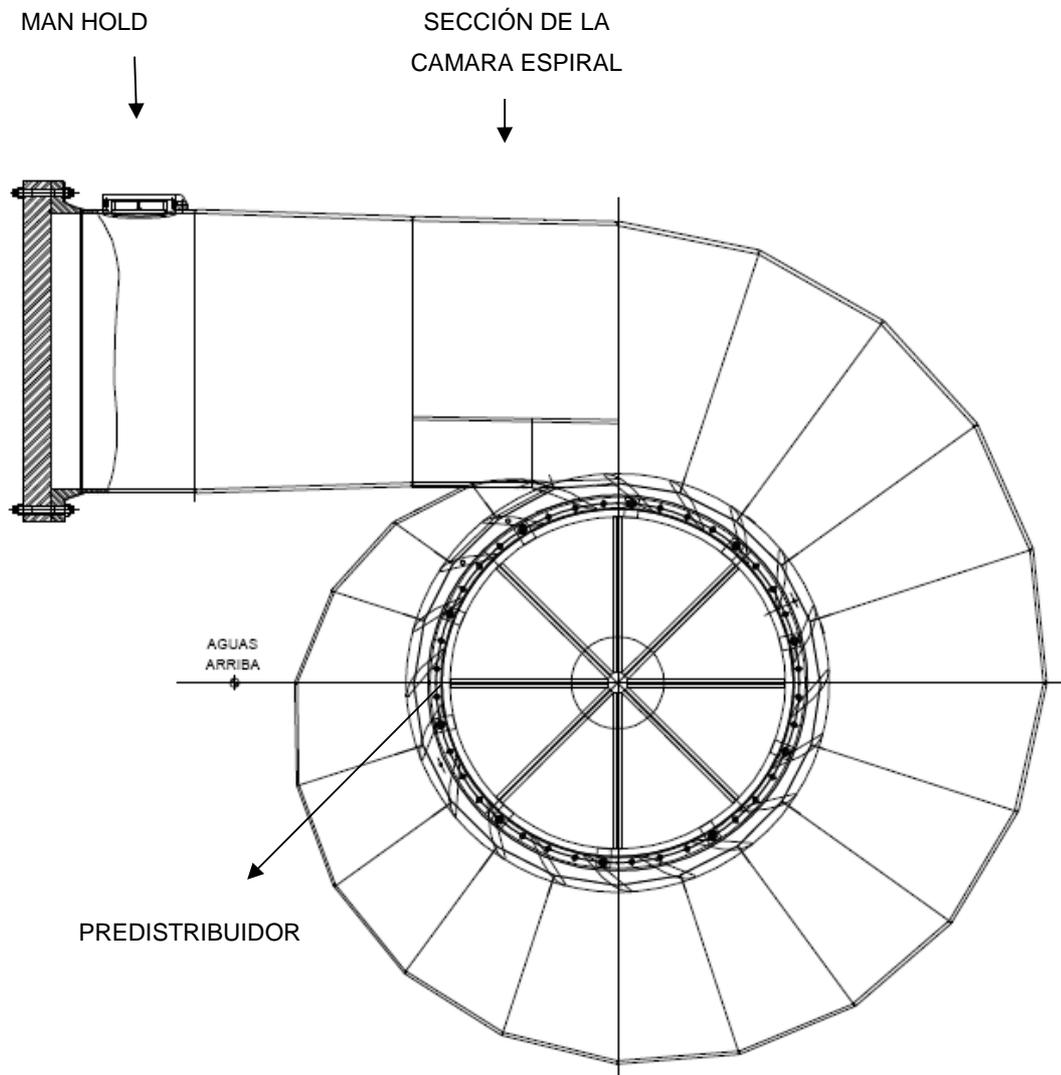


Figura 1.3 Vista superior de la cámara espiral

1.2.2.2 DISTRIBUIDOR

El distribuidor está formado por un determinado número de álabes móviles, cuyo conjunto constituye un anillo que está situado concéntricamente y entre las mismas cotas en altura que el pre distribuidor, descrito al exponer la cámara espiral, siendo en definitiva camino continuado del agua en su recorrido hacia el centro de la turbina.

Su función es la de distribuir y regular o cortar totalmente, el caudal de agua que fluye hacia el rodete.

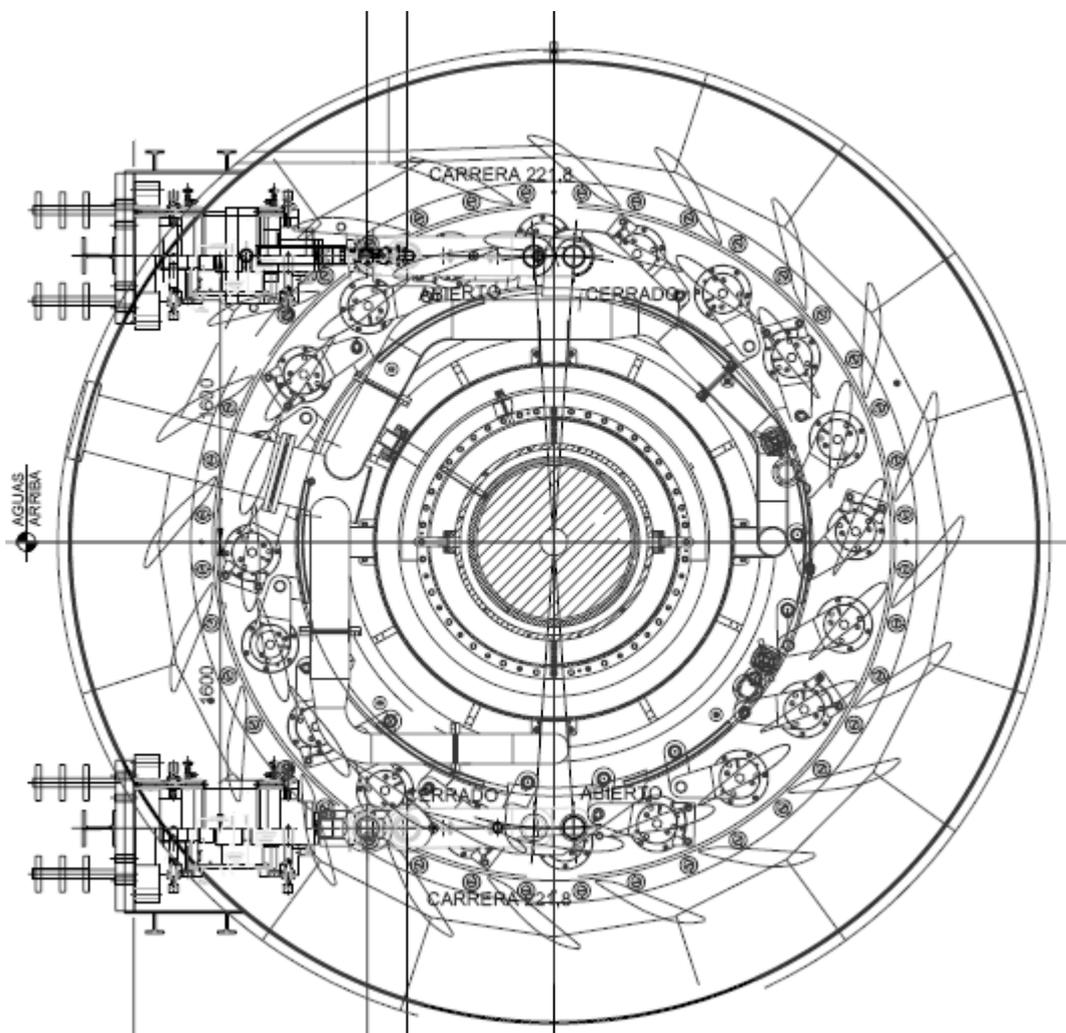


Figura 1.4 Vista superior del distribuidor

En la figura 1.4 se muestran los componentes detallados del distribuidor los cuales se van a describir a continuación.

Alabes directrices

Los álabes directrices sirven para regular el caudal de agua que entra en el rodete. Cada uno de los álabes directrices, al unísono con los demás, puede orientarse, dentro de ciertos límites, al girar su eje respectivo, pasando de la posición de cerrado total, cuando están solapadas unas palas sobre otras, a la

de máxima apertura que corresponde al desplazamiento extremo, como se muestra en la figura 1.7.



Figura 1.5 Fotografía álabes directrices

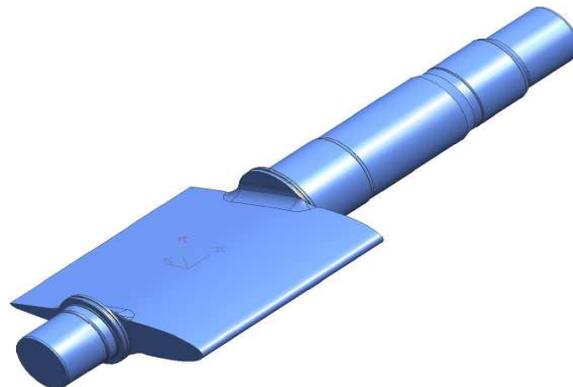


Figura 1.6 Figura álabe directriz

El conjunto de álabes directrices del distribuidor se acciona por medio de un anillo móvil, al que están unidas todos los álabes directrices, y éste anillo móvil a su vez está accionado por el regulador de velocidad de la turbina.

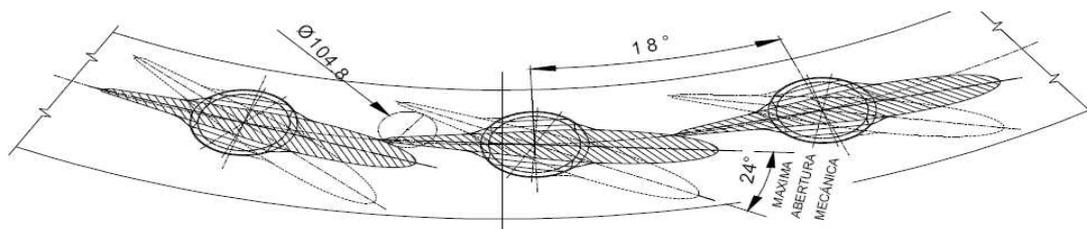


Figura 1.7 Vista superior de los alabes directrices

Servomotores.

Los álabes son girados por medio del mecanismo de regulación con anillo de regulación actuado por dos servomotores trabajando en direcciones paralelas y opuestas, cada uno de los cuales es accionado por aceite a presión según órdenes recibidas del regulador. El mecanismo de regulación tiene palancas, manivelas, ejes de conexión en concepción con refuerzo estructural en planchas de acero carbono soldadas.

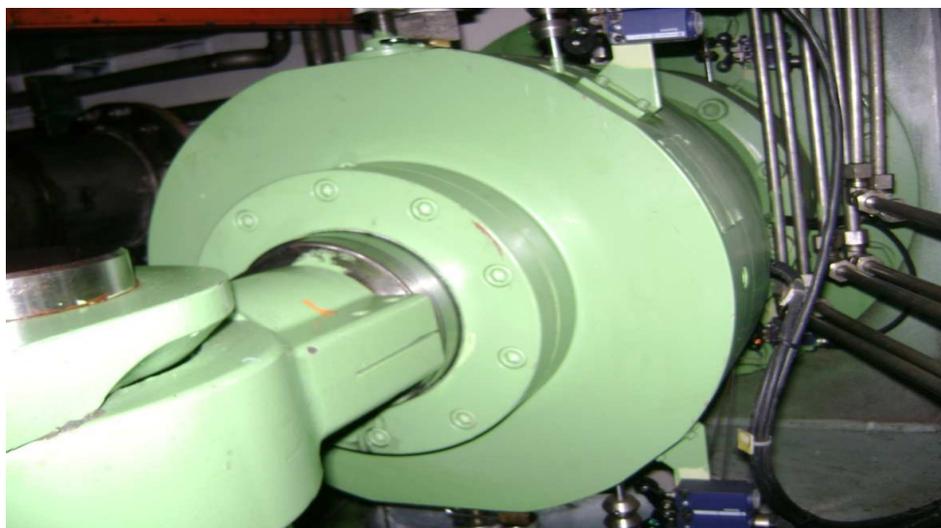


Figura 1.8 Fotografía servomotor

1.2.2.3 **RODETE**

El rodete es una de las piezas fundamentales de la turbina aquí es donde se transforma la energía y la presión del agua en trabajo; es decir, donde se obtiene la energía mecánica deseada.

Su constitución consta de un núcleo central, alrededor del cual se encuentra dispuesto un número determinado de palas de superficie alabeada, equidistantemente repartidas y soldadas al mismo, formando pieza única en bloque por fundición o soldadura, es decir, sin uniones ni fijaciones accesorias.

El rodete que se utiliza en la central San Francisco es de acero inoxidable tipo ASTM A743 grado Ca6Mn, cuyo diámetro en la salida es 3,03 m., posee 13 álabes los que fueron soldados a la corona y acoplado al eje por medio de acople con bridas y pernos pre-tensados.

El diseño permite el movimiento vertical del conjunto, sin desarme del eje, lo suficiente para permitir el desarme del cojinete de empuje y la aplicación de los gatos de freno del generador, y prevee aún más que el rodete pueda soportar el peso del eje, cuando este conjunto está apoyado en el anillo de salida durante el montaje o mantenimiento.

Algo que hay que tener muy en cuenta es que experimentalmente, se ha establecido que el número de álabes del rodete debe de ser diferente al de álabes directrices, ya que, en caso contrario, se producirían vibraciones al coincidir en el espacio ambos conjuntos de álabes. El número de álabes del distribuidor suele ser primo, respecto al de álabes del rodete.

La figura 1.9 muestra como se ve un rodete en su forma original.



Figura 1.9 **Fotografía Rodete**

1.2.2.4 **TUBO DE SUCCIÓN**

El tubo de succión consiste en una conducción, normalmente acodada, que une la turbina propiamente dicha con el canal de desagüe. Su trabajo consiste en recuperar al máximo la energía cinética del agua a la salida del rodete o, dicho de otra forma, aprovechar el salto existente entre la superficie libre del agua y la salida del rodete.

El tubo de succión es totalmente blindado con planchas de acero al carbono a partir de la salida del rodete hasta la sección donde la velocidad del flujo de agua en la turbina está bajo 6 metros por segundo.

El blindaje del tubo de succión tiene refuerzos con anillos y refuerzos estructurales en la superficie externa con previsión de buen anclaje al hormigón. El tubo de succión está diseñado para soportar, después de embebido en el hormigón, la máxima presión externa correspondiente al nivel aguas abajo cuando el tubo de succión está vacío. Además está previsto con puerta de hombre (man hold) abriendo para el exterior del segmento de

inspección con giro según eje vertical y con sello de empaquetadura tipo cordón.

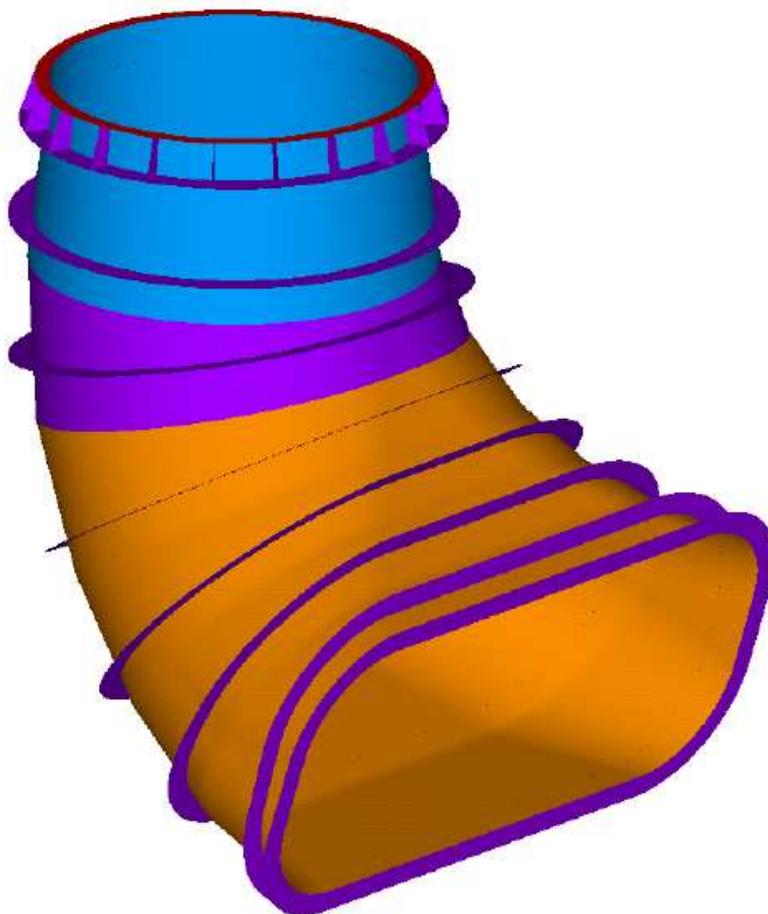


Figura 1.10 Figura del tubo de succión

1.2.2.5 EJE DE LA TURBINA

El eje de la turbina, fabricado en acero forjado tipo ASTM A668 clase D, tiene bridas integralmente forjadas en ambos extremos para acople directo al rodete de la turbina y eje generador por medio de pernos pré-tensados y aplicación de carburo de silicio para proporcionar transmisión de momento de fuerza por fricción. El eje turbina - generador tienen un agujero central en todo el largo, para permitir una inspección visual de la superficie interna.



Figura 1.11 Fotografía eje turbina

El eje está compuesto de una brida de acople turbina, y otra brida en la extremidad superior, para conexión con el eje del generador.



Figura 1.12

Brida superior del eje

En la figura 1.12 se observa la disposición de la brida en la extremidad superior

1.2.2.6 SELLO DEL EJE

El sello del eje, como su nombre lo indica, está diseñado para sellar en forma definitiva e impedir el paso de agua que pudiera fluir desde el rodete hacia el exterior de la turbina, por el espacio existente entre la tapa de la misma y el eje.

La superficie de sello en contacto es de material inoxidable endurecido y tiene superficie continua alrededor del eje después de su instalación. Las uniones entre los segmentos que forman los anillos están diseñadas de forma que minimiza las fugas. Todas las partes del sello, particularmente los anillos y la superficie de sello, son reemplazables.

El cuerpo externo del sello del eje tiene tubería de drenaje por gravedad, conectada directamente al pozo de drenaje de la casa de máquinas. Para permitir la desconexión de la inyección de agua limpia del sello o para disminuir las fugas cuando en situación de extremo desgaste del anillo de polietileno, está diseñado un sello de parada o emergencia ubicada debajo del sello principal.

Este sello de parada o emergencia tiene anillo de goma armada alrededor de la brida inferior del eje turbina y expandida comprimiendo su diámetro interno contra la brida del eje, a través de aire comprimido de servicio de la casa de máquinas por accionamiento manual de la válvula de aislamiento del aire. El sello de parada puede ser utilizado solamente con la turbina parada. En caso de falla de operación la válvula de aislamiento está señalizada por medio un límite de carrera que bloquea el arranque de la unidad en caso de que la válvula de aislamiento no se queda en su posición cerrada.

1.2.2.7 COJINETE GUÍA

Está situado lo más cerca posible del rodete, sobre la tapa superior de la turbina, inmediatamente por encima del sellado del eje. Es tipo casquillo bipartido, trabajando en baño de aceite, con carcasa rotativa y circuito interno entre las cubetas inferior y superior por centrifugación y sistema de circulación forzada a través de la central unidad hidráulica de lubricación. El cojinete guía fue diseñado de forma que permita el fácil acceso al sello del eje. La tapa superior del cojinete es removible, estanque para aceite y sellada contra objetos extraños. Conexiones para aireación, llenado y drenaje de aceite se suministran para conexión a través de rosca.

El sistema de enfriamiento de aceite del cojinete está diseñado con intercambiador de calor interno con circulación externa de agua, de fácil desmontaje y mantenimiento y tiene capacidad suficiente para enfriar el aceite bajo cualquier situación de operación normal de la unidad.

El cojinete tiene un medidor nivel de aceite en la cubeta inferior rotativa que permite la identificación por nivel, cuando la unidad está parada, y detecta pérdidas por fugas de aceite o eventual contaminación por agua del aceite. Como es una concepción de cubeta rotativa, la medición de nivel de aceite dentro de la cubeta inferior no es posible cuando la unidad está en operación. El nivel deberá ser verificado con frecuencia semanal con el objetivo de proteger el cojinete contra daños y perjuicios provenientes de la contaminación del aceite por agua o falta de aceite. El cojinete tiene llave de control de nivel para señalización de condición de arranque. Cuando el nivel está superior al máximo especificado o más bajo que el mínimo especificado no está permitido el arranque.

1.3 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL REGULADOR DE VELOCIDAD

1.3.1 GENERALIDADES

Para poder entender el funcionamiento del regulador de velocidad, primero se debe saber cuando y porque su utilización. Debido a que se producen variaciones en la carga del generador es decir, según aumente o disminuya el par resistente que actúa sobre la turbina, ésta tenderá respectivamente a reducir o aumentar el número de revoluciones con que estuviese en funcionamiento normal antes de producirse la variación de carga. En tales condiciones, el funcionamiento de la turbina sería totalmente inestable, llegando a parase al aumentar la carga y a embalsarse cuando ésta disminuyese.

La velocidad con la que gira las turbinas es conocida como velocidad de sincronismo. Esta velocidad depende fundamentalmente de la frecuencia a que ha de ser suministrada la corriente eléctrica, en el Ecuador este valor es de 60 Hz, y del número de pares de polos del rotor, que para la Central San Francisco es de 11. Además existen otros factores como son altura del salto de agua, potencia, tensión generada, etc.

La fórmula que determina el número de revoluciones de funcionamiento normal es la siguiente:

$$n = \frac{60 * f}{P}$$

Donde:

n = número de revoluciones por minuto (r.p.m.).

f = frecuencia del sistema 60 Hz.

P = número de pares de polos del alternador.

60 = constante de tiempo

Con esta fórmula, teniendo los datos se puede calcular la velocidad normal de funcionamiento de las turbinas Francis de la Central:

Datos:

$$f = 60$$

$$n = \frac{60 * f}{P}$$

$$n = \frac{60 * 60}{11}$$

$$n = \frac{3600}{11}$$

$$n = 327,27 \text{ rpm}$$

Teniendo en cuenta éste valor calculado y sabiendo que puede producirse una desconexión brusca del grupo respecto de la red, se puede producir una sobre velocidad, que es la velocidad máxima que alcanza el rodete. Por consiguiente controlar la velocidad del rodete es la función que desempeña un regulador de velocidad que se analizará detenidamente a continuación.

1.3.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

El Regulador de Velocidad que se utiliza en la Central Hidroeléctrica San Francisco es el modelo RVX 300 que es uno de los principales productos que ofrece la empresa REIVAX.

Este regulador de velocidad es totalmente digital, fue desarrollado en base a la CPU CPX2000, razón que le agrega una gran versatilidad. Permite su expansión tanto en hardware cuanto en software, lo que posibilita incorporar en el regulador nuevas funciones.

El RVX300 posee en su configuración básica dos unidades de procesamiento central (CPU), dedicadas para tareas de control, una actuando como principal y la otra secundaria con interfaces de adquisición de señales analógicas, digitales y una unidad de interfaz hombre máquina, tipo Touch Screen, y una placa multiseriale que sirve como interfaz entre el CPU y el mundo externo.

El sistema de regulación de velocidad está constituido de dos reguladores independientes, ambos operando con el mismo algoritmo de control. En caso de falla del CPU que esté en operación, la otra CPU podrá asumir el control sin discontinuidad operacional, lo que significa que la unidad generadora se mantendrá estable, en el mismo punto de operación en que se encontraba antes de la conmutación. Esta arquitectura de mantener un sistema redundante aumenta la confiabilidad del Regulador de Velocidad como un todo, y además permite que se procese el mantenimiento y/o reparación de módulos electrónicos sin necesidad de parar la máquina. La transferencia de un CPU a otro, ocurre de dos maneras, automática, en caso de una contingencia en el CPU que esté en operación, o manualmente, por mando manual a través de la HMI, instalada en la parte frontal del panel del Regulador.

Se debe tener muy en cuenta que la interfaz hombre máquina (HMI) no participa del sistema de control de la unidad generadora, razón por la cual en caso de desconexión o contingencia de la HMI, el regulador de velocidad continuará operando normalmente.

1.3.3 VARIABLES DE CONTROL

El sistema de Regulación de Velocidad dispone del control de las siguientes variables:

Velocidad: esta variable es controlada cuando la unidad generadora no está sincronizada.

Potencia activa conjugada al estatismo de potencia: ésta variable solo se encuentra disponible después de sincronizado el generador, la referencia

pasará de velocidad a potencia activa y el regulador ajustará la carga generada al valor de referencia.

Potencia activa conjugada al estatismo de posición: de igual manera que la variable anterior ésta solo está disponible después de sincronizado el generador, la referencia pasará de velocidad para posición y el regulador ajustará la posición de apertura del distribuidor al valor de referencia.

El modo de operación por potencia es el modo preferencial de operación y estará activo siempre que la máquina esté sincronizada.

1.3.4 LIMITADORES DINÁMICOS

El Sistema de Regulación de Velocidad cuenta con tres tipos de limitadores dinámicos cuya función es limitar la abertura del distribuidor. La función de cada uno de los limitadores esta descrita a continuación:

Limitador de Carga: Limita dinámicamente la abertura del distribuidor en valores ajustables en la HMI, limitando así la potencia activa generada.

Limitador de Partida 1: Limita la abertura del distribuidor durante el arranque de la unidad generadora, en valores pre-definidos en la HMI.

Limitador de Partida 2: Limita la abertura del distribuidor en valores pre-definidos en la HMI, cuando la unidad generadora está en velocidad y no sincronizada.

1.3.5 ACTUADOR HIDRÁULICO

El Actuador hidráulico sirve como etapa de amplificación mecánica de la señal de control generada por la CPU. Está compuesto básicamente por:

Válvula Proporcional;

Válvula Arranque/Parada;

Válvula de emergencia;

Filtros de aceite.

Las señales eléctricas de control, generadas en la etapa electrónica del Regulador de Velocidad, son transmitidas para la válvula proporcional. A su vez, la válvula proporcional transmite una señal hidráulica, de esta manera se controla la posición del servomotor.

1.3.6 SISTEMA DE MONITOREO DE VELOCIDAD INDEPENDIENTE

El regulador de velocidad tiene instalado internamente un Sistema de Monitoreo Independiente de Velocidad, denominado SMVI, tanto en hardware como en software y circuitos de alimentación.

El SMVI está compuesto por un controlador programable, cuatro relés de velocidad y un relé para indicación de máquina parada. Los valores de set point de velocidad de cada relé son programables y pueden ser alterados de acuerdo con las necesidades operacionales. Se dispone de contactos libres de potencial para lógica de control y automatismo de la Planta.

Este sistema está compuesto por sensores magnéticos de proximidad (pickups), que detectan las transiciones de una rueda dentada acoplada al eje de la turbina. Las señales provenientes de estos sensores son conducidas como entradas rápidas de un controlador programable, donde está implementada la lógica operacional de este sistema.

1.3.7 RELES DE VELOCIDAD

Para este sistema están previstos cuatro relés de velocidad y un relé para indicación de máquina parada. Los valores de set point de estos relés son

programables y pueden ser alterados conectando un computador de uso personal en la entrada serial del controlador programable.

El relé de velocidad RS1, velocidad igual a cero, estará activo mientras la máquina esté con la velocidad cerca de cero.

El relé de velocidad RS2: velocidad menor que 30%, será activado solamente cuando la máquina esté en proceso de parada y permaneciendo en esa condición aunque el relé de máquina parada sea activado.

El relé de velocidad RS3: velocidad mayor que 90%, estará activo mientras la máquina esté con la velocidad arriba de ese valor.

El relé de velocidad RS4: velocidad mayor que 140%, estará activo mientras la máquina esté con la velocidad arriba de ese valor.

El relé de velocidad RS6: relé de reserva ajustable vía software de programación.

1.3.8 RELÉ DE MÁQUINA PARADA

La lógica de accionamiento del relé de máquina parada considera el tiempo transcurrido entre la última señal de velocidad recibida y procesada y el tiempo real que la máquina lleva para alcanzar plenamente la condición de máquina parada, esa función es necesaria pues dependiendo de la masa inercial girante de los coeficientes de fricción involucrados y de eventuales fugas de agua a través de los espacios entre las paletas directrices podrán producir movimientos muy lentos aunque la máquina esté realmente parada.

1.3.9 RELÉS DE VELOCIDAD DEL RVX 300

Dos relés de velocidad, RV1 y RSV están disponibles para uso general. Normalmente el relé RSV es parametrizado para actuar en el regulador de

velocidad cuando ocurra una situación de sobre velocidad en la turbina. Los contactos libres de potencial de esos relés están disponibles en la bornera de interfaz del regulador de velocidad.

El relé RV1 podrá ser utilizado en conjunto con uno de los relés del sistema de monitoreo de velocidad, SMVI, formando una lógica más robusta o de confirmación de una condición operacional deseada.

1.3.10 CONDICIONES PARA REGULADOR LISTO

Para que el Regulador de Velocidad permita la partida de la turbina, es necesario que el mismo esté en estado de regulador listo. Este estado es señalado en la HMI y cuando las siguientes condiciones estén satisfechas:

- No exista falla grave en el sistema de regulación.
- El relé de bloqueo de la unidad generadora, esté en la posición de servicio.
- El relé Listo para Arrancar pone a disposición a través de la bornera, los contactos externos que pueden ser utilizados en las condiciones de pré-arranque del generador.

1.3.11 PARTIDA EN VACÍO

Las condiciones necesarias para que el regulador acepte un mando de arranque son las siguientes:

- Regulador esté señalizando “Listo para Arrancar”;
- Regulador reciba de la planta la condición de “permisible de arranque”;
- Regulador reciba un mando (pulso) de Arranque.

Las siguientes acciones serán desencadenadas:

- Solenoide de arranque será accionada por la acción externa al RVX300;
- Distribuidor es abierto aún con la posición Arranque 1;

- Cuando la rotación se aproxima al valor nominal, el regulador asume el control de la velocidad. El distribuidor cierra aún con la posición de Arranque 2.

Concluido el arranque, la velocidad de la turbina estará estabilizada en el valor nominal, y el regulador permanece en este estado, disponible para recibir en el modo remoto o en el modo Local, los mandos de Aumentar/Disminuir Referencia Carga/Frecuencia, y Aumentar/Disminuir Limitador de Abertura.

Cuando la rotación esté arriba de un determinado valor, definido en la HMI, será accionado un relé de velocidad, reservado para el Regulador de Tensión como pre-condición, necesaria mas no suficiente, para iniciar el proceso de excitación automática del generador.

Caso se quiera realizar una partida local, a través de la HMI, será necesario que la entrada permisible de arranque de la unidad esté activa y que las válvulas del sistema hidráulico sean accionadas por el automatismo de la planta. Como el regulador no tiene mando sobre ese solenoide, el regulador de velocidad aguarda la señal de la entrada digital, mando de arranque, para activar su algoritmo de arranque de la unidad.

1.3.12 SINCRONIZACIÓN DEL GENERADOR

Las entradas digitales “Aumenta y Disminuye Referencia Carga/Frecuencia del Regulador de Velocidad” serán también usadas para sincronizar la unidad generadora, el operador o el sistema de sincronización automática podrán actuar sobre esas entradas para ajustar la frecuencia del generador hasta las condiciones nominales de sincronización.

Inmediatamente después del sincronismo de la máquina se efectúan las siguientes acciones:

Los ajustes de estatismo transitorio, que se refiere a la relación temporal entre la desviación relativa de la velocidad y la desviación relativa de los álabes cuando la desviación temporal de la velocidad esta dada por el regulador. Este

estatismo transitorio será conmutado de los valores en vacío para valores en carga.

Es activado el estatismo permanente, de potencia, que se refiere a la desviación de velocidad relativa de la unidad y la apertura relativa de los álabes.

Cuando la máquina esté con velocidad nominal al vacío o sincronizada, la variable de control podrá ser conmutada de referencia de velocidad, o referencia de potencia, para Abertura del Distribuidor, seleccionando vía HMI y/o remotamente, por medio de la red de comunicación. Cuando el control ocurre por la apertura del distribuidor será señalizado en la HMI local la condición de “Operación Manual”.

Se debe tener en cuenta que siempre que la máquina sea sincronizada, la red de control que entrará en operación, automáticamente, será la red de potencia activa.

1.3.13 PARADA DE EMERGENCIA

El mando de parada de emergencia puede ser provocado por la actuación del relé de bloqueo de la unidad generadora (causas externas) y por la actuación directa de la CPU, a través del relé de Falla Grave (causas internas) o presionando el botón de emergencia instalado en la puerta del panel. El disparo del relé de bloqueo de la unidad generadora, desenergizará el solenoide de arranque provocando el cerramiento del distribuidor y consecuentemente, la reducción de la velocidad de la turbina hasta su parada. El tiempo de cerramiento del distribuidor será en velocidad máxima, determinada por la propia velocidad y caudal de la válvula distribuidora.

1.3.14 PARADA GRADUAL

El mando de parada gradual es la parada normal para el Regulador de Velocidad. Es recibido por la CPU a través de una entrada digital. La CPU, al recibir el mando de parada, lleva la referencia del Regulador (setpoint carga) gradualmente para cero, que hace que la potencia generada disminuya de acuerdo con una tasa definida vía HMI. Cuando la potencia activa sea menor que determinado valor, definido en la HMI, será accionado un relé de potencia nula. Un contacto NA (normalmente abierto) de este relé está disponible en la bornera de pasaje, y podrá ser usado para el mando de abertura del disyuntor de grupo. Concretizada la abertura del disyuntor principal, el regulador activará algoritmos de parada que conducirán la referencia de velocidad y Limitador de abertura hasta cero. Como consecuencia, la turbina tendrá su velocidad reducida, hasta su parada.

1.3.15 PARADA RÁPIDA

El mando de parada rápida, para el Regulador de Velocidad, es recibido por la CPU a través de una entrada digital. La CPU, al recibir el mando de parada, lleva la referencia del Regulador (setpoint carga) gradualmente para cero, que hace que la potencia generada disminuya de acuerdo con una tasa definida vía HMI, mayor que la tasa de la parada gradual. Cuando la potencia activa sea menor que un determinado valor, definido en la HMI, será accionado un relé de potencia nula. Un contacto NA (normalmente abierto) de este relé está disponible en la bornera de pasaje, y podrá ser usado para mando de abertura del disyuntor de grupo. Concretizada la abertura del disyuntor principal, el regulador activará algoritmos de parada que conducirán la referencia de velocidad y Limitador de abertura hasta cero. Como consecuencia, la turbina tendrá su velocidad reducida, hasta su parada.

1.3.16 SUPERVISIÓN DE FALLAS

El Sistema de Regulación de Velocidad cuenta con diversas rutinas de supervisión de fallas, para aumentar la confiabilidad del equipo. Toda la información de fallas ocurridas están disponibles al operador y al Automatismo de la Planta, siendo mantenidas activas hasta sus reconocimientos, efectuados a través del botón de Rearme en la parte frontal del cubículo de control.

La CPU de Supervisión cuenta con un registrador de eventos, almacenando casi todas las fallas del Sistema de Regulación de Velocidad. Estas fallas permanecerán señalizadas en la HMI, para el reconocimiento del operador.

Las fallas son agrupadas en dos niveles distintos: **“fallas leves”** y **“fallas graves”**. Son consideradas fallas leves todas las fallas ocurridas que no promuevan la desconexión del generador, debido a los diversos circuitos redundantes del equipo.

Son consideradas fallas graves todos los acontecimientos que promuevan el proceso de desconexión del generador, o sea, son fallas que una vez ocurridas no permiten la permanencia de la máquina en operación.

Analizado el funcionamiento de las turbinas Francis y del regulador de velocidad que gobierna el anillo de distribución donde se encuentran los álabes móviles, el siguiente paso es estudiar la central óleo hidráulico, que es la encargada de brindar la presión necesaria al sistema de regulación y apertura de válvulas para su correcto funcionamiento.

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA ÓLEO-HIDRÁULICO.

2.1 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA UNIDAD OLEO-HIDRÁULICA

Una vez analizado cada uno de los componentes de la turbina Francis y estudiado el sistema de regulación de velocidad que la gobierna, la unidad óleo-hidráulica es la encargada de actuar como un amplificador mecánico, de los comandos generados por el regulador de velocidad y controladores auxiliares, suministrando potencia compatible para el accionamiento de los servomotores del distribuidor, válvula mariposa y válvula by-pass.

La unidad óleo-hidráulica adicionalmente permite enfriar el aceite por medio de un intercambiador de calor, garantiza la filtración necesaria para tener un aceite libre de impurezas, suministra presión suficiente, acumula aceite presurizado, limita la presión del sistema y señala condiciones de falla. Teniendo en cuenta estos componentes se procede a estudiarlos en tres grupos diferentes los cuales son: *sistema de bombeo, válvulas y sensores*. El motivo de dividirlos en grupos es para facilitar y agilizar el entendimiento de la función que cumple cada uno.

2.1.1 SISTEMA DE BOMBEO

El sistema de bombeo de aceite de la unidad óleo-hidráulica está compuesto por un tanque de almacenamiento de aceite de 1,63 m de ancho, 2,516 m de

largo y 1,4 m de alto, con un volumen total de 2600 litros. Esta capacidad no debe ser inferior al 110% de la cantidad total de aceite del sistema completo de regulación. El tanque es hermético, posee un indicador del nivel de aceite y un agujero de revisión (man hold) como se observa en la Figura 2.1.

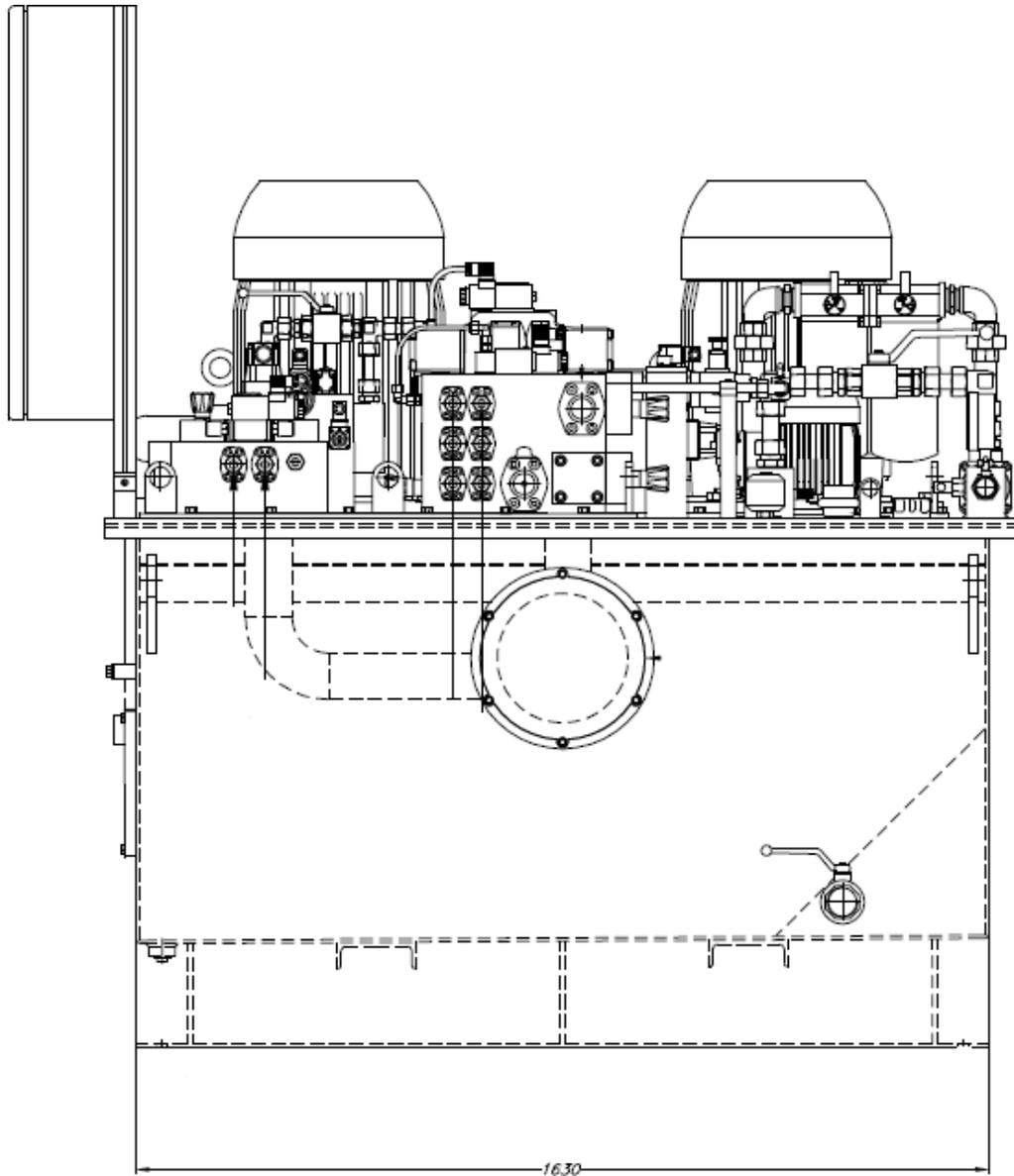


Figura 2.1 Vista frontal de la Unidad Óleo-Hidráulica

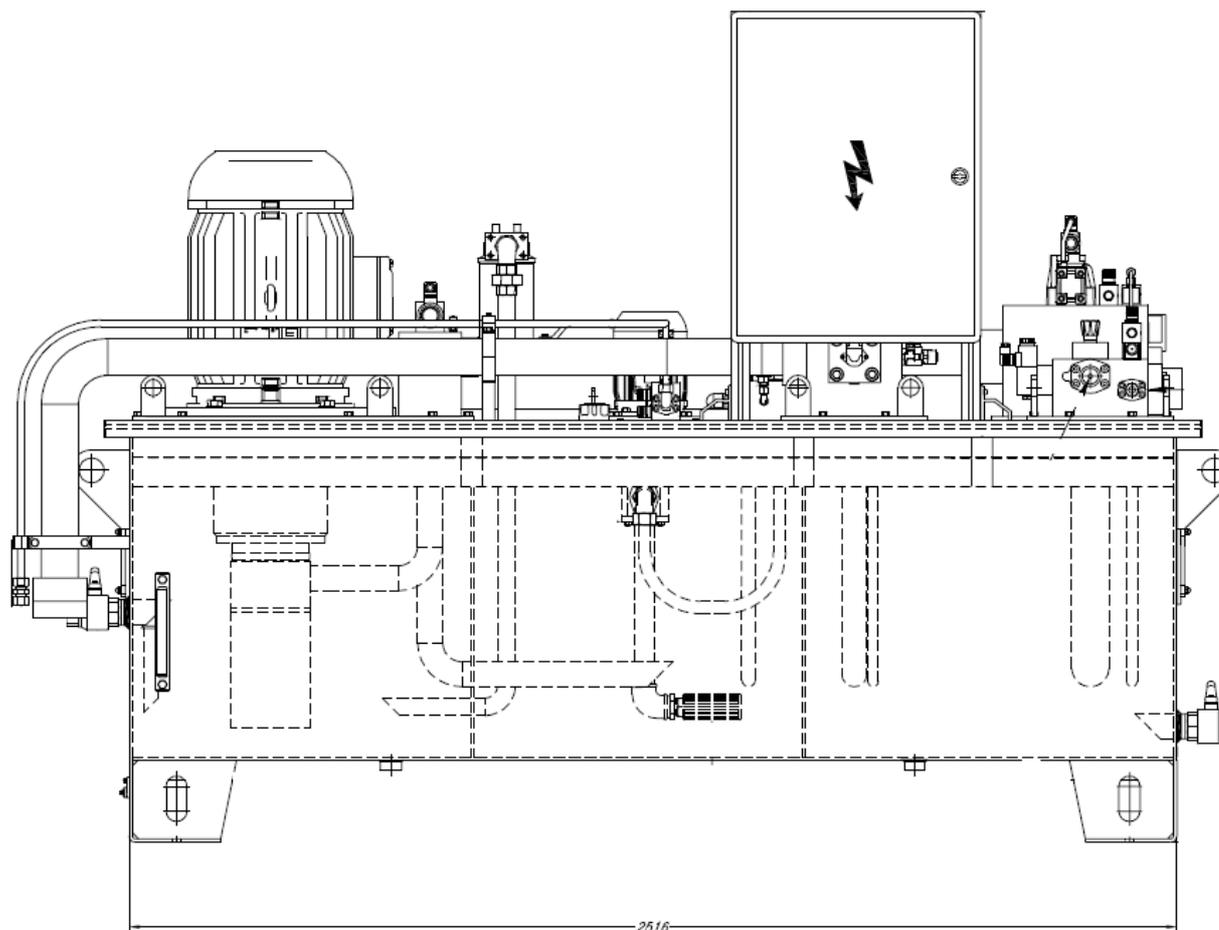


Figura 2.2 Vista lateral de la Unidad Óleo-Hidráulica

También posee un tanque acumulador de presión aire-aceite en forma de cilindro como se muestra en la Figura 2.3. La altura es 3,991 m, su diámetro de 0,805 m y un volumen de 1400 litros.

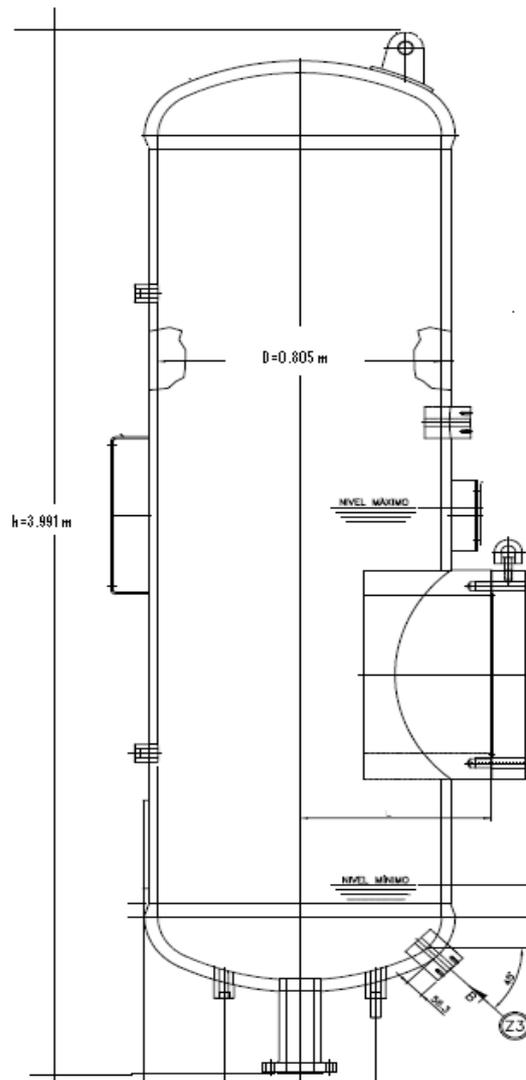


Figura 2.3 Tanque acumulador

Este sistema trabaja con dos motores eléctricos trifásicos tipo jaula de ardilla de 30 Kw cada uno, de cuatro polos, 480 VCA de alimentación a 60Hz, y 1750 rpm, cada uno de los cuales tiene su respectiva bomba. Esta es de desplazamiento variable tipo tornillo que son ideales para el bombeo de sustancias viscosas como en este caso el aceite. Su caudal es de 120 lt/min, cada bomba debe satisfacer en el mínimo 25% del caudal necesario para el desplazamiento de los servomotores del distribuidor en una maniobra de cierre o 100% del caudal consumido por la válvula mariposa. Las bombas se interconectan de forma que puedan trabajar independientemente o en paralelo.

Existen tres fuentes de alimentación para el sistema de 480 VCA que alimenta a los motores:

- Transformador de servicios auxiliares conectado a la unidad 1
- Transformador de servicios auxiliares conectado a la unidad 2
- Generador Diesel de emergencia

Los filtros que se utilizan en el sistema de bombeo son filtros de presión y filtros de succión cuya función es proteger al sistema de partículas peligrosas que puedan obstruir los orificios de las válvulas.

En el caso de los filtros de presión, el sistema tiene dos elementos de filtración, uno de servicio y otro de reserva. La transferencia de la condición de servicio para la condición de limpieza y viceversa, ocurre conmutando la válvula de tres vías situada en la entrada de los filtros. Cada filtro está equipado con presostato de indicación de saturación del elemento filtrante y válvula antiretorno. El indicador de saturación tiene la función de indicar en la sala de control, cual elemento filtrante necesita ser cambiado. Solamente uno de los filtros está en operación, el otro es reserva. En el caso de que el filtro en uso presente defecto o necesite que el elemento filtrante sea cambiado, el otro filtro puede ser prontamente colocado en acción simplemente operando manualmente la válvula conmutadora, como se puede observar en la figura 2.4.

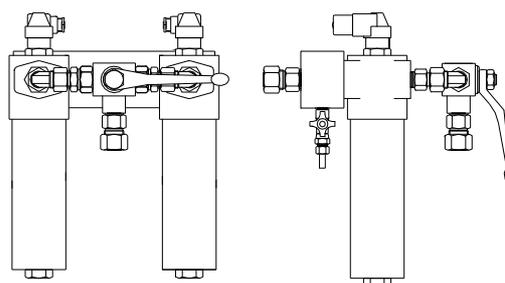


Figura 2.4 Filtro de presión

2.1.2 VÁLVULAS

En paralelo a las bombas están instaladas válvulas limitadoras de presión que sirven de seguridad, cuyo objetivo es limitar la presión máxima del circuito. Es importante observar que estas válvulas tienen solamente la función de protección, garantizando la integridad del sistema en el caso de falla en el mecanismo de control de presión de la unidad. Este tipo de válvulas permiten el flujo solo una vez que la presión ha llegado a un valor determinado.

La presión puede ser ajustada de acuerdo al valor requerido, esta operación puede ser realizada a través de un tornillo situado en la propia válvula. El sentido horario de giro del tornillo ajusta la presión máxima del circuito para valores más altos, así como al inverso cuando el tornillo es girado en el sentido anti-horario, su representación se muestra en la Figura 2.5.

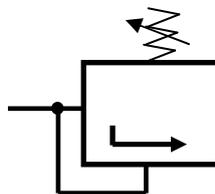


Figura 2.5 Válvula limitadora de presión

También en paralelo a cada bomba está instalada una válvula direccional que funciona como descarga. Esta válvula, en la posición abierta, permite que todo el caudal generado por las bombas sea conducido directamente al reservorio. De esta manera, se dice que las bombas trabajan en vacío, pues no alimentan el sistema con presión.

La solución empleada para el sistema de descarga fue la utilización de una válvula de dos posiciones y cuatro vías, como se representa en la Figura 2.6.

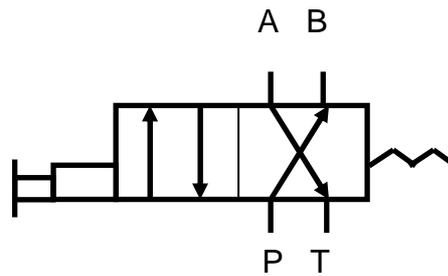


Figura 2.6 Válvula de dos posiciones y cuatro vías

La vía B está ligada a la línea de presión cuando la válvula está desactivada, o sea, el solenoide está desenergizado, la vía P está ligada a la vía A, de modo que el canal de descarga está abierto, haciendo que el sistema opere en vacío. Con la válvula actuada, la vía P estará ligada a la vía B, de modo que todo el aceite desplazado por la bomba alimentará el acumulador, colocando por tanto la bomba en carga.

En cada una de las líneas de presión de las bombas está instalada una válvula antiretorno, estas son aquellas que impiden el paso del aceite en un sentido y lo dejan libre en el contrario. Tan pronto como la presión de entrada en el sentido de paso aplica una fuerza superior a la del resorte incorporado, abre el elemento de cierre del asiento de la válvula su representación se muestra en la Figura 2.7:

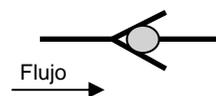


Figura 2.7 Válvula antiretorno

Una de las válvulas de gran ayuda es la de aislamiento. Esta válvula ejerce la función de aislar el sistema de bombeo o de potencia del sistema de control. Ella es el último paso en la parada de la unidad y evita una eventual entrada de aire en los servomotores. Cuando se realiza las operaciones de mantenimiento

a través del accionamiento de una válvula traba, se aísla el sistema independientemente de los comandos eléctricos. Su símbolo se indica en la Figura 2.8.



Figura 2.8 Válvula de aislamiento

2.1.3 SENSORES

El sistema óleo-hidráulico utiliza tres tipos de sensores que transmiten una señal analógica estandarizada de corriente de 4 mA a 20 mA, estos transmisores son:

- Transmisor de temperatura
- Transmisores de nivel
- Transmisor de presión

En el tanque de almacenamiento se encuentra instalado un transmisor de nivel de aceite que envía la señal analógica al sistema de control. Este transmisor funciona con tres condiciones posibles de nivel de aceite, nivel alto, nivel bajo, nivel muy bajo, en la condición última las bombas operan protegidas contra operación con nivel muy bajo de aceite, en caso de ocurrir esta condición las bombas serán desligadas de manera automática.

En el tanque de almacenamiento también se tiene instalado un transmisor de temperatura del aceite que envía una señal analógica al sistema de control. El transmisor funciona con dos condiciones; temperatura alta y temperatura muy alta. En el caso de que la temperatura del sistema óleo-hidráulico esté alta, el sistema de control activará la lógica de protección que procede con las medidas necesarias para volver a la temperatura normal de funcionamiento; sin

embargo, la probable causa de temperatura alta sea un defecto en el funcionamiento de las válvulas limitadoras de presión.

En el tanque acumulador aire aceite se encuentran instalados un transmisor de presión el cual envía una señal al sistema de control. El transmisor funciona con cuatro condiciones, presión alta, presión normal, presión baja y presión muy baja.

En el caso de que la presión del sistema esté muy baja entran a operar tanto la bomba líder como la no líder para restablecer la presión de operación del sistema, pero para una situación de presión alta, el sistema continua operando, pues las válvulas de alivio mantienen la presión del sistema dentro de los límites de seguridad, pero no se aconseja mantener el sistema operando en estas condiciones. Las causas probables de presión alta son:

- Falla del panel de control
- Ajuste erróneo de los setpoints del control de presión de las bombas

En el posible caso que la unidad óleo-hidráulica opere por mucho tiempo con presión alta, ocurrirá un calentamiento del aceite, causando actuación de la protección de temperatura. Esta es una condición de bloqueo de la turbina, para lo cual actúa el relé de disparo mecánico 86M.

En este mismo tanque también hay un transmisor de nivel que opera de manera similar al transmisor de nivel instalado en el tanque de almacenamiento.

2.1.4 SISTEMA OFF-LINE DE REFRIGERACIÓN

El sistema de refrigeración Off-line que se encuentra en la central óleo hidráulica sirve para la refrigeración de todo el aceite que se encuentra en el sistema manteniéndolo en una temperatura de 27° C que es la temperatura normal de operación.

El sistema es compuesto por un motor trifásico de 1,5 Kw, 480VCA y 60Hz, una bomba de engranaje que está dimensionada de manera que su caudal posibilite la circulación de todo el aceite del sistema hidráulico en 30 minutos, además esta provisto de un filtro de retorno, un filtro de succión, una válvula limitadora de presión, un intercambiador de calor y una llave de flujo en la salida de agua del intercambiador.

El caudal de la bomba es direccionado para el filtro, equipado con presostato de indicación de saturación del elemento filtrante, y para el intercambiador de calor, equipado con llave de flujo en la línea de agua. Para el caso en que ocurra alguna obstrucción en la línea de aceite, la válvula limitadora que esta ajustada para 8,5 bares de presión garantiza que la presión no sobrepase el valor límite del intercambiador de calor.

El intercambiador de calor debe ser capaz de disipar el calor generado al operar las bombas de regulación, descargando al reservorio a presión nominal.

El intercambiador APEMA TA-75-3-1 puede disipar 15kW de calor con un caudal de aceite de 38 lt/min. Este intercambiador satisface lo requerido con buen margen de seguridad.

Una vez analizados cada uno de los componentes de la unidad óleo-hidráulica, a continuación se presentará en la tabla 2.1 un resumen de los valores a los cuales son ajustados los dispositivos del sistema hidráulico:

TABLA 2.1			
RESUMEN			
Equipo	Función	Valor	Observaciones
Tanque de presión	Nivel normal	640 mm a 660 mm	Operación normal a 61 bares. Medido a partir del comienzo de la escala del medidor de nivel
Tanque de presión	Nivel accionamiento complementación del aire-comprimido	660 mm	Ajuste en el panel PUH, (panel de control de la unidad hidráulica)
Tanque de presión	Nivel muy alto (disparo)	725 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Nivel bajo (alarma)	220 mm	Ajuste en el panel PUH

Tanque de presión	Nivel muy bajo (disparo)	160 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Tiempo de inyección de aire-comprimido	45 seg	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Tiempo de inyección de aire-comprimido	600 seg	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión normal	61 bar	Faja de presión normal de operación
Tanque de presión	Presión accionamiento bomba líder	59 bar	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión accionamiento bomba reserva	53 bar	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión baja (alarma)	51 bar	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión muy baja (disparo)	50 bar	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión muy alta (disparo)	66 bar	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión muy baja (disparo)	50 bar	Ajuste por presostato
Tanque de presión	Presión muy alta (disparo)	70 bar	Ajuste por presostato
Tanque de almacenamiento	Presión normal en la línea de la válvula mariposa	10 bar	Ajuste por presostato
Tanque de almacenamiento	Nivel normal	240 a 250 mm	Medido desde la arista inferior del reservatorio con la válvula mariposa abierta
Tanque de almacenamiento	Nivel bajo (alarma)	200 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de almacenamiento	Nivel muy bajo (disparo)	150 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de almacenamiento	Nivel alto (disparo)	495 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de almacenamiento	Temperatura normal	27 °C	Medido con la unidad en operación normal
Tanque de almacenamiento	Temperatura alta (alarma)	45°C	Ajuste en el panel PUH
Tanque de almacenamiento	Temperatura muy alta (disparo)	50°C	Ajuste en el panel PUH

TABLA 2.2

MEDICIONES EN EL SISTEMA DE PRESIÓN DEL ACEITE

Variable del Sistema	Valor Medido	Observación
----------------------	--------------	-------------

Presión del Sistema	61 bar	-
Tiempo de Intermitencia Activa (bomba cargando acumulador)	30 s	Medido con el generador conectado en el sistema, en operación normal.
Tiempo de Repuesto en Vacío (bomba en vacío)	3 min	Medido con el generador conectado en el sistema, en operación normal.
Temperatura del aceite en operación	27 °C	Medido con el generador conectado en el sistema, en operación normal.

2.2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA VÁLVULA MARIPOSA

2.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA VÁLVULA MARIPOSA

La válvula de mariposa es el dispositivo de seguridad de la turbina, posee un mecanismo de operación que puede detener completamente el flujo del agua y cerrar el paso del agua, siempre que ocurra una orden voluntaria o automática de parada en caso de falla de la turbina. Ésta se encuentra aguas arriba de la cámara espiral en la terminación de la tubería de presión. En la Figura 2.9 se observa una válvula mariposa aun no instalada.



Figura 2.9 Válvula mariposa

La operación de abertura de la válvula será efectuada en una única etapa por medio de los servomotores instalados externamente en los bloques de las bases de las válvulas. El tiempo de abertura de la válvula es de 180 seg; sin embargo, existen condiciones para permitir la abertura de la válvula mariposa, una de ellas es que los álabes del distribuidor de la turbina estén cerrados y el by-pass abierto, esto para igualar las presiones de la válvula mariposa. La válvula by-pass sirve para compensar la diferencia de presiones adelante y atrás de la válvula mariposa. Con estos antecedentes se muestra la tabla 2.3 con todas las condiciones para la apertura la válvula mariposa.

TABLA 2.3	
CONDICIONES PARA ABRIR VÁLVULA MARIPOSA	
Presión nominal	OK
No/Cierre de emergencia	OK
Válvula de cierre de By-Pass con accionamiento eléctrico	abierta
By-Pass	cerrado
Perno seguro abierto servomotor 1	OK
Perno seguro abierto servomotor 2	OK
Abrir By-Pass	OK
By-Pass	Abierto
Válvula mariposa	cerrada
Señal de igualdad de presiones del PLC	OK
Abrir válvula mariposa	OK
Válvula mariposa	Abierta
Cerrar By-Pass	OK
By-Pass	Cerrado
VÁLVULA MARIPOSA	ABIERTA

En cambio, la operación de cierre de la válvula mariposa se debe a los contrapesos de las palancas y a la posición excéntrica del disco de la válvula respecto al eje de la tubería. Sin embargo, hay dos tipos de cierre: uno en caso de cierre normal, donde el tiempo en que la válvula se cierra es de 180 s, y un cierre de emergencia, donde el tiempo en que la válvula se cierra es de 120 s. Cada una de las condiciones de cierre tiene sus condiciones que cumplir para que este pueda ejecutarse. Las condiciones de cada uno de los cierres se muestran en las tablas siguientes:

TABLA 2.4	
CONDICIONES PARA CERRAR VÁLVULA MARIPOSA	
Válvula mariposa	abierta
Cerrar válvula mariposa	OK
Válvula mariposa	cerrada
By-Pass	cerrado
Perno seguro cerrado servomotor 1	OK
Perno seguro cerrado servomotor 2	OK
VÁLVULA MARIPOSA	CERRADA

TABLA 2.5	
CONDICIONES PARA CIERRE DE EMERGENCIA	
Condición de parada de emergencia	Activada
Cerrar válvula de By Pass	OK
Cerrar válvula de mariposa	OK
By-Pass	cerrado
Válvula mariposa	cerrada
UNIDAD	CERRADA

Cada una de las turbina Francis esta compuesta de una válvula mariposa biplana de 3 m de diámetro y los siguientes componentes adicionales:

- Carcasa de la válvula
- Disco de la válvula
- Servomotores
- Contrapesos

2.2.2 CARCASA DE LA VÁLVULA

La carcasa de la válvula es la conexión entre la tubería de presión y la turbina además de ser el soporte del disco de la válvula como se muestra en la Figura 2.10. La carcasa es bipartida para facilitar los trabajos de ensamble y

desensamble de la válvula de mariposa, así como para realizar los trabajos de mantenimiento.

La carcasa de la válvula es atornillada de manera vertical con las placas base, sobre las arandelas y los bujes de ajuste. Como existe una holgura entre las arandelas y la parte inferior de la carcasa, esta se puede mover de manera horizontal cuando ocurran movimientos en este sentido en la tubería.



Figura 2.10 Carcasa de la válvula mariposa

2.2.3 DISCO DE LA VÁLVULA

El disco de la válvula ha sido construido con fundición y placas de acero, y unidos mediante soldadura. Los ejes del disco han sido soldados como parte integral de disco de la válvula como se observa en la Figura 2.11.

Los ejes del disco son sellados con empaques que permiten evitar fugas al exterior, los sellos del disco de la válvula, se encuentran montados en la

periferia del disco y su función es la de mantener un sellado hermético junto con el asiento del sello de la carcasa como se puede observar en la Figura 2.10. Cada sello esta compuesto de un sello de goma y un anillo pisasello, fijados fuertemente al disco mediante tornillos inoxidable.

En posición cerrada, los sellos permanecen comprimidos contra la superficie del asiento del sello. El sello principal del disco consta además de arandelas y bujes de ajuste, los cuales se modifican para aumentar o reducir la compresión sobre el sello en la periferia según se requiera.



Figura 2.11 Disco de la válvula mariposa

Cuando la válvula esta cerrada, es posible reajustar el sello de operación desde el lado aguas abajo de la válvula. La reposición del mismo se puede hacer, sin vaciar la tubería de agua.

2.2.4 SERVOMOTORES

El accionamiento para la apertura de la válvula mariposa se hará por medio de dos servomotores los cuales cumplen dos funciones importantes en el proceso de apertura o cierre de la válvula mariposa, una de ellas es la apertura de la válvula mariposa esto ocurre cuando bajo la presión de aceite empuja la palanca de accionamiento y la mueve 89 grados, produciéndose en 180 segundos la apertura de la válvula, sin embargo la apertura solo se realizará después de alcanzar el equilibrio de presiones a los dos lados de la válvula mariposa.

La otra función de los servomotores tiene que ver con el cierre de la válvula mariposa, debido a que el cierre del disco de la válvula mariposa ocurre debido a los contrapesos, durante la operación de cierre los servomotores funcionan como freno para evitar que la válvula cierre bruscamente.

Las fuerzas del servomotor cuando el disco abre o cierra son transmitidas a la cimentación a través de las placas base.

2.2.5 CONTRAPESOS

Los contrapesos serán de chapas de acero de manera que permitan un cierre seguro bajo todas las condiciones de operación normal y de emergencia.

Las dimensiones de cada uno de los contrapesos son 0,86m de altura, 1,14 m de ancho, 1,15 m de largo y 14800 kg. En la Figura 2.12 se observa el contrapeso de una de las válvulas mariposas.



Figura 2.12 Contrapesos

En la tabla 2.6 se resume las principales características de la válvula mariposa

TABLA 2.6	
RESUMEN	
Cantidad de Válvulas Mariposas	2
Diámetro de la Válvula Mariposa	3 m
Tiempo de abertura	180 seg.
Vaciamiento nominal de abertura	63 lts/min.
Volumen de abertura	190 lts
Tiempo de Cierre Normal	180 seg.
Tiempo de Cierre de emergencia	120 seg
Vaciamiento nominal de cierre	63 lts/min.
Vaciamiento nominal de cierre	95 lts/min.
Caída líquida nominal	213 mca

Mecanismo de abertura de la válvula	Cilindro hidráulico
Mecanismo de cierre de la válvula	Brazo con contrapeso
Tipo de comando de la válvula	Unidad hidráulica de regulador de la turbina
Presión de proyecto estructural	72 bar
Presión nominal	61 bar
Presión mínima de operación	50 bar
Aceite utilizado	ISO VG 46
Tiempo de abertura (by-pass)	20 seg
Flujo nominal	58 m ³ /s
Flujo máximo	116 m ³ /s
Tiempo de apertura	180 s

2.2.6 VÁLVULA BY-PASS

Cada una de las válvulas mariposas está equipada con una válvula by-pass, para llenar el caracol de la turbina e igualar la presión a los dos lados del obturador de la válvula mariposa. Esto sirve para compensar la diferencia de presiones adelante y atrás de la válvula de mariposa antes de que el disco de la válvula de mariposa se abra.

La válvula by-pass será accionada hidráulicamente con aceite a presión del sistema óleo-hidráulico. Además de la válvula by-pass se encuentra instalada una válvula de aislamiento de mando eléctrico, esta se encuentra instalada directamente sobre la toma del by-pass y sirve para un cierre de emergencia en caso de rotura de la tubería de by-pass.

Una vez analizados cada uno de los elementos que componen el sistema óleo-hidráulico, así como la descripción de la válvula mariposa y by-pass, tenemos los datos y características de cada elemento para poder realizar en el próximo capítulo el algoritmo de control que va a regir en la central óleo-hidráulica, el estudio de cada uno de los componentes nos facilitara el diseño del programa del PLC SIEMENS S7-300 que se va a utilizar en esta tesis y cuyas características se detallaran en el próximo capítulo.

CAPITULO 3

DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL DEL PLC

3.1 GENERALIDADES DEL AUTÓMATA PROGRAMABLE

Los Controladores Lógicos Programables (PLCs), también llamados autómatas programables, forman parte de la familia de los ordenadores que se usan en aplicaciones comerciales e industriales.

Para el desarrollo de esta tesis se escogió el Simatic S7-300 debido a su tamaño, costo, potencia, tiempo de ejecución muy rápido, ampliación con módulos de interfaz, configuración de tipo modular disponiendo de un gran espectro de módulos que se los puede configurar dependiendo de la necesidades del usuario y principalmente porque gran parte de los PLC que se encuentran en San Francisco pertenecen a la familia S7 de Siemens, lo que facilitaría en un futuro la comunicación entre los PLC de la Hidroeléctrica. Entre los módulos que se distinguen, se pueden destacar los siguientes:

- **CPU:** ejecuta el programa y almacena los datos del proceso.
- **Fuente de alimentación:** proporciona corriente a la unidad central y a los módulos de ampliación conectados.
- **Módulos de Señal** Módulos Digitales de Entrada: 24V DC, 120/230V AC
- **(SM)** Módulos Digitales de Salida: 24V DC, Relé
- **Módulos Analógicos de Entrada:** Voltaje, corriente, RTD(Resistance Temperatura Detector), termocupla
- **Módulos Analógicos de Salida:** Voltaje, corriente.

- **Módulos de Interface:** El IM360/IM361 e IM365 hacen posible la configuración multirack.
- **(IM)** Comunican el bus de un rack con el del siguiente.
- **Módulos de Carcasa:** El módulo de carcasa DM 370 reserva un puesto para un módulo de señal cuyos parámetros no han sido todavía asignados. También se puede utilizar, por ejemplo, para reservar un puesto para instalar posteriormente un módulo de interfase.
- **Módulos de Función** Desempeñan "funciones especiales":
 - Conteo
 - Posicionamiento
 - Control en lazo cerrado.
- **Módulos de Comunicaciones:** Proporciona las siguientes posibilidades a la red:
 - Conexiones Punto a Punto
 - PROFIBUS
 - Ethernet Industrial.
- **Accesorios** Conectores de Bus y conectores frontales.

La disposición de los módulos en el Rack del PLC no es de manera arbitraria sino que cada uno de los módulos disponen de una posición específica en el Rack siempre y cuando se disponga del módulo, en caso contrario el hecho de no utilizar uno o varios módulos no afecta en la configuración del PLC, la posición de los módulos se muestra en la Figura 3.1.

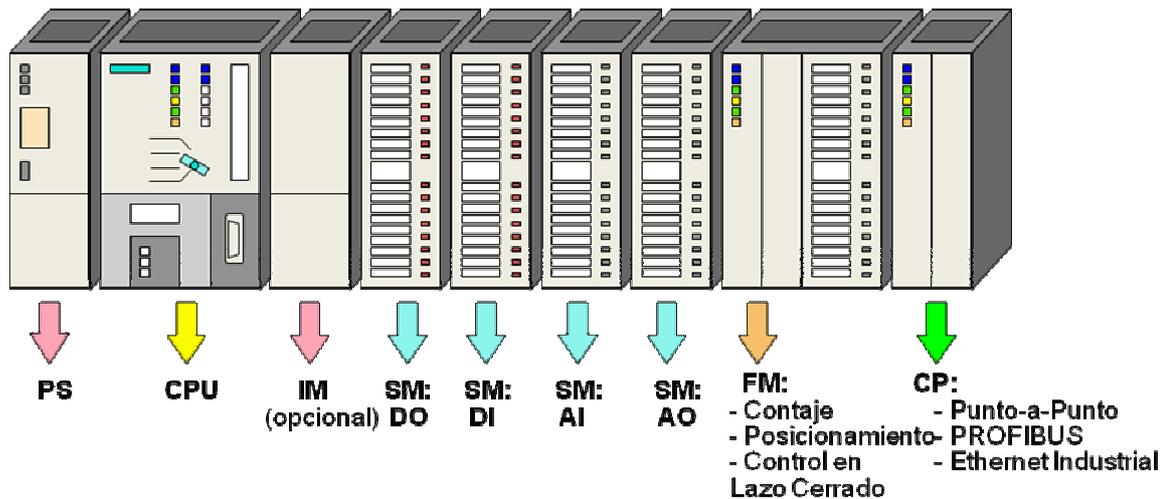


Figura 3.1 Disposición de los módulos

La CPU es donde se almacena el programa de usuario y se realiza la parametrización de todos los módulos mediante una herramienta de software que es el STEP 7 V 5.3 de propiedad de Siemens. En la Figura 3.2 se describen las características externas que posee la CPU.

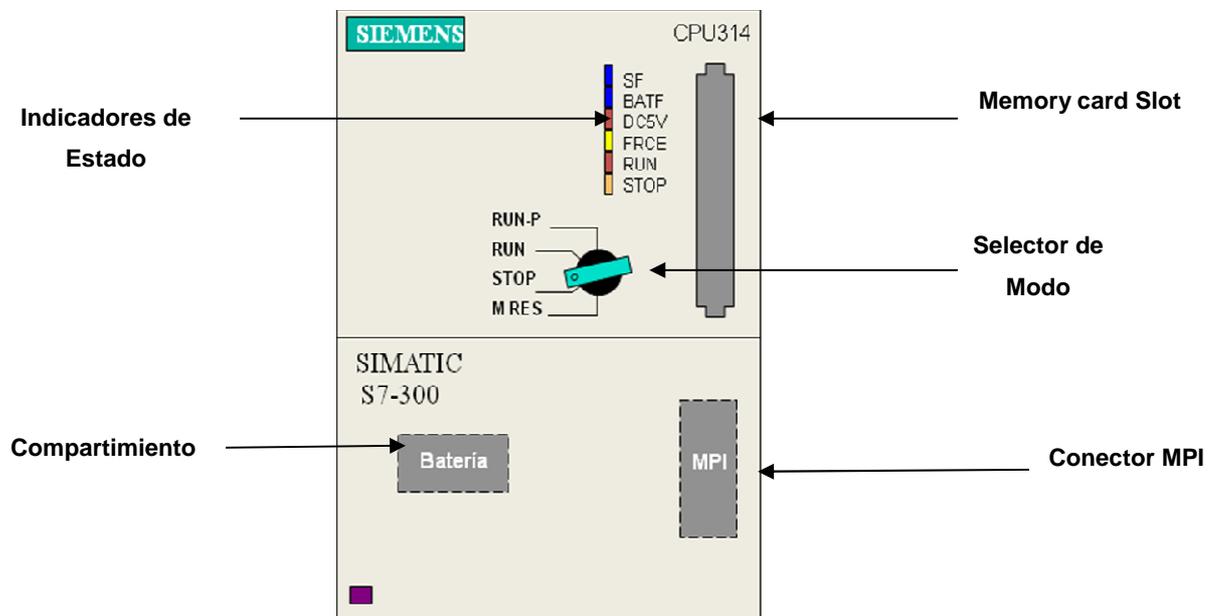


Figura 3.2 CPU 314

Selector de Modo

MRES	=	Función de RESeteo de Módulo
STOP	=	Modo STOP; El programa no es ejecutado.
RUN	=	Ejecución de programa, acceso solo lectura desde la PC.
RUN-P	=	Ejecución de programa, acceso lectura/escritura desde la PC.

Indicadores de Estado (LEDS)

SF	=	Error de Grupo, fallo interno de la CPU o fallo en un módulo diagnosticable.
BATF	=	Battery fault; Batería descargada o inexistente.
DC5V	=	Indicador de voltaje 5 V DC.
FRCE	=	Indica si se ha forzado alguna entrada o salida.
RUN	=	Parpadea cuando la CPU está arrancando, permaneciendo encendida en modo RUN.
STOP	=	Muestra una luz encendida en Modo RUN. Parpadea lentamente cuando se solicita un reseteo de memoria. Parpadea rápidamente cuando se está llevando a cabo un reseteo de memoria. Parpadea lentamente cuando se necesita de un reseteo de memoria debido a que acaba de insertarse una memory card.

Memory Card Slot para memory card. Una memory card guarda el contenido de un programa cuando se produce un fallo de alimentación, sin necesidad de tener una batería auxiliar.

Compartimiento Existe un receptáculo para una batería de litio bajo la tapa. La batería proporciona un voltaje de emergencia para guardar el contenido de la RAM en caso de fallo de alimentación.

Conector MPI Conexión para una programadora u otro elemento con un interfase MPI.

3.2 CONFIGURACIÓN Y CABLEADO DEL PLC SIEMENS S7-300

Para configurar e instalar el PLC Siemens S7-300 hay que considerar la posición específica de los módulos que se van a utilizar, para el sistema de control que se va a desarrollar en este proyecto se necesitara un modulo de entradas analógicas para monitorear temperatura, presión, nivel del acumulador y nivel del tanque de almacenamiento, un modulo de entradas digitales, un modulo de salidas digitales para manejar 8 salidas, además de estos módulos es necesario la CPU y la fuente de alimentación. La descripción de los modulo es y su disposición en el RACK se muestra en la Figura 3.3:

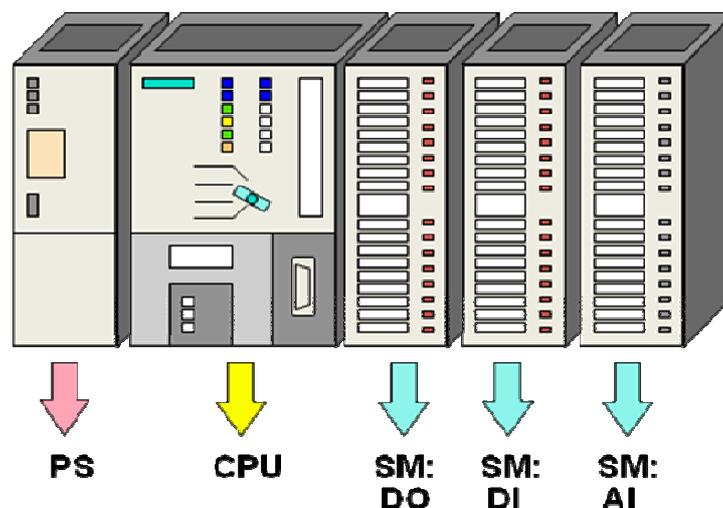


Figura 3.3 Configuración módulos

3.2.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN (PS)

La fuente de alimentación que se utiliza en este proyecto es la PS 307 de 5 A, cuyas propiedades son las siguientes:

- Dimensiones 80 x 125 x 120 mm
- Peso aproximado 740 g
- Intensidad de salida 5 A
- Tensión nominal de salida DC 24 V, estabilizada, a prueba de corto circuitos y marcha en vacío.
- Acometida monofásica, tensión nominal de entrada AC 120/230 V, 50/60 Hz
- Puede utilizarse como fuente de alimentación de carga

En la Figura 3.4 se muestra el esquema de conexión de la fuente de alimentación.

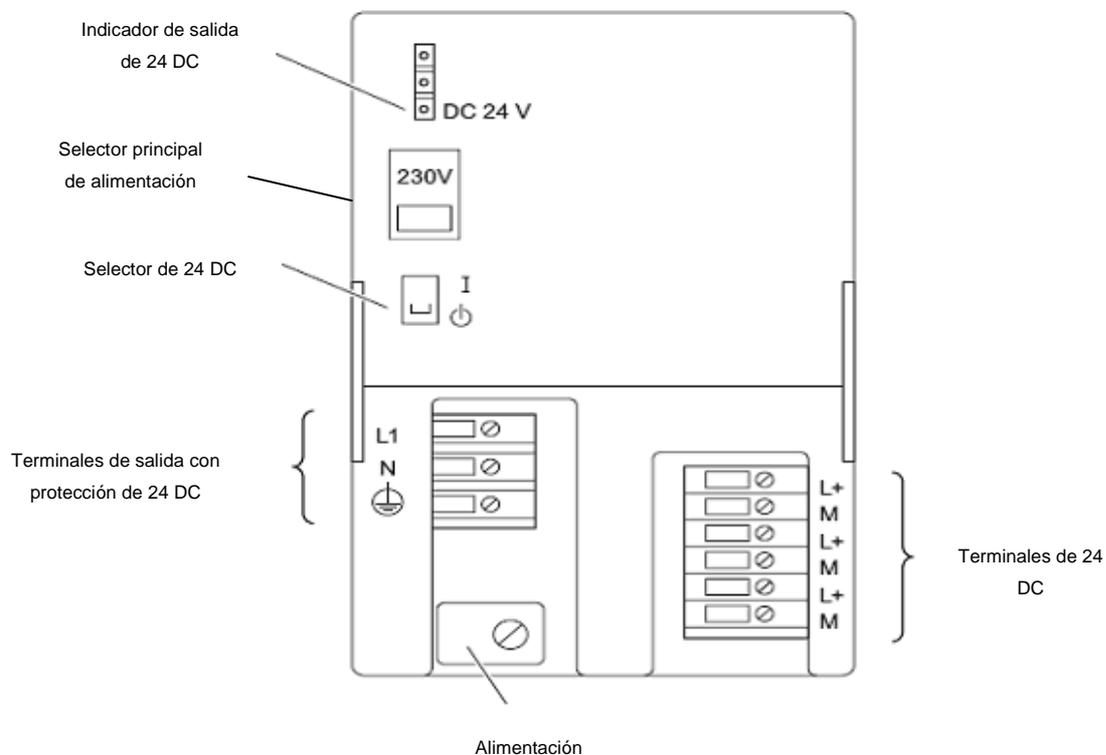


Figura 3.4 Esquema de conexión

3.2.2 MODULO DE SALIDAS DIGITALES (DO)

El módulo de salidas digitales utilizado es el SM 322; DO 16 X REL. AC120V que se caracteriza por las siguientes propiedades.

- Dimensiones 40 x 125 x 120 mm
- Peso aproximado 250 g
- 16 salidas, separadas galvánicamente, en grupo de 8
- Tensión de carga DC 24 V a 120 V, AC 48 V a 120 V
- Longitud del cable; no apantallado máximo 600 m, apantallado máximo 1000 m.
- Perdidas en el módulo 4.5 W
- Intensidad máxima de las salidas 8 A por grupo.
- Adecuado para electroválvulas, contactores, arrancadores de motor, y lámparas de señalización tanto de corriente continua como de alterna.

Hay que tener en cuenta que si tras el corte de la tensión de alimentación, el condensador conserva su energía durante aproximadamente 200 ms, por esta razón, el relé puede permanecer mandando por el programa durante un corto momento. A continuación se muestra en la Figura 3.5 el esquema de principio de conexión del módulo de las salidas digitales.

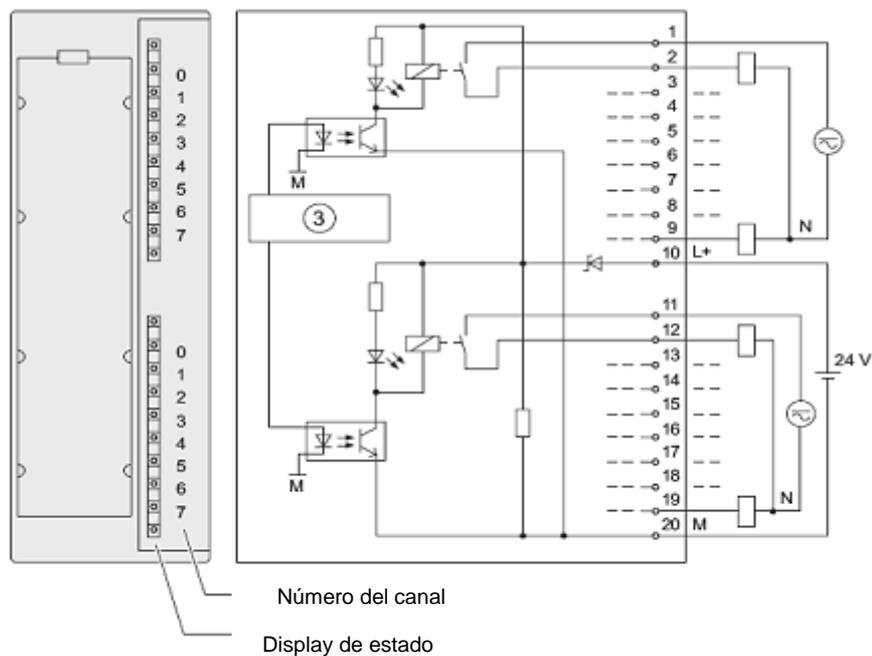


Figura 3.5 Esquema de conexión

3.2.3 MÓDULO DE ENTRADAS DIGITALES (DI)

El módulo de entradas digitales utilizado es el SM 321; DI 32 x DC 24 que se caracteriza por las siguientes propiedades.

- Dimensiones 40 x 125 x 120 mm
- Peso aproximado 260 g
- 32 entradas, separadas galvánicamente, en grupo de 32
- Tensión de entrada nominal DC 24 V
- Protección contra inversión de polaridad
- Longitud del cable; no apantallado máximo 600 m, apantallado máximo 1000 m.
- Tensión de entrada para señal de "1" de 13 a 30 V

- Tensión de entrada para señal de “0” de -3 a 5 V
- Retardo en las entradas: de “0” a “1” de 1,2 a 4,8 ms y de “1” a “0” de 1,2 a 4,8 ms.

En la Figura 3.6 se muestra el esquema del principio de conexión del módulo de entradas digitales.

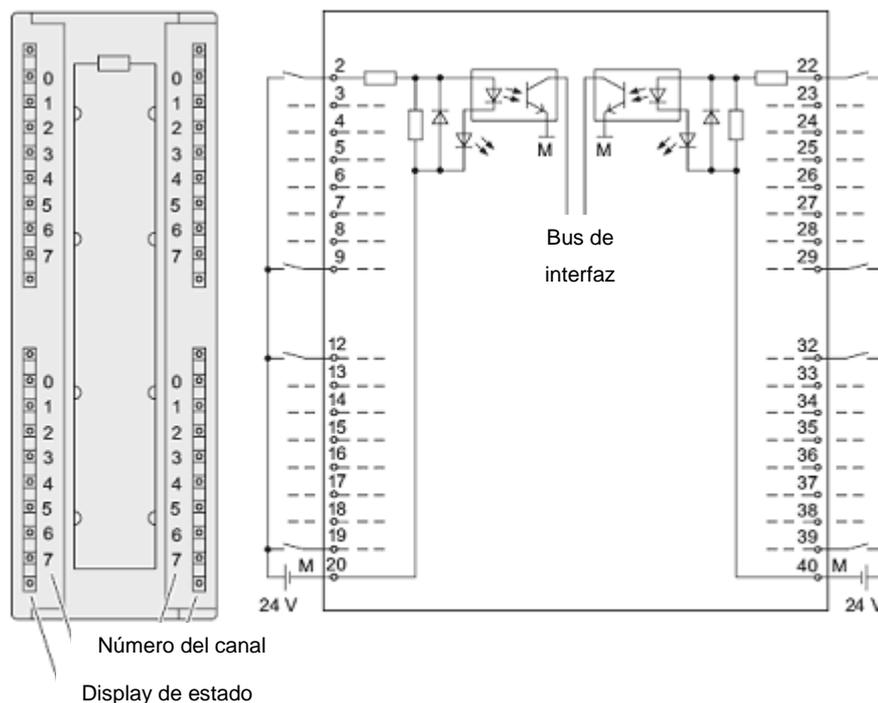


Figura 3.6 Esquema de conexión

3.2.4 MÓDULO DE ENTRADA ANALÓGICO (AI)

El módulo de entrada analógica utilizado es el SM 331; AI 8 x 12 Bits este módulo presenta las siguientes características.

- Dimensiones 40 x 125 x 120 mm

- Peso aproximado 250 g
- 8 entradas formando 4 grupos de canales
- Resolución de la medida ajustable por grupo
- El principio de medida es por integración
- Tipo de medida por grupo de canales; tensión, intensidad, RTD, termocupla
- Libre de potencial con relación con la CPU
- Protección contra cortocircuitos

En la Figura 3.7 se muestra el esquema del principio de conexión del módulo de entradas analógicas.

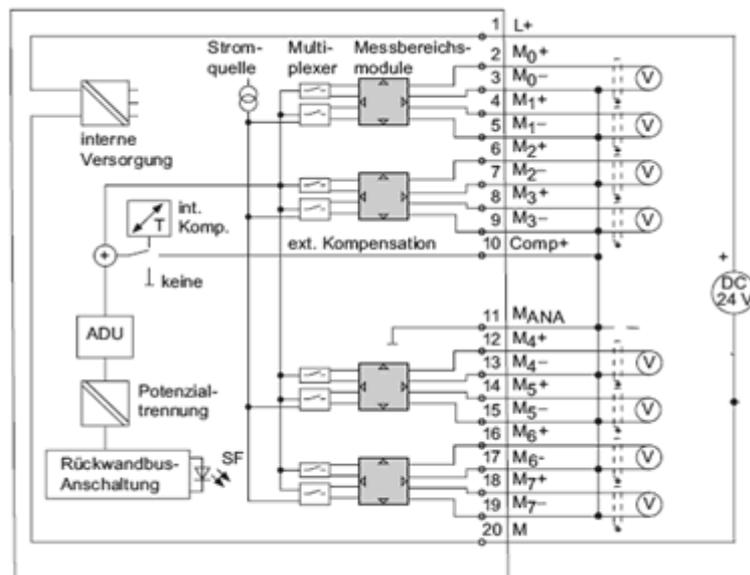


Figura 3.7 Esquema de conexión

En el direccionamiento de los módulos analógicos la CPU accede directamente a módulos de entradas analógicas, este direccionamiento es de periferia (acceso directo), las entradas y salidas disponen de su propia área de direcciones.

La dirección de un canal de entrada o salida analógico es siempre una dirección de palabra. La dirección de canal depende siempre de la dirección inicial del módulo.

ENTRADAS EXTERNAS:

Byte de entrada de la periferia PEB 0 a 65535

Palabra de entrada de la periferia PEW 0 a 65534

Palabra doble de entrada de la periferia PED 0 a 65532

En la Figura 3.8 se muestra como se asigna las direcciones de los módulos analógicos dependiendo de su posición en la configuración final del PLC.

CPU	IM	256	272	288	304	320	336	352
		a	a	a	a	a	a	a
		270	286	302	318	334	350	366

Figura 3.8 Direccionamiento módulo analógico

3.3 COMUNICACIÓN

El PLC, al ser un elemento destinado a la Automatización y Control y teniendo como objetivos principales el aumento de la Productividad y la disminución de los tiempos, no es un simple ejecutador de datos almacenados en su memoria para transmitir directivas a sus dispositivos que controla.

Es decir, debe ser un elemento que en cualquier momento sea capaz de cambiar la tarea que realiza con simples cambios en su programación, ésta tarea sería imposible sin la ayuda de otros dispositivos de comunicación, en particular el S7-300 de Siemens viene dotado con 3 interfaces para trabajar en equipo o red, ellos son:

- El MPI (Interfaz Multi Punto)

- El PPI (Interfaz Punto por Punto)
- El Profibus-DP

Para el propósito de este proyecto vamos a utilizar la interfaz MPI que es incorporada desde la fábrica. Con éste puerto se puede comunicar fácilmente a distancias reducidas sin requerir módulos adicionales, por ejemplo hacia equipos de manejo y visualización, unidades de programación y otros autómatas S7-300 para probar programas o consultar valores de estado.

La Distancia máxima entre dos estaciones o nudos de red de MPI adyacentes son de 50 metros (sin repetidores); 1100 metros (con dos repetidores); 9100 metros (con más de 10 repetidores en serie); por encima de los 500 Km con cable de fibra óptica, con módulos de conexión ópticas. Se pueden enviar datos a 4 distintos equipos al mismo tiempo y utilizando siempre el mismo puerto MPI a una velocidad de 187,5 Kbps

3.4 PARAMETRIZACION Y CONFIGURACIÓN DEL PLC SIEMENS S7-300

El software que se utiliza para programar, configurar y parametrizar los equipos Siemens, en este caso el Siemens S7-300, es el STEP 7.

STEP 7 es el software estándar para configurar y programar los sistemas de automatización SIMATIC. STEP 7 forma parte del software industrial SIMATIC.

Entre las funciones del STEP 7 tenemos:

- Posibilidad de parametrizar bloques de función y de comunicación
- Forzado y modo multiprocesador
- Comunicación de datos globales
- Transferencia de datos controlada por eventos con bloques de comunicación y de función

- Configuración de enlaces

Los requisitos de instalación básicos para el buen funcionamiento del software son los siguientes:

- Sistema operativo Microsoft Windows 95, Windows 98, Windows 2000, Windows NT o Windows Me.
- Hardware básico PC o unidad de programación (PG) con procesador 80486 o superior (para Windows NT/2000/Me se requiere un procesador Pentium), memoria RAM: 32 MB como mínimo, pero se recomiendan 64 MB y monitor color, teclado y ratón compatibles con Microsoft Windows.

3.4.1 CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO

Para la creación de un nuevo proyecto se abre el Administrador de SIMATIC, se tiene disponible un asistente de nuevo proyecto como se muestra en la Figura 3.9. Si se desea utilizar el asistente, se siguen las instrucciones que van apareciendo en la ventana, otra opción es cancelar el asistente y generar nosotros nuestro nuevo proyecto.



Figura 3.9 Asistente nuevo proyecto

Una vez contestadas las preguntas del asistente y asignado el nombre del proyecto se tiene en la pantalla la estructura del proyecto, esta estructura sirve para almacenar de forma ordenada los datos y programas necesarios para crear una tarea de automatización. Los datos que conforman un proyecto comprenden principalmente:

- Los datos para configurar el hardware y parametrizar los módulos,
- Los datos para configurar la comunicación por redes y
- Los programas para los módulos programables.

Al crear un proyecto el objetivo principal consiste en programar y en poner a disposición dichos datos.

En un proyecto, los datos se depositan en forma de objetos. Dentro de un proyecto, los objetos están estructurados en forma de árbol (jerarquía del proyecto). La representación de la jerarquía en la ventana del proyecto es similar a la del Explorador de Windows. Sólo los iconos de los objetos tienen un aspecto diferente.

El nivel superior de la jerarquía de los proyectos está estructurado de la siguiente forma:

1. Nivel : Proyecto
2. Nivel : Subredes, equipos o programas S7/M7
3. Nivel: Dependiendo del objeto que se encuentre en el segundo nivel.



Figura 3.10 Jerarquía del proyecto

La ventana del proyecto como se indica en la Figura 3.10 se divide en dos partes. En la mitad izquierda se representa la estructura en árbol del proyecto. En la mitad derecha aparece el contenido del objeto seleccionado a la izquierda, conforme a la visualización elegida (iconos grandes, iconos pequeños, lista o detalles).

Para visualizar la estructura completa del proyecto en la mitad izquierda de la ventana, haga clic en la casilla "+". Aparecerá entonces una representación similar a la que muestra la Figura 3.10.

Una vez creado el proyecto se procede con la parte de configuración y parametrización pero primero se debe tener en cuenta que entendemos por configurar y parametrizar.

Configurar

Por "configurar" se entiende en STEP 7 la disposición de los bastidores, de los módulos, de los aparatos de la periferia descentralizada y de los submódulos interface en la ventana de un equipo. Los bastidores se representan en una tabla de configuración que puede acoger un número determinado de módulos enchufables, del mismo modo que los bastidores "reales".

En la tabla de configuración, STEP 7 asigna automáticamente una dirección a cada módulo. Si la CPU se puede direccionar libremente, es posible modificar las direcciones de los módulos de un equipo.

La configuración se puede copiar cuantas veces se desee a otros proyectos de STEP 7. Si es necesario, también se puede modificar y cargar en una o varias instalaciones existentes. Durante el arranque del sistema de automatización, la CPU compara la configuración teórica creada en STEP7 con la configuración física (real) de la instalación. Así es posible detectar e indicar inmediatamente los posibles errores.

Parametrizar

Por "parametrizar" se entiende en STEP 7:

Ajustar las propiedades de los módulos parametrizables para la configuración centralizada y para una red. Ejemplo: una CPU es un módulo parametrizable. El tiempo de vigilancia de ciclo es un parámetro ajustable.

Ajustar los parámetros de bus, así como los del maestro DP y de los esclavos DP, en un sistema maestro (PROFIBUS-DP).

Estos se cargan en la CPU que los transfiere luego a los módulos en cuestión. Los módulos se pueden intercambiar muy fácilmente, puesto que los parámetros creados en STEP7 se cargan automáticamente en el nuevo módulo durante el arranque.

Entendido el concepto de configuración y parametrización, cabe realizarse una pregunta *¿Cuándo es necesario "Configurar el hardware"?*, teniendo en cuenta las propiedades de los sistemas de automatización S7 y de los módulos están pre ajustadas de tal forma que normalmente el usuario no necesita configurar, sin embargo es indispensable configurar para los siguientes casos:

- Para cambiar los parámetros predeterminados de un módulo (p. ej., habilitar la alarma de proceso en un módulo).
- Para configurar enlaces de comunicación.
- En el caso de utilizar equipos con periferia descentralizada (PROFIBUS-DP).

3.4.2 CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO S7-300

Creado el proyecto el siguiente paso es de configurar los módulos que se van utilizar para el sistema de control, para la configuración del equipo del PLC se dispone de dos ventanas:

- La ventana del equipo en la que se emplazan los bastidores

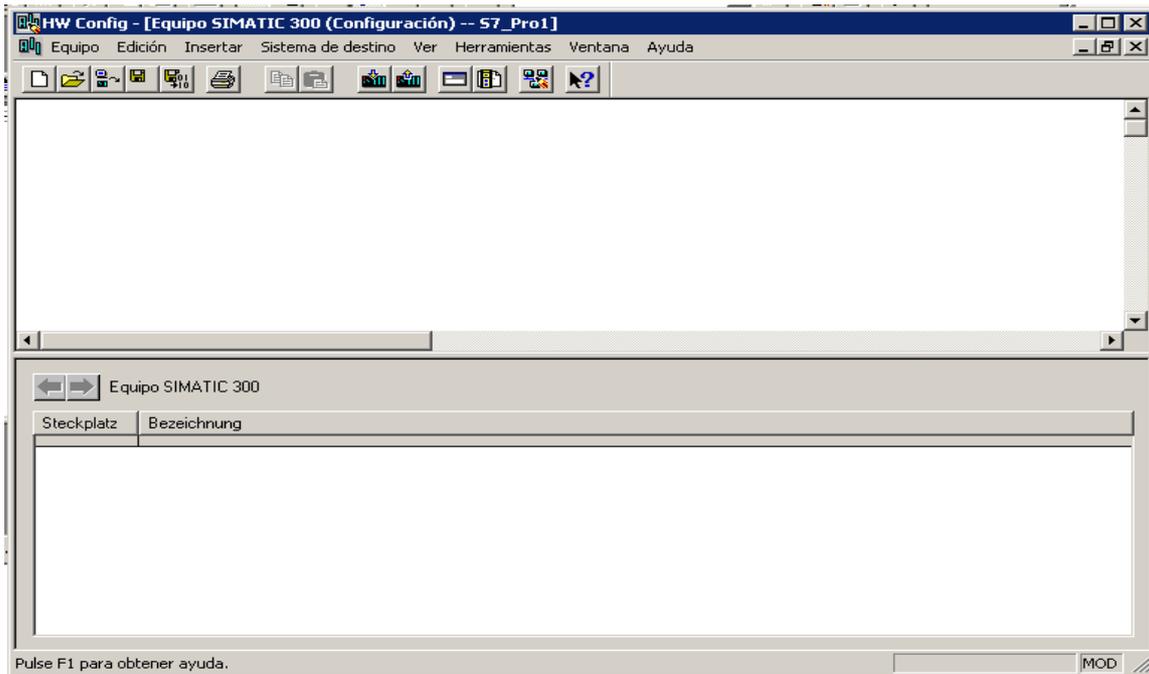


Figura 3.11 Ventana de configuración

- La ventana "Catálogo de hardware" de la que se seleccionan los componentes de hardware requeridos, p. ej. bastidor, módulos y módulos de interfaz.



Figura 3.12 Ventana catálogo del hardware

Una vez en la ventana de configuración independientemente de la estructura de un equipo, la configuración se realiza siempre siguiendo los siguientes pasos:

1. Seleccionar el bastidor donde se colocan los módulos del PLC utilizado.
2. En la ventana "Catálogo de hardware", seleccionar los componentes de hardware que para esta tesis son los siguientes:
 - Fuente de alimentación
 - CPU 314
 - Módulo de salidas digitales
 - Módulo de entradas digitales
 - Módulo de entradas analógicas

Se arrastran los componentes seleccionados hasta la ventana donde se encuentra el bastidor, como se muestra en la Figura 3.13.

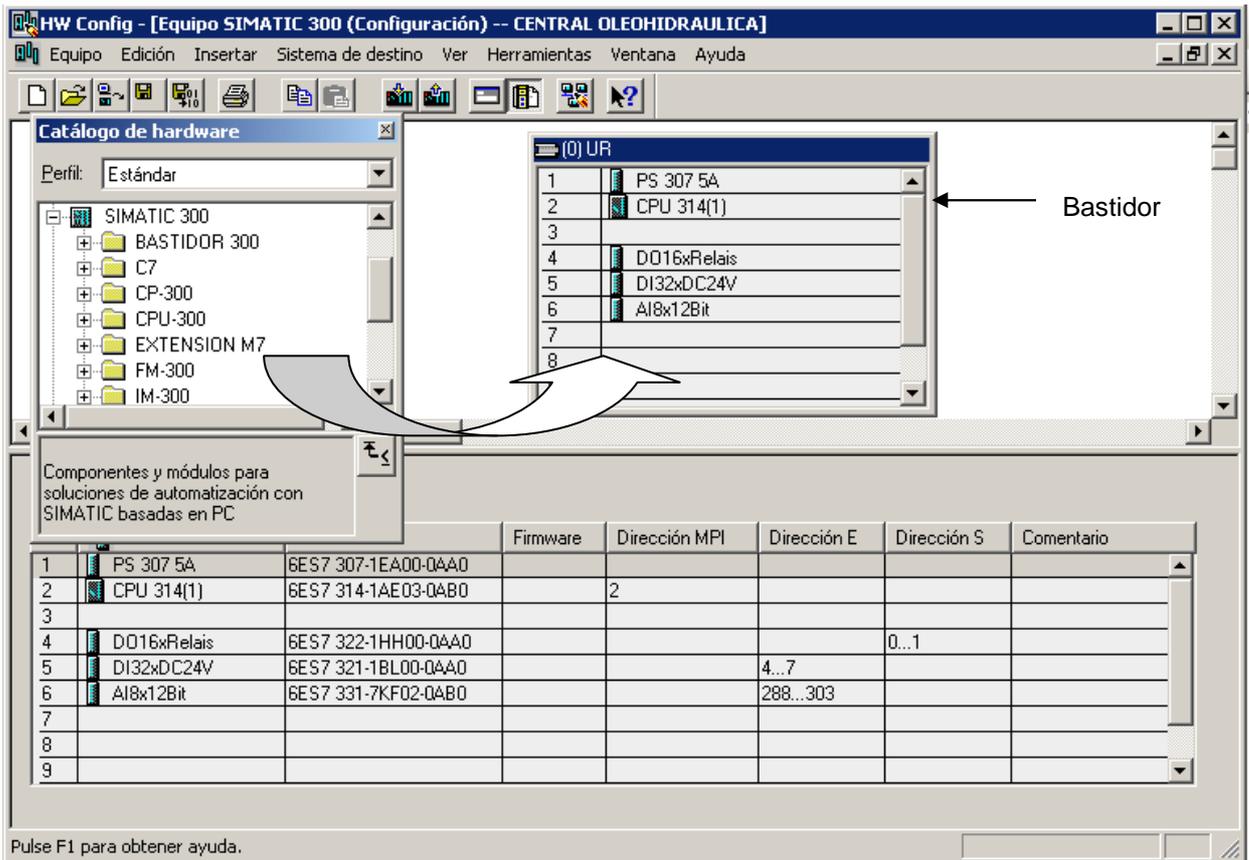


Figura 3.13 Ventana de configuración

En la parte inferior de la ventana del equipo aparece una vista detallada del bastidor que se ha insertado o seleccionado. Allí se visualizan en forma de tabla las referencias y las direcciones de los módulos.

La tabla de configuración de un bastidor central dotado de módulos se representa de la manera siguiente:

Slot	Módulo	Referencia	Firmware	Dirección MPI	Dirección E	Dirección S	Comentario
1	PS 307 5A	6ES7 307-1EA00-0AA0					
2	CPU 314(1)	6ES7 314-1AE03-0AB0		2			
3							
4	DO16xRelais	6ES7 322-1HH00-0AA0				0...1	
5	DI32xDC24V	6ES7 321-1BL00-0AA0			4...7		
6	AI8x12Bit	6ES7 331-7KF02-0AB0			288...303		
7							
8							
9							
10							
11							

Figura 3.14 Vista detallada bastidor

Al igual que en una instalación real, en STEP 7 los módulos se colocan en bastidores. La diferencia consiste en que en STEP 7 los bastidores se representan mediante "tablas de configuración", las cuales contienen el mismo número de líneas que el número de módulos que se pueden enchufar en el bastidor real.

La Figura 3.15 se muestra como se configura un equipo físico en una tabla de configuración. La tabla de configuración corresponde al bastidor utilizado para esta tesis; STEP 7 antepone automáticamente el número del bastidor entre paréntesis.

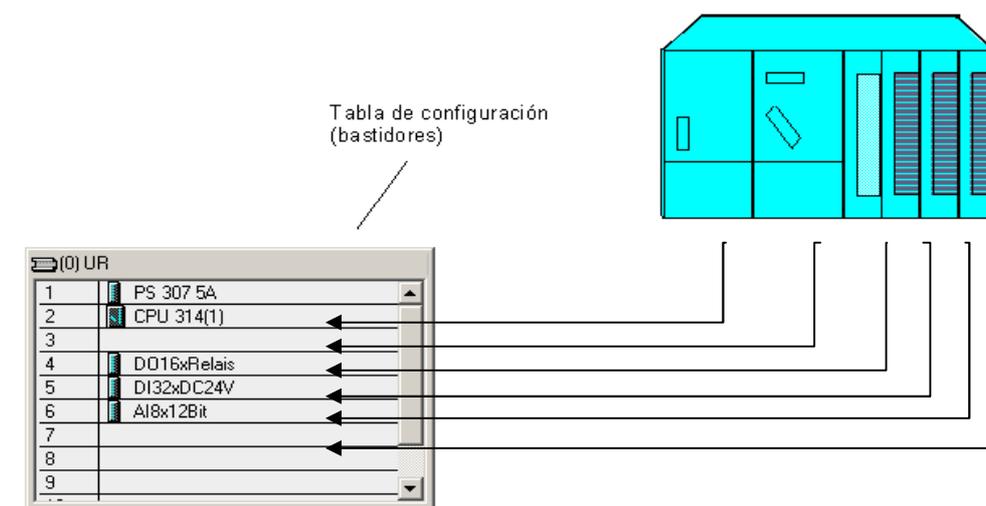


Figura 3.15 Configuración del equipo físico

3.4.3 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN

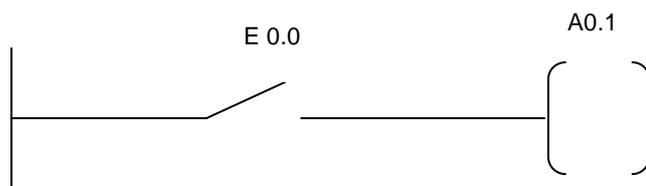
Los lenguajes de programación que posee el STEP 7 son el KOP, AWL y FUP que sirven tanto para S7-300/400 y son parte integrante del software estándar.

KOP (esquema de contactos) es un lenguaje de programación gráfico. La sintaxis de las instrucciones es similar a la de un esquema de circuitos. KOP permite observar la circulación de la corriente a través de contactos, elementos complejos y bobinas.

AWL (lista de instrucciones) es un lenguaje de programación textual orientado a la máquina. En un programa creado en AWL, las instrucciones equivalen en gran medida a los pasos con los que la CPU ejecuta el programa. Para facilitar la programación, AWL se ha ampliado con estructuras de lenguajes de alto nivel (tales como accesos estructurados a datos y parámetros de bloques).

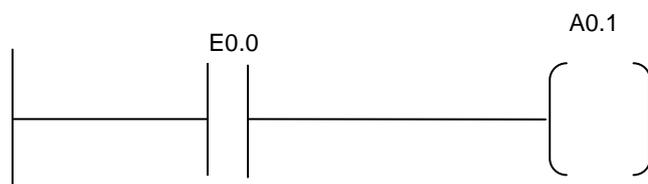
FUP (diagrama de funciones) es un lenguaje de programación gráfico que utiliza los cuadros del álgebra booleana para representar la lógica. Asimismo, permite representar funciones complejas (ej. funciones matemáticas) mediante cuadros lógicos.

En resumen si queremos programar el siguiente circuito:

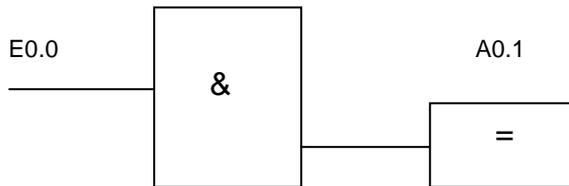


La solución en los tres lenguajes de programación es la siguiente:

Solución en KOP



Solución en FUP



Solución en AWL

U E 0.0

Para el desarrollo de este proyecto el programa va a ser elaborado con el lenguaje FUP, la razón por la cual se escoge este lenguaje es debido al conocimiento que se tiene en el manejo de compuertas lógicas.

3.5 DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL

Luego de analizar cada uno de los componentes de la central óleo hidráulica el siguiente paso es el diseño del algoritmo de control. Cada una de las señales que se utilizan en este sistema de control e encuentran en los planos del anexo 2. La notación de las señales en el plano es la siguiente:

(x.y.z) donde:

x es el número del plano
y la identificación horizontal
z la identificación vertical.

El sistema de control automático que se desarrolla en esta tesis esta diseñado para realizar las siguientes operaciones:

- Mantener la presión del sistema en niveles normales de operación.
- Refrigeración del aceite del acumulador.

- Activar o desactivar la válvula de intermitencia.
- Inyección de aire en el tanque acumulador de presión.
- Apertura y cierre de la válvula by pass.
- Apertura y cierre de la válvula mariposa.
- Señalizar posibles fallas en el sistema.
- Visualización en tiempo real de las señales analógicas.
- Manejo del sistema de manera manual o automática.

El sistema de control funciona en dos modos de operación: local y remota. Estos modos de operación pueden ser escogidos mediante un selector externo 43LR (6.3.B).

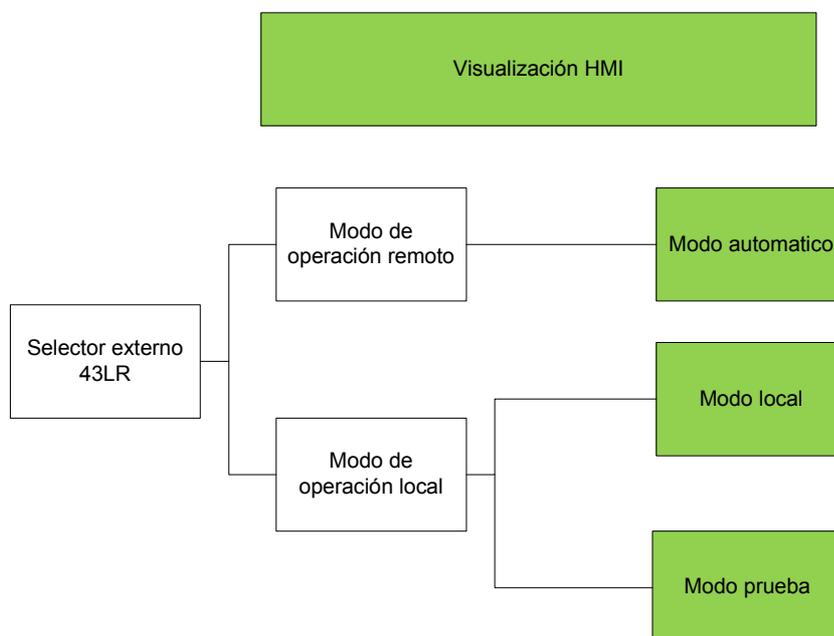


Figura 3.16 Modos de operación

El programa diseñado para el PLC siemens s7-300 permite la operación del sistemas en los tres modos como se puede observar en el diagrama de bloques de la Figura 3.16, estos modos de operación permiten la operación de la central óleo hidráulica de forma automática o manual.

Nota: los bloques señalados con color verde indican que esta señal será visualizada en la pantalla de la HMI.

MODO DE OPERACIÓN REMOTO

El modo de operación remoto tiene la característica de permitir controlar el arranque de la central óleo hidráulica únicamente desde la sala de control. Luego de que la central óleo hidráulica arranca, este modo de operación permite su funcionamiento automático, en la figura 3.17 se muestra el diagrama de bloques del funcionamiento de la central óleo hidráulica en modo remoto.

El sistema óleo hidráulico consta de dos bombas en paralelo, las bombas pueden funcionar la una como bomba líder y la otra como bomba no líder, o viceversa, en la figura 3.17 se muestra el diagrama de bloques en el caso de que la bomba líder seleccionada sea la bomba 1 y la bomba 2 como no líder.

Los mandos de arranque o parada de las bombas son controlados desde la sala de control mediante las señales de “Arranque” de las bombas E0 (6.2.B) y “Parada” de las bombas E1 (6.2.B). La selección de la bomba líder se la realiza con las siguientes señales desde la sala de control: Selecciona bomba 1 líder E4 (6.5.B) y Selecciona bomba 2 líder E6 (6.8.B). La bomba líder es la que se encontrará en continuo funcionamiento, mientras que la no líder sirve como respaldo en caso que la presión del sistema descienda a niveles críticos.

Para que el sistema de control permita que las bombas puedan arrancar deben cumplir condiciones de disponibilidad que son las siguientes:

BOMBA 1: La protección del motor de la bomba 1 no debe ser accionada (6.4.D), el nivel de aceite debe ser normal en el tanque de almacenamiento y la alimentación debe ser normal en la bomba 1 (6.6.D).

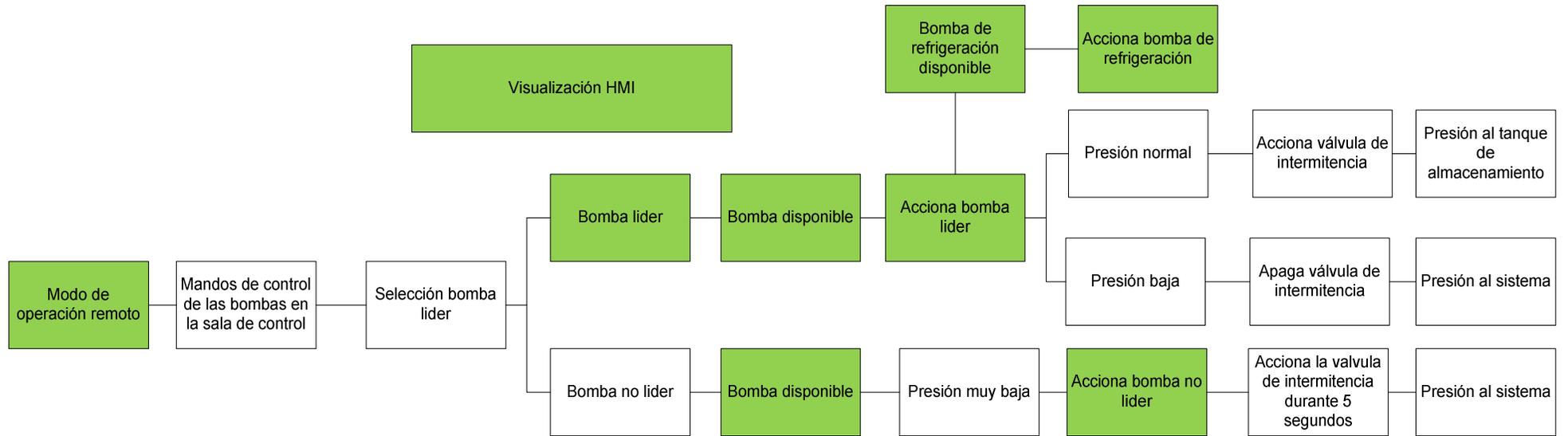


Figura 3.17 Modo de operación remoto

BOMBA 2: La protección del motor de la bomba 2 no debe ser accionada (6.6.D), el nivel de aceite debe ser normal en el tanque de almacenamiento y la alimentación debe ser normal en la bomba 1 (6.7.D).

Las condiciones que debe cumplir la bomba de refrigeración que se encarga de mantener la temperatura del aceite en valores normales de operación son:

BOMBA REFRIGERACION: La protección del motor de la bomba de refrigeración no debe ser accionado (8.2.C), el nivel de aceite debe ser normal en el tanque de almacenamiento y la alimentación debe ser normal en la bomba 1 (8.2.C).

Luego de que están cumplidas las condiciones de arranque y que está seleccionada la bomba líder el algoritmo de control actuara de la siguiente manera:

- Arranca la bomba que se ha seleccionado como líder junto con su respectiva válvula de intermitencia, esta válvula permite que el aceite se encuentre recirculando en el tanque de presión mientras la presión esté dentro de límites normales de operación.
- La válvula de intermitencia de la bomba líder permite el paso de aceite al sistema cuando la presión descienda por debajo del límite permitido. Éste límite puede ser alterado en la pantalla de setup de la HMI.
- Si la presión continua bajando entra en acción la bomba que se encuentra como no líder y también su válvula de intermitencia durante 5 segundos. Luego la bomba no líder permite el paso de aceite al sistema.

Si la presión vuelve a sus valores normales de operación se apaga la bomba no líder y la válvula de intermitencia de la bomba líder se acciona. La bomba líder siempre se encuentra en funcionamiento, sin embargo la válvula de intermitencia es la que permite o no el paso de presión al sistema.

La bomba de refrigeración se encuentra en funcionamiento mientras cualquiera de las dos bombas esté en funcionamiento.

SEÑALES ANALÓGICAS

La unidad óleo hidráulica maneja cuatro señales analógicas que son las siguientes:

- Presión de aceite en el tanque de presión (5.2.E).
- Temperatura del aceite (5.4.E).
- Nivel del aceite en el tanque de almacenamiento (5.6.E).
- Nivel del aceite en tanque de presión (5.7.E).

Estas señales analógicas son de corriente entre 4 y 20 mA, las cuales pasan por un acondicionador de señales que las convierte en una señal equivalente de voltaje entre 2 y 10V. Cada una de estas señales analógicas es de vital importancia para el control de la central óleo hidráulica.

La señal de presión de aceite en el tanque de presión tiene tres niveles de acción como se puede observar en la figura 3.18:

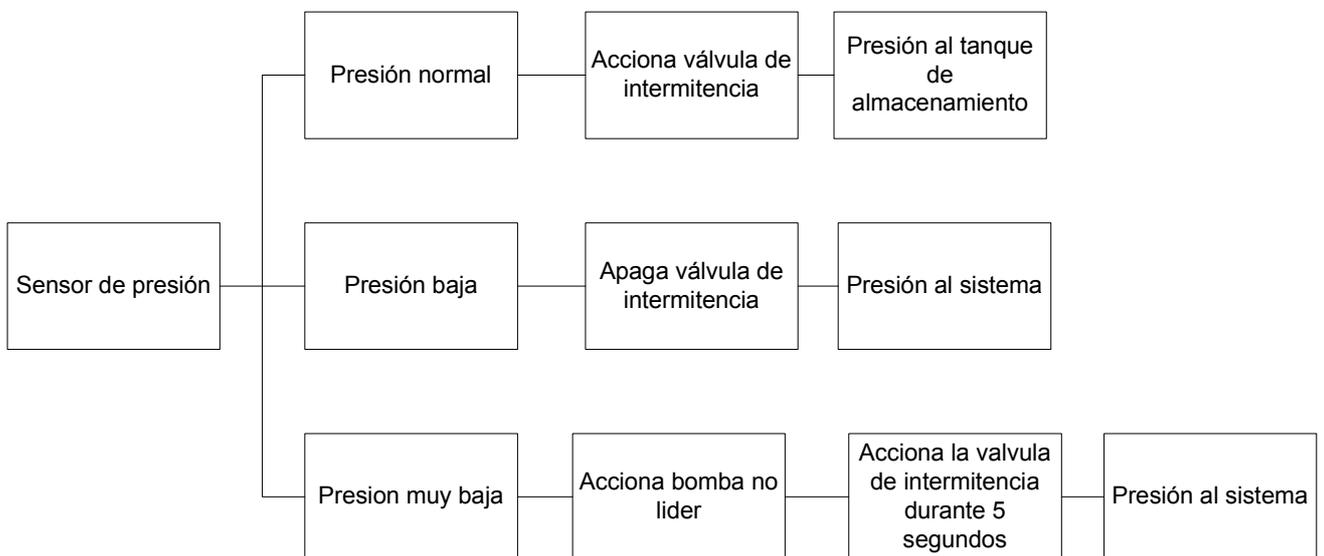


Figura 3.18 Sensor de presión

- La presión normal, en este caso la bomba líder esta accionada junto con su válvula de intermitencia, lo cual produce que el aceite recircule al tanque de almacenamiento.
- La presión baja accionan la bomba líder, esta acción se da cuando la presión desciende por debajo de los niveles configurados en la HMI, la acción que realiza es apagar la válvula de intermitencia de la bomba líder y permitir el paso del aceite al sistema.
- La Presión muy baja acciona la bomba no líder, esta acción se da cuando la presión continua bajando a pesar que se encuentra en funcionamiento la bomba líder, ésta acciona la bomba no líder junto con su válvula de intermitencia durante cinco segundos y permite el paso de la presión al sistema.

La señal de temperatura del aceite activa una alarma en la HMI cuando la temperatura supera el límite configurado en la HMI, como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.19.

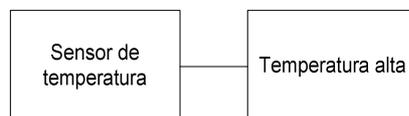


Figura 3.19 Sensor de temperatura

La señal de nivel de aceite en el tanque de almacenamiento tiene tres niveles como se observa en el diagrama de bloques en la figura 3.20.

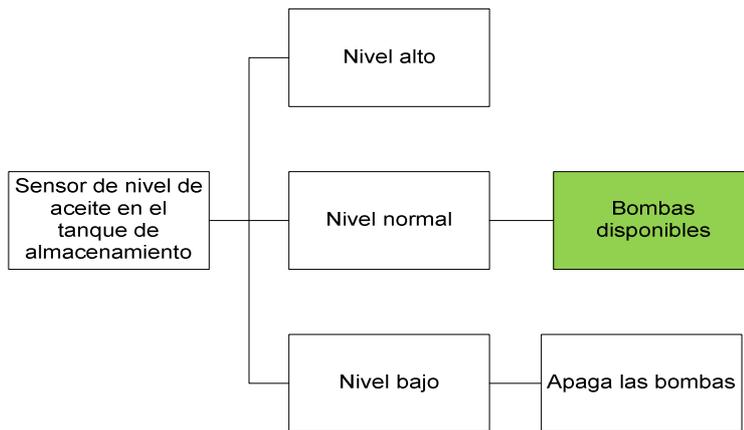


Figura 3.20 Sensor de nivel en el tanque de almacenamiento

- Nivel alto en el tanque de almacenamiento da alarma en la HMI; el motivo por el cual solo da alarma es por que el diseño del tanque de almacenamiento esta construido para un 110% del volumen total de aceite en el sistema.
- Nivel de aceite normal en el tanque de almacenamiento mantiene la bomba líder accionada pero con la válvula de intermitencia energizada lo que hace recircular al aceite al tanque de almacenamiento.
- Nivel bajo en el tanque de almacenamiento para las bombas y da alarma en la HMI; la razón por la cual se para las bombas es debido a que si las bombas funcionan sin el caudal adecuado pueden sufrir averías.

La señal de nivel de aceite en el tanque de presión tiene dos niveles de acción como se ve en la figura 3.21.

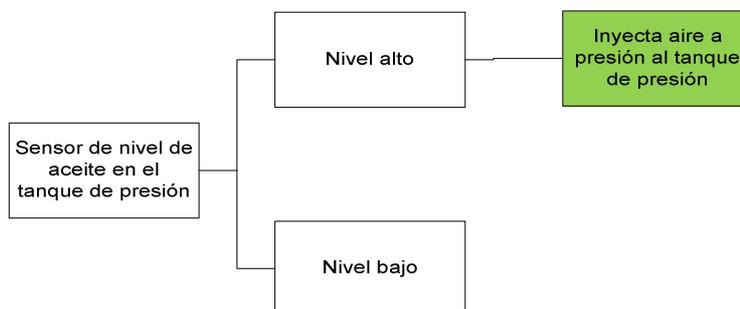


Figura 3.21 Sensor de nivel en el tanque de presión

- Nivel alto en el tanque de presión, se acciona una alarma en la HMI y el sistema de control inyecta aire a presión en el tanque hasta tener el nivel normal de operación.
- La otra acción es nivel bajo en el tanque de presión que da alarma en la HMI.

CONTROL DE LA VÁLVULA MARIPOSA

El sistema de control también maneja el funcionamiento de la válvula mariposa y la válvula by pass. Cuando se envía la señal de abrir la válvula mariposa E10 (7.2.C) el sistema de control automáticamente da la orden de apertura de la válvula by pass S12 (14.8.B). Esto permite que el caracol se llene de agua para igualar las presiones en ambos lados de la válvula mariposa para poder realizar su apertura. En el diagrama de bloques de la figura 3.22 se puede observar el funcionamiento del control de la válvula mariposa.

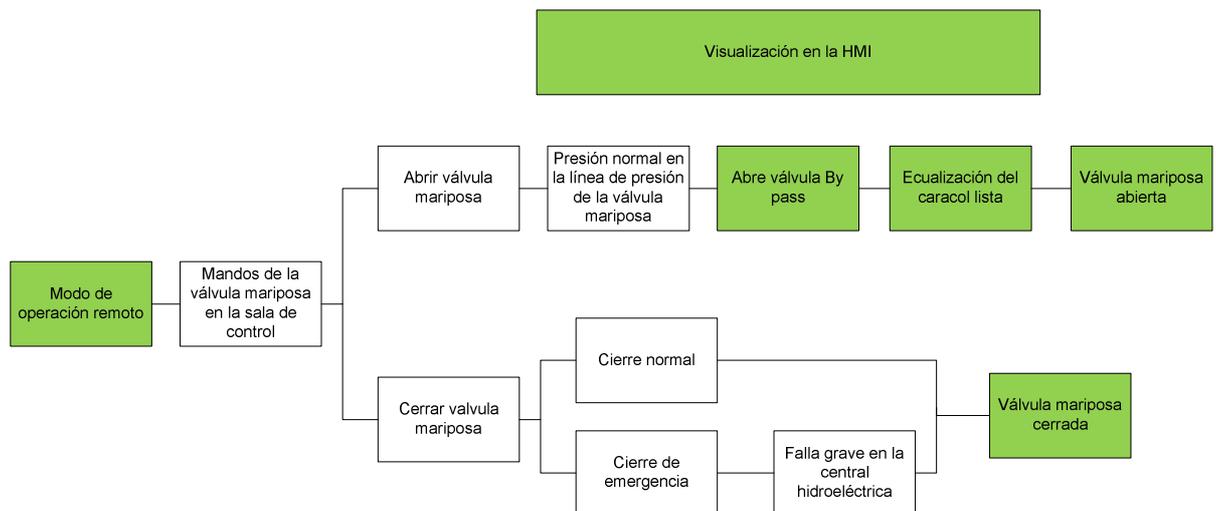


Figura 3.22 Diagrama de bloques del control de la válvula mariposa

Además de lo mencionado anteriormente el sistema debe cumplir con las siguientes condiciones para que se proceda a la apertura de la válvula mariposa.

- Presión normal en la línea de presión de la válvula mariposa (10.5.B).

- Ecuación del caracol lista E13 (7.4.C), esto significa que las presiones en ambos lados de la válvula mariposa deben ser los mismos.

Para el cierre de la válvula mariposa se tiene dos maneras de realizar esta acción:

- Mando de cierre de la válvula mariposa E11(7.3.C) desde la sala de control.
- Mando cierre de emergencia E12 (7.4.C) en caso de alguna falla grave en la central hidroeléctrica.

Toda la supervisión del sistema de control se la puede visualizar en la HMI, tanto las señales analógicas en tiempo real como las señales digitales de los equipos que se accionan en el proceso, pero sin poder intervenir en el proceso desde la HMI.

MODO DE OPERACIÓN LOCAL

Mediante el selector externo 43LR (6.3.B) podemos seleccionar el modo de operación local. El modo de operación local es donde desde la HMI se puede controlar cada uno de los componentes de la central óleo hidráulica. Desde la HMI se pueden arrancar independientemente cada una de las bombas sin importar cual esté como líder. En el diagrama de bloques de la figura 3.23 se muestra el funcionamiento de las bombas en modo de operación local.

Cuando una de las bombas se arranca, su válvula de intermitencia no permite el paso de presión al sistema durante cinco segundos, luego se apaga y permite que el flujo de aceite entre al sistema. En este caso hay que tener precaución ya que el sistema automático no se encuentra operando y es de absoluta responsabilidad del operador el manejo de la presión del sistema, sin embargo hay que recordar que la central óleo hidráulica posee válvulas de limitadoras de presión que se accionan automáticamente cuando la presión llega a niveles peligrosos.

Al igual que en el modo de operación remoto, para accionar las bombas tienen que cumplir las mismas condiciones para su disponibilidad.

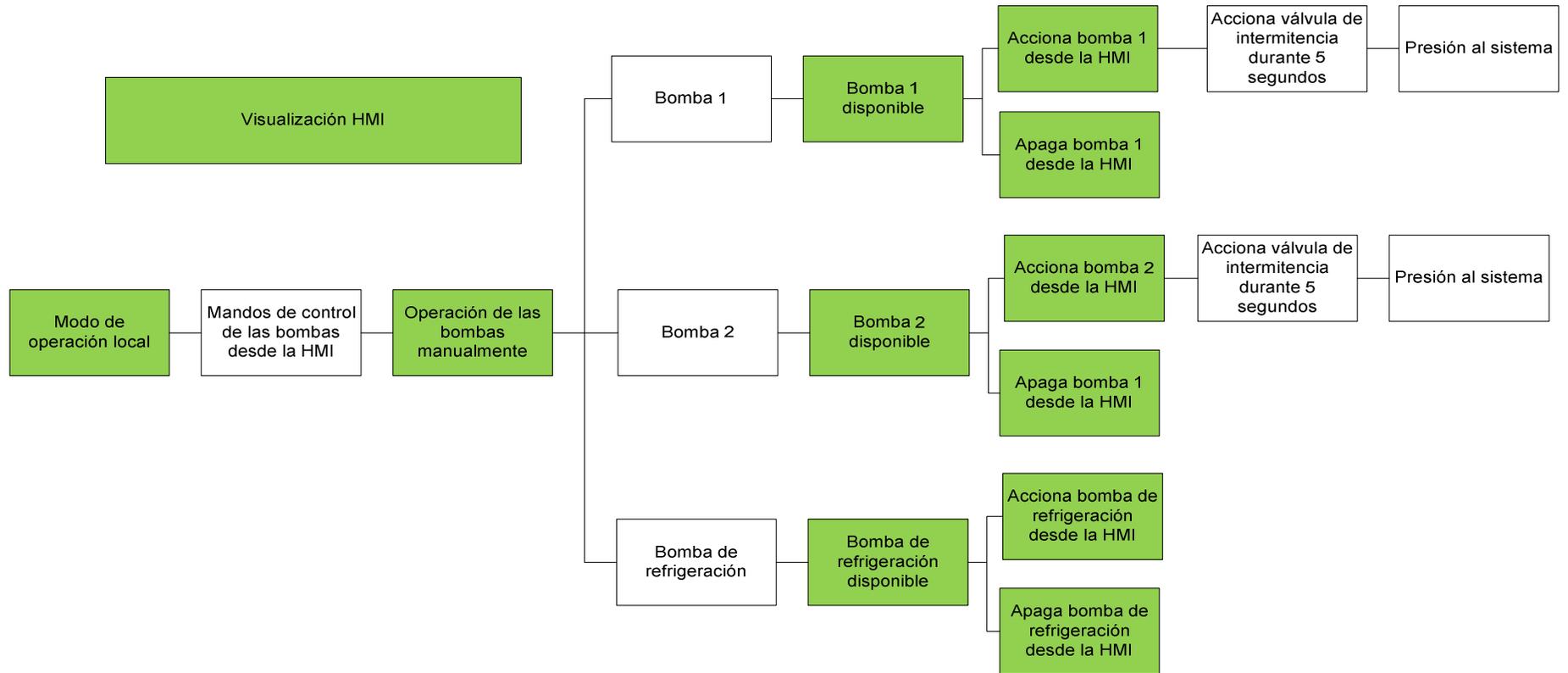


Figura 3.23 Modo de operación local

En el caso de la bomba de refrigeración el operador debe elegir cuando debe arrancarla observando que la temperatura no alcance niveles altos, debido a que se corre el peligro que el aceite se degrade, pero para el accionamiento de esta bomba de refrigeración también se debe cumplir las mismas condiciones señaladas en la operación en remoto.

El control del tanque de presión es manejado manualmente, la inyección de aire se la realiza desde la HMI. Al igual que en el modo de operación remoto la inyección del aire solo dura 5 segundos.

VÁLVULA MARIPOSA

Desde la HMI se puede controlar la apertura o cierre de la válvula mariposa. De igual manera que en modo de operación remoto, al dar la orden de apertura de la válvula mariposa automáticamente se abre el by pass y se espera la ecualización del caracol para abrir la válvula mariposa, las condiciones para la apertura son la siguientes:

- Presión normal en la línea de presión de la válvula mariposa (10.5.B).
- Ecualización del caracol lista E13 (7.4.C).

En el diagrama de bloques de la figura 3.24 se muestra el funcionamiento de la válvula mariposa en modo local.

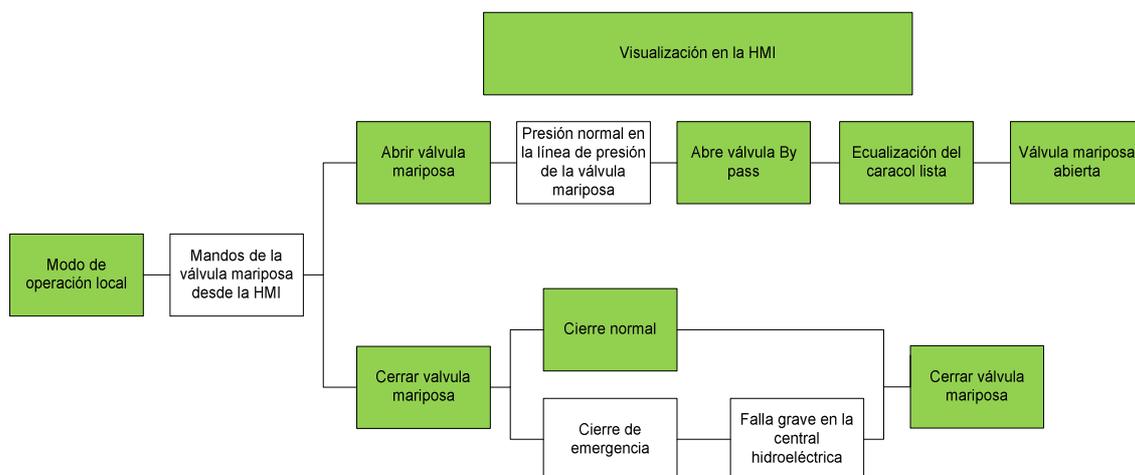


Figura 3.24 Modo de operación local de la válvula mariposa

MODO DE PRUEBA

Desde la HMI se puede activar el modo de prueba. Este modo de operación se caracteriza por permitir la operación manual de la central óleo hidráulica.

El modo de prueba se lo elige con el selector externo 43LR (6.3.B) en modo local y en la pantalla de la HMI se puede seleccionar el modo de prueba.

En el modo de prueba las bombas no inyectan presión al sistema debido a que las válvulas de intermitencia no pueden ser desactivadas y el aceite se encuentra recirculando en el tanque. En este modo se pueden accionar independientemente cada una de las bombas para comprobar su funcionamiento siempre y cuando cumplan las condiciones para su arranque. En el diagrama de bloques de la figura 3.25 se indica el proceso en modo de prueba.

La bomba de refrigeración en este modo se acciona desde la HMI bajo la responsabilidad del operador cumpliendo de igual manera las condiciones de arranque.

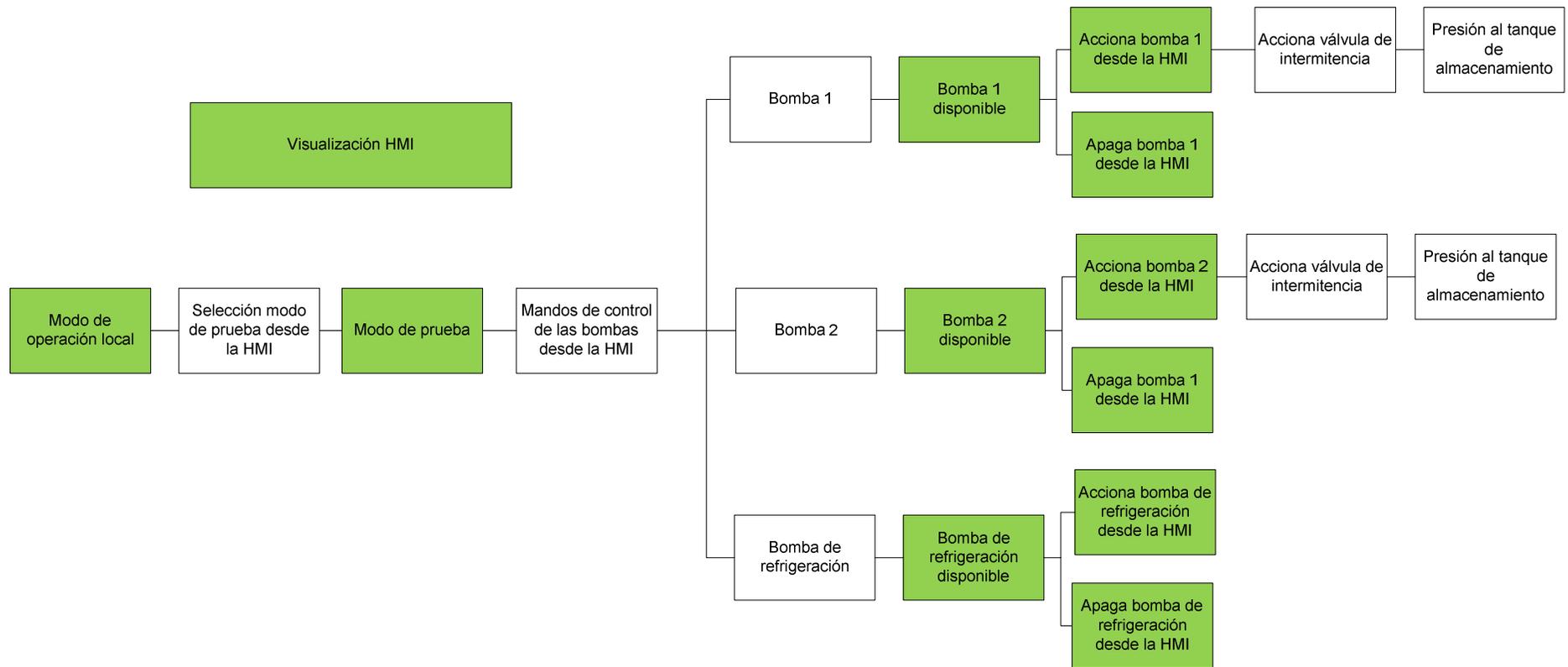


Figura 3.25 Modo de operación prueba

VALVULA MARIPOSA

Este es el único modo de operación donde se puede abrir la válvula by pass sin necesidad de que se de la orden de abrir la válvula mariposa. Para abrir la válvula mariposa en este modo de operación tiene que satisfacer las condiciones para su apertura:

- La presión normal en la línea de presión de la válvula mariposa (10.5.B)
- Ecuilibración del caracol lista E13 (7.4.C)

En el diagrama de bloques de la figura 3.26 se muestra como funciona el control de la válvula mariposa.

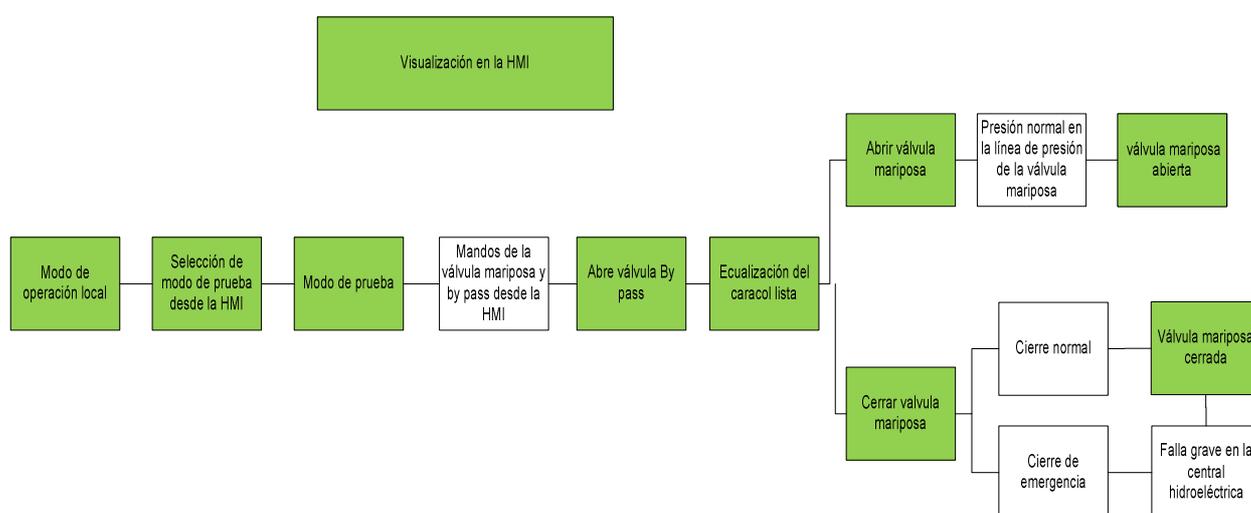
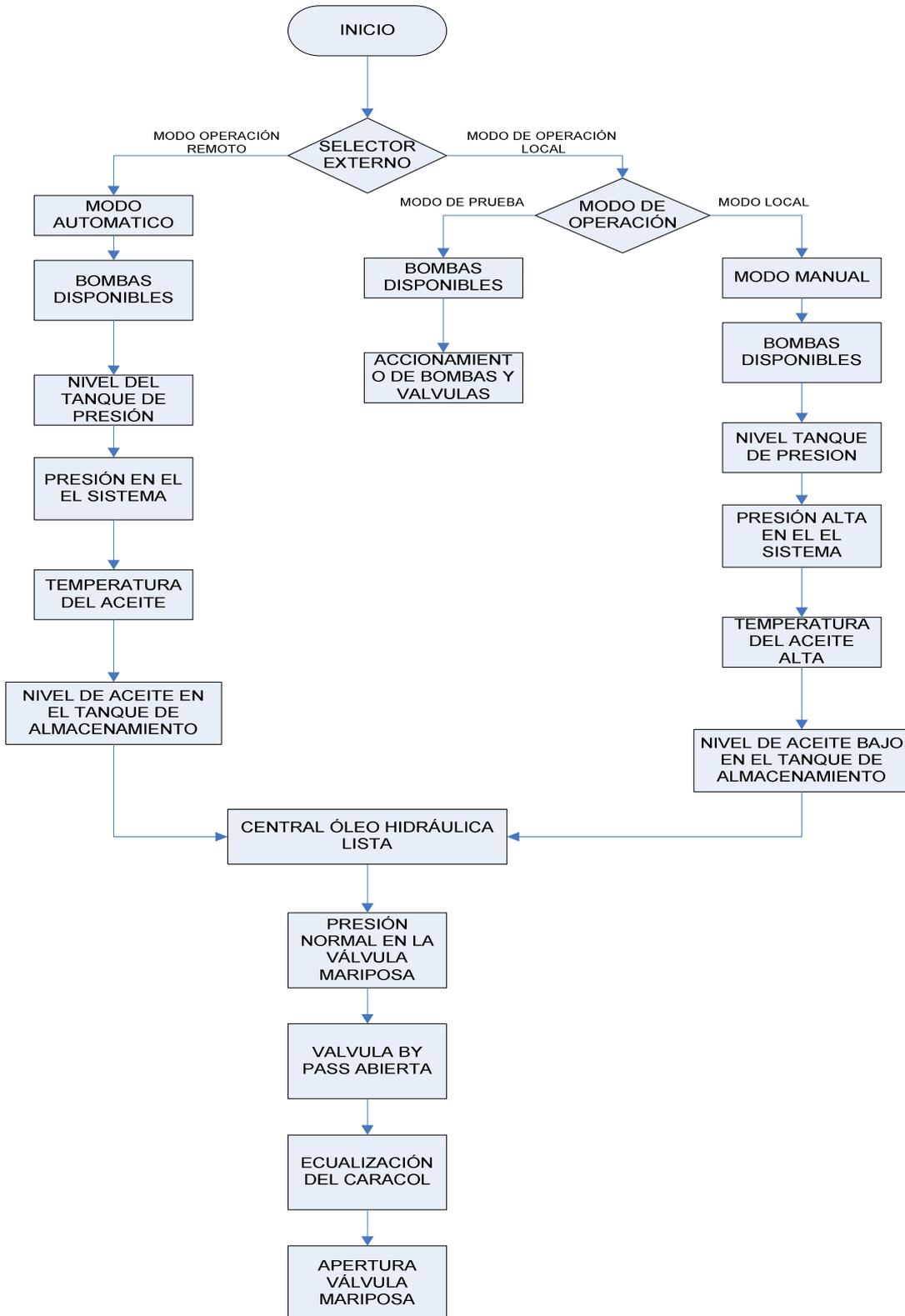


Figura 3.26 Modo de prueba válvula mariposa

Finalmente un punto muy importante es que la HMI y el programa del PLC son totalmente independientes, la razón que se desarrolló de esta manera es que en el caso de una falla de la HMI, el sistema continuara operando en modo automático.

3.5.1 DIAGRAMA DE FLUJO



MODO AUTOMÁTICO

- Todo el proceso de controles realizado de manera automáticamente por el PLC.

BOMBAS DISPONIBLES

- La protección del motor no debe ser accionada.
- La alimentación debe ser normal en las bombas.

PRESIÓN EN EL SISTEMA

- Con la presión baja acciona bomba líder.
- Con la presión muy baja acciona bomba no líder.

NIVEL TANQUE DE PRESIÓN

- El nivel alto en el tanque de presión acciona la inyección de aire.

TEMPERATURA DEL ACEITE

- Temperatura alta acciona alarma en la HMI

NIVEL EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO

- El nivel bajo en el tanque de almacenamiento, apaga las bombas.
- El nivel alto en el tanque de almacenamiento, acciona una alarma en la HMI

PRESIÓN VÁLVULA MARIPOSA

- La presión normal en la válvula mariposa, permite accionar válvula mariposa
- La presión baja en la línea de la válvula mariposa da alarma en la HMI, además no permite accionar válvula mariposa

VÁLVULA BY PASS ABIERTA

- El by pass abierto permite accionar válvula mariposa.

- El by pass cerrado no permite ecualización del caracol

ECUALIZACIÓN DEL CARACOL

- Ecualizado el caracol permite la apertura de la válvula mariposa
- Caracol no ecualizado no permite apertura de la válvula mariposa

APERTURA VÁLVULA MARIPOSA

- Mando abre válvula mariposa
- Mando cierra válvula mariposa

CAPITULO 4

DESARROLLO DE LA INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA PARA SUPERVISAR Y OPERAR LA UNIDAD HIDRÁULICA

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA

Realizado el algoritmo de control para la central óleo-hidráulica que se detalló en capítulo anterior, se procede a analizar las características del software que se utilizará en el desarrollo de la interfaz hombre máquina (HMI).

El software para el diseño de la interfaz que se seleccionó para esta tesis es el INTOUCH de Wonderware, los requerimientos hardware y software para su correcta instalación son los siguientes:

Requerimientos de Software

- Microsoft® Windows® Server 2003 con Service Pack 1
- Microsoft® Windows® 2000 Server con Service Pack 4
- Microsoft® Windows® 2000 Advanced Server con Service Pack 4
- Microsoft® Windows XP Professional con Service Pack 2
- Microsoft® Windows® XP Tablet PC Edition

Requerimientos de Hardware

- PC con 1.2 GHz como mínimo
- RAM de 512 MB como mínimo
- 4 gigabytes (GB) de espacio libre en el disco duro

- Video Súper VGA (1024 × 768) o de mayor resolución
- CD-ROM o DVD drive para la instalación
- Keyboard y mouse

Además de los requerimientos de software y hardware que se necesitan para una correcta instalación del software INTOUCH, se necesita de una herramienta adicional, que establecerá la comunicación entre el PLC Siemens S7-300 y la computadora, este software se llama TOP SERVER.

TOP SERVER es una aplicación que proporciona los medios para traer datos e información de una amplia gama de productos industriales, este software se lo clasifica bajo la categoría de servidores. Dentro de la instalación de TOP SERVER se tiene una amplia variedad de drivers para distintos equipos comerciales dentro de los cuales se encuentran los drivers para la serie de SIEMENS S7 MPI. Una vez instalado el software se procede a la configuración del programa para la adquisición de la información del PLC SIEMENS S7-300.

4.2 CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE TOP SERVER

Como se describió anteriormente, el software TOP SERVER actúa como un servidor, adquiriendo las señales que provee el PLC. Con este objetivo se debe definir y configurar cada una de las señales que se procesaran dentro del INTOUCH.

Una vez iniciado el programa, se debe crear un nuevo proyecto. En la pantalla que aparece luego es donde se observaran las variables a ser adquiridas. En la Figura 4.1 se muestra la ventana de inicio.

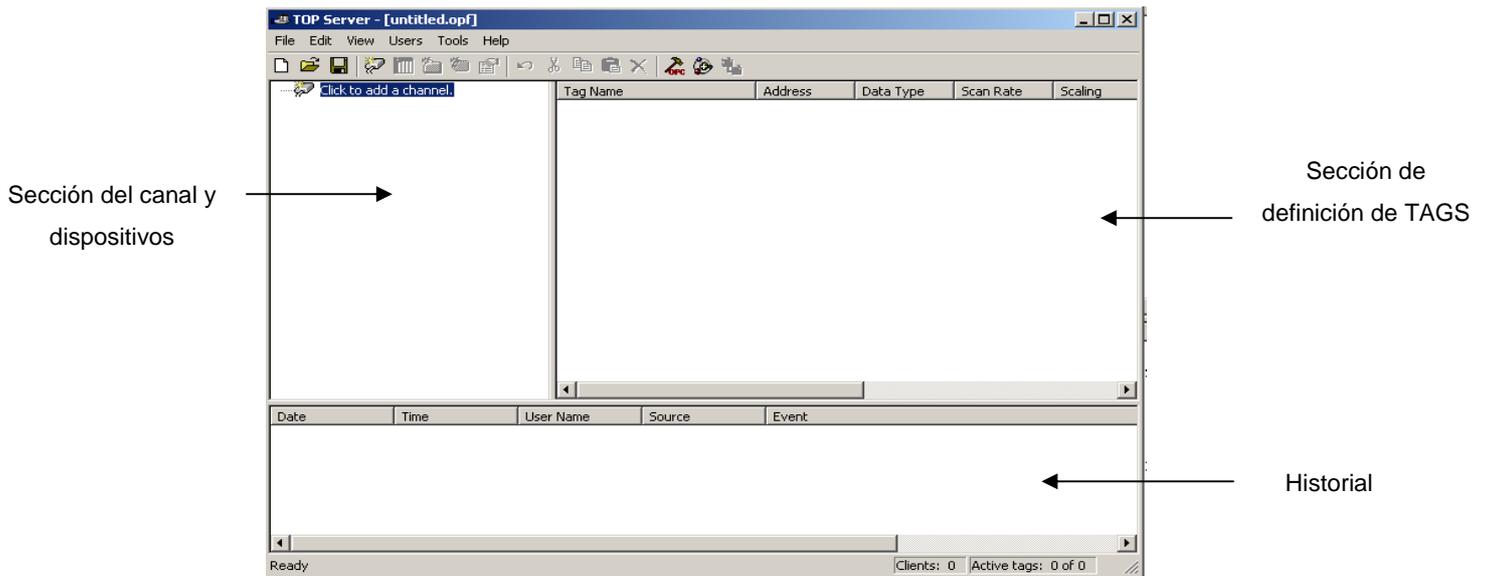


Figura 4.1 Ventana inicio

La ventana de inicio se divide en tres secciones: sección de configuración del canal y dispositivos, sección de definición de tags e historial. Para configurar el canal con el cual se trabajará se da un clic en **Add New Channel** y aparece una ventana donde se da un nombre al canal con el cual se trabajara como se muestra en la Figura 4.2

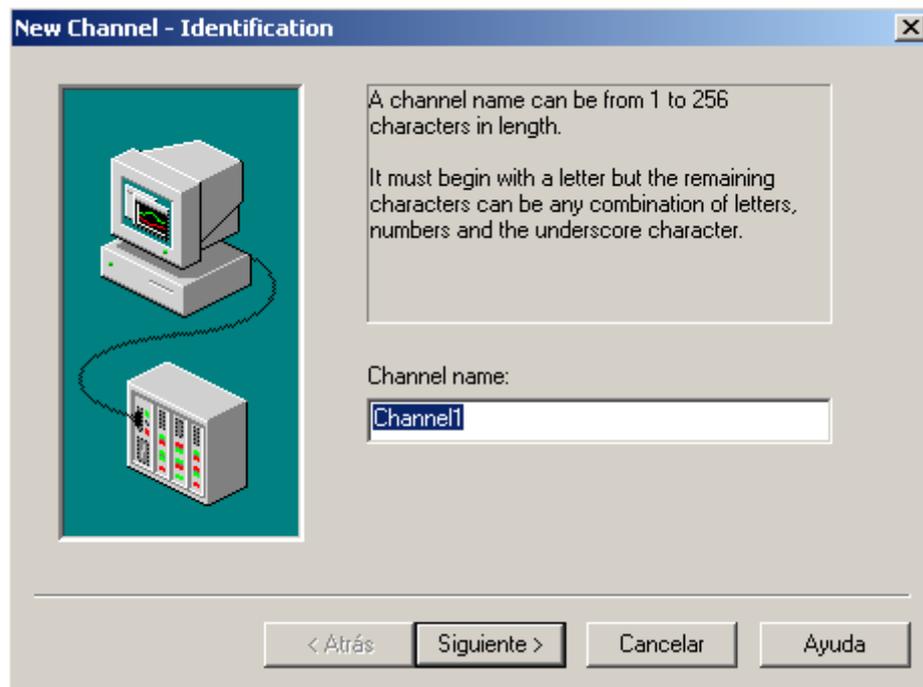


Figura 4.2 Identificación del canal

Una vez asignado el nombre, en la ventana siguiente se selecciona el tipo y marca de fabricante del equipo del cual se va a adquirir la información. En este caso se selecciona Siemens S7 MPI como se puede observar en la Figura 4.3



Figura 4.3 Selección del driver del dispositivo

En la ventana siguiente se configuran los parámetros de comunicación que están definidos para una interfaz MPI. Los parámetros y sus valores son los que se muestran en la Figura 4.4 son los siguientes:

- ID: COM 1 puerto asignado a la interfaz 232
- Baud rate: velocidad de transmisión. En el caso presente para la interfaz MPI se tiene solo dos posibles valores que se los selecciona manualmente en la interfaz MPI. Estos valores son 38400 Kbps y 19200Kbps
- Data bits: número de bits que se transmite, en este caso es 8 bits
- Parity : la paridad escogida es PAR
- Flow control: Ninguno, no se establece un control de flujo

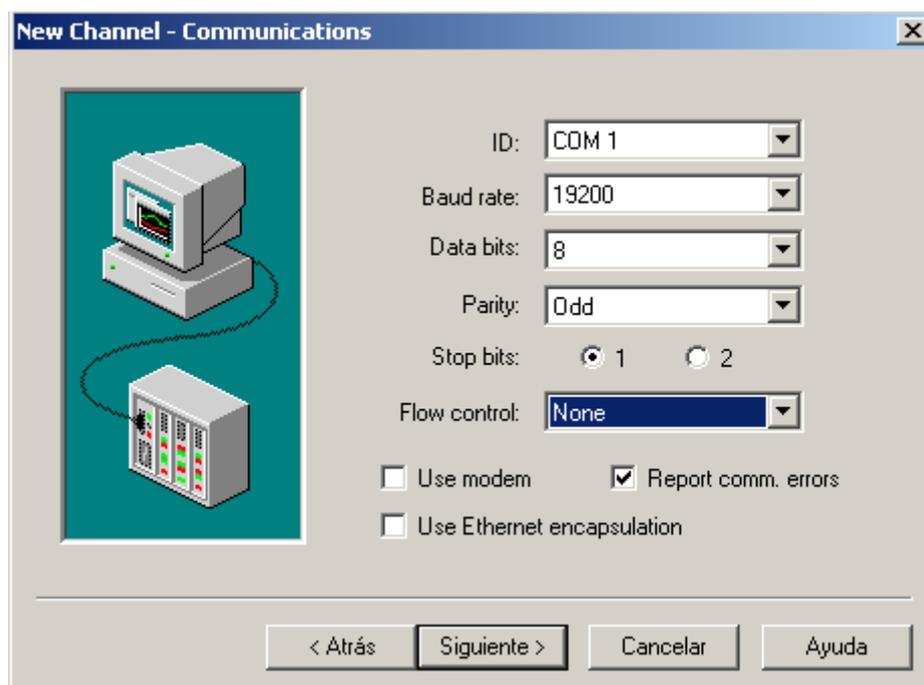


Figura 4.4 Configuración de comunicación

Establecidos los parámetros de comunicación, la siguiente pantalla permite configurar la dirección del bus de la interfaz MPI como se ve en la Figura 4.5. Esta dirección es propia del PLC y en este caso, la dirección es 0.

El otro parámetro es el número máximo de estaciones permitidas en el caso de una red, para esta tesis el número más alto de estaciones es de 31. Igualmente este valor está dado en la parametrización de PLC vista en el Capítulo 3

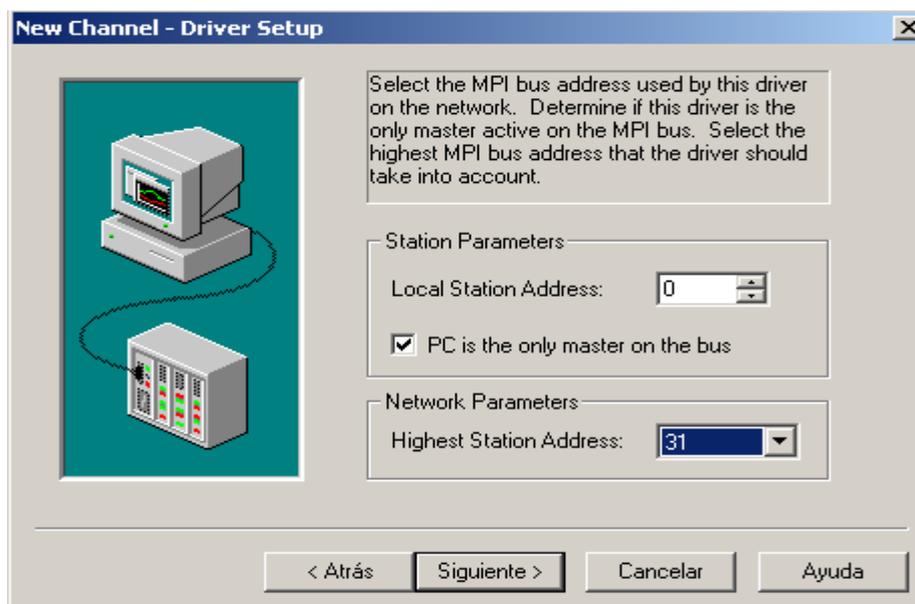


Figura 4.5 Ventana de dirección del MPI

Finalmente la última ventana muestra un resumen de la configuración que se realizó (Figura 4.6).

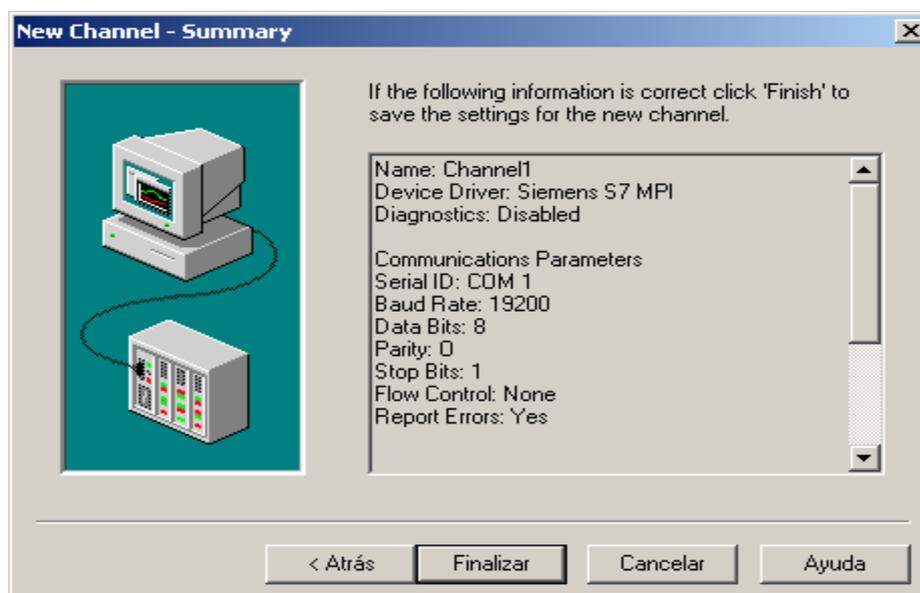


Figura 4.6 Ventana de Resumen

Luego de configurado el canal, se procede a la configuración del dispositivo. Para esto se da clic en **add new device** y se despliega la ventana de la Figura 4.7. Luego de añadido el dispositivo se debe ingresar el nombre del dispositivo, el cual puede ser escogido a voluntad.

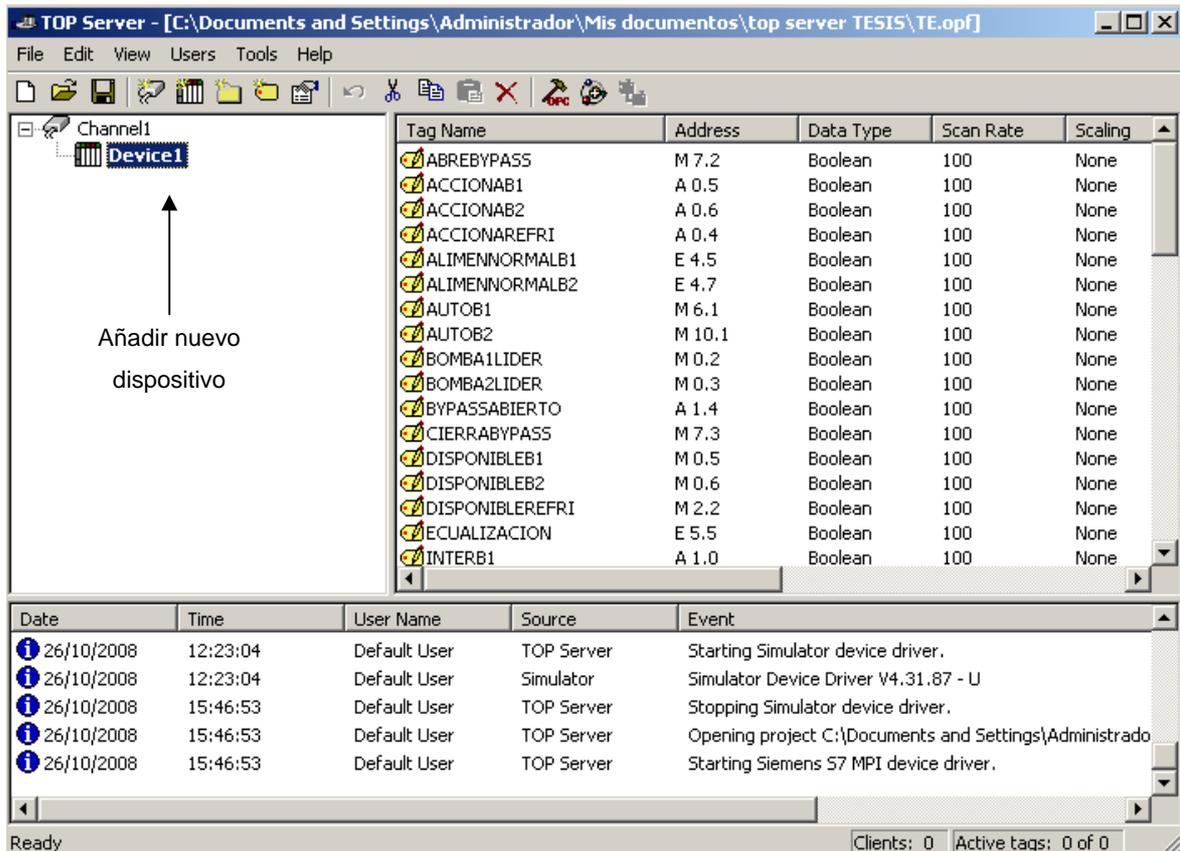


Figura 4.7 Ventana principal

Asignado el nombre del dispositivo se procede a asignar su dirección, en el caso de tener una red. Para este proyecto la dirección asignada ya preestablecida en el PLC es la número 2 en decimal, como se muestra en la Figura 4.8

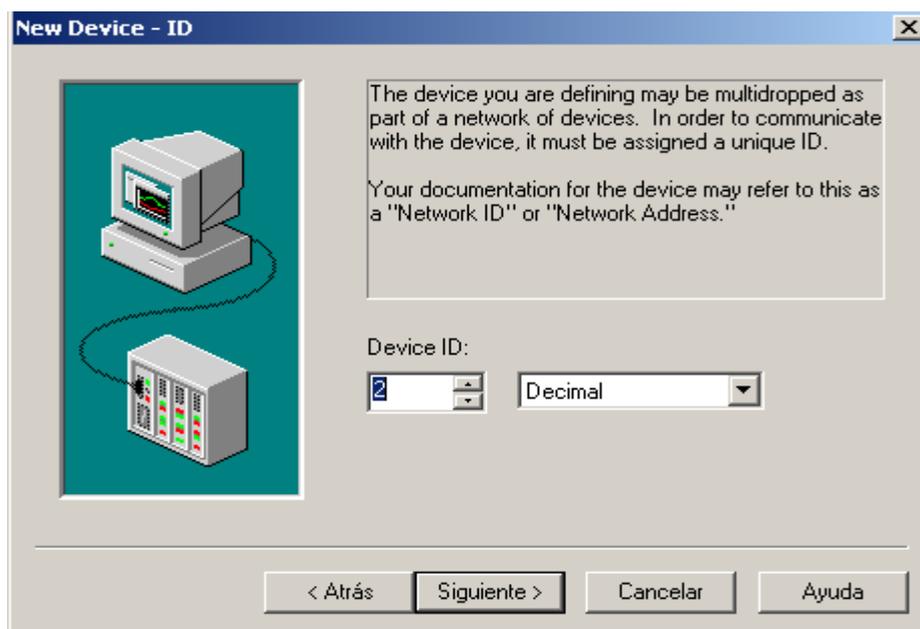


Figura 4.8 Dirección del dispositivo

La siguiente ventana permite configurar el tiempo de interrupción de la conexión, además el tiempo de re conexión y los intentos máximos de re conexiones (Figura 4.9).

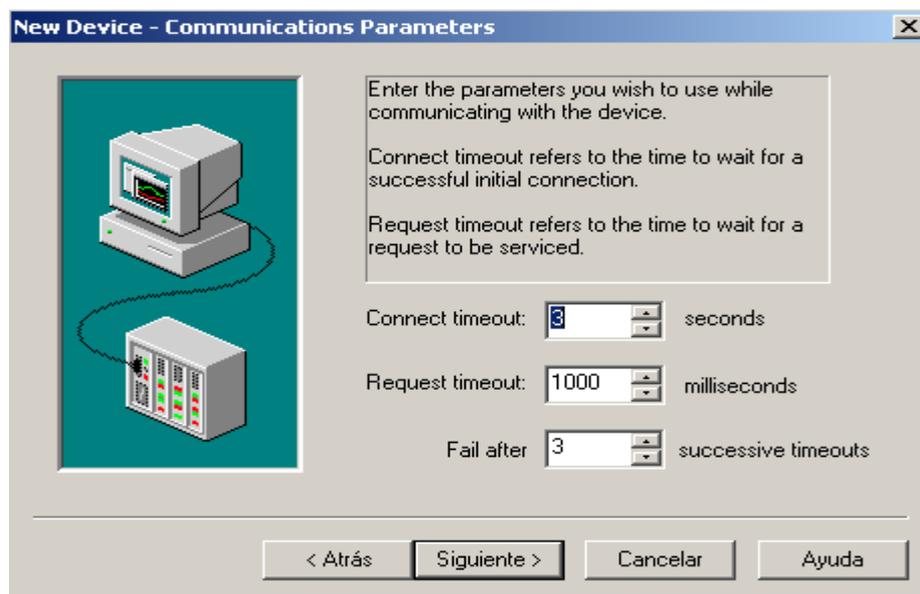


Figura 4.9 Parámetros de conexión

Finalmente se presenta un resumen de la configuración del dispositivo como se ve en la Figura 4.10

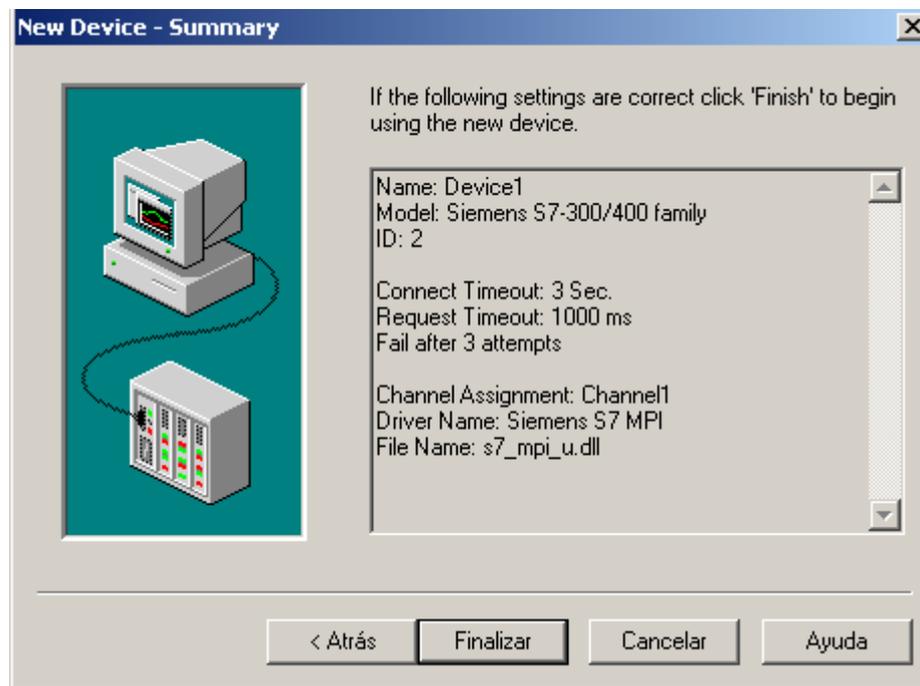


Figura 4.10 Resumen de configuración

Una vez configurado el canal y el o los dispositivos, se puede ingresar los tags que se van a utilizar para enlazar el PLC con el INTOUCH. Estos se los ingresa haciendo clic en **Add new Tag** en la ventana de inicio; de ahí se despliega la ventana que se muestra en la Figura 4.11. En esta ventana se ingresa el nombre del Tag a ser usado en el INTOUCH, luego se ingresa la dirección del TAG junto con el tipo de variable como se utiliza en el PLC. Por ejemplo, si en el PLC se utiliza la salida A 0.1 y esta salida se desea mostrarla en el INTOUCH, se define en el INTOUCH una figura que represente la salida asignándole un Tag y definiéndola del tipo I \ O (entradas \salidas); luego en el Top Server se define el Tag con la dirección A 0.1 y el nombre del Tag definido en el INTOUCH.

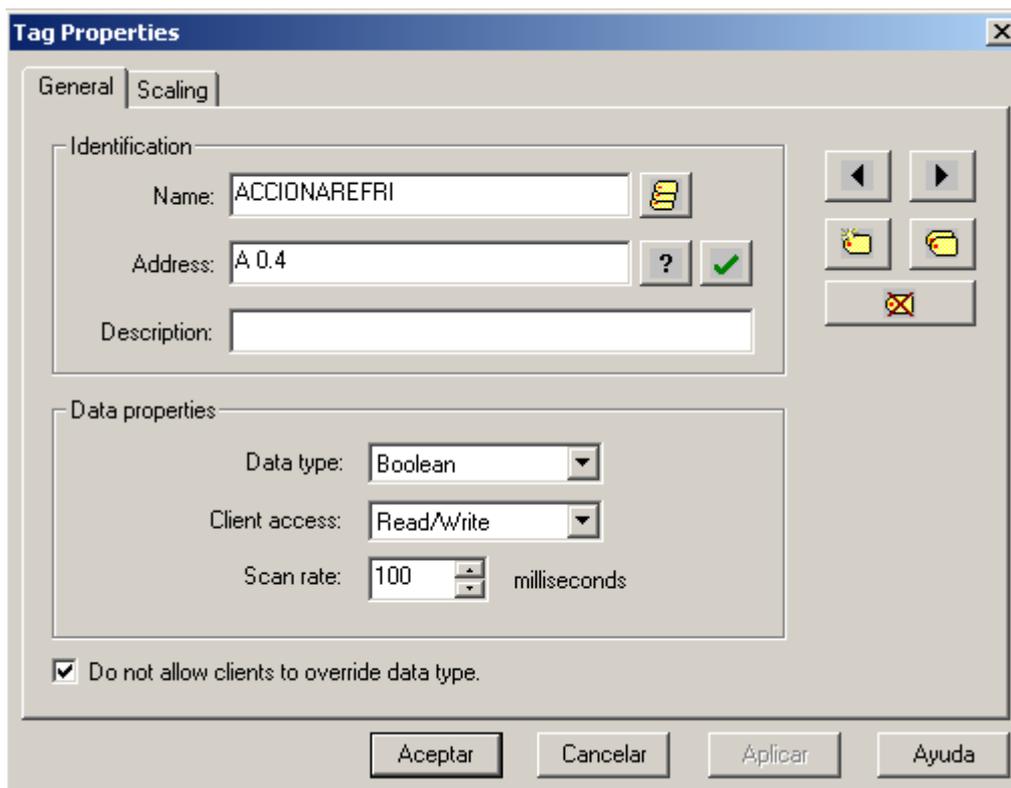


Figura 4.11 Propiedades del Tag

Asignados los nombres y las direcciones, lo que resta es definir un medio de conexión a través de un Alias Map, el Alias Map provee un mecanismo de compatibilidad entre las aplicaciones y el servidor, así como una manera de asignar nombres simples a las referencias de las etiquetas complejas.

Para establecer este mapa de direcciones se selecciona **Edit** → **Alias Map** y se despliega una ventana como se indica en la Figura 4.12. En esta ventana se asigna a todos los Tags la ruta de acceso.

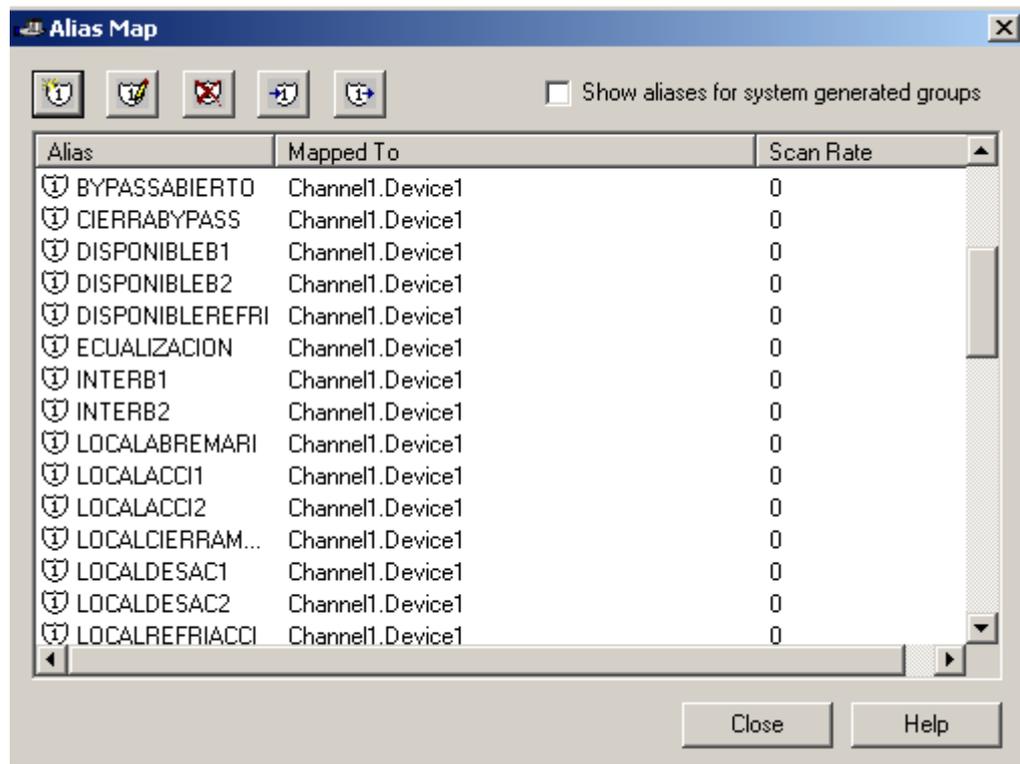


Figura 4.12 Alias Map

Siguiendo los pasos descritos para la configuración del Top Server la adquisición de las señales analógicas o digitales se realiza sin contratiempos.

4.3 ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ HOMBRE MAQUINA

La HMI presenta una estructura con 5 pantallas básicas: Principal, Operación, Alarmas, Setup y Modo de Operación, estas pantallas fueron diseñadas y programadas en el software INTOUCH, el diseño gráfico trata de brindar al operador la mayor visualización del proceso que ocurre en ese momento lo que significa que las pantallas muestran información en tiempo real. Las pantallas de operación son las siguientes:

Principal: Presenta un diagrama simplificado de la unidad hidráulica, con las mediciones provenientes del sistema, estados de las bombas y de las válvulas.

Operación: En esta pantalla se encuentra el control de la unidad hidráulica. Están disponibles los mandos de accionamiento y desaccionamiento el modo de operación.

Alarmas: Tienen como función visualizar todas las fallas ocurridas durante la operación de la unidad hidráulica.

Setup: A través de esta pantalla el usuario puede tener acceso a las pantallas de ajuste de los parámetros de la unidad hidráulica (ajuste de control de las bombas, y de transducción).

Modo de operación: en esta pantalla se muestra el modo de operación en el que se encuentra la central óleo- hidráulica. Este modo puede ser, *Modo de Operación Local* o *Modo de Operación Remoto*.

La estructura de las pantallas esta diseñado de similar manera a la HMI que se encuentra actualmente instalada en la Central San Francisco. Esto se hizo para evitar confusión en el manejo de las pantallas por parte de los operadores.

4.3.1 PANTALLA PRINCIPAL

Esta pantalla presenta un diagrama simplificado de la unidad oleo-hidráulica como muestra la Figura 4.13. En esta ventana se indica mediciones provenientes del sistema, tales como: Nivel Acumulador, Presión del Aceite, Temperatura Aceite y Nivel de tanque de presión. Además se indica el accionamiento o desaccionamiento de las bombas, estado de la Válvula de Intermittencia, indicación del aceite en la tubería. En la parte inferior se tiene un panel de selección de la pantalla a la cual se quiere acceder. Este panel se encuentra en todas las ventanas para tener una fácil movilidad entre cada una de las ventanas. Finalmente esta pantalla permite visualizar una pantalla adicional, que es la pantalla de los actuadores que se muestra Figura 4.14. En esta pantalla se tiene la posibilidad de abrir o cerrar, tanto en modo de prueba como en modo Local, la válvula mariposa y la válvula by pass.

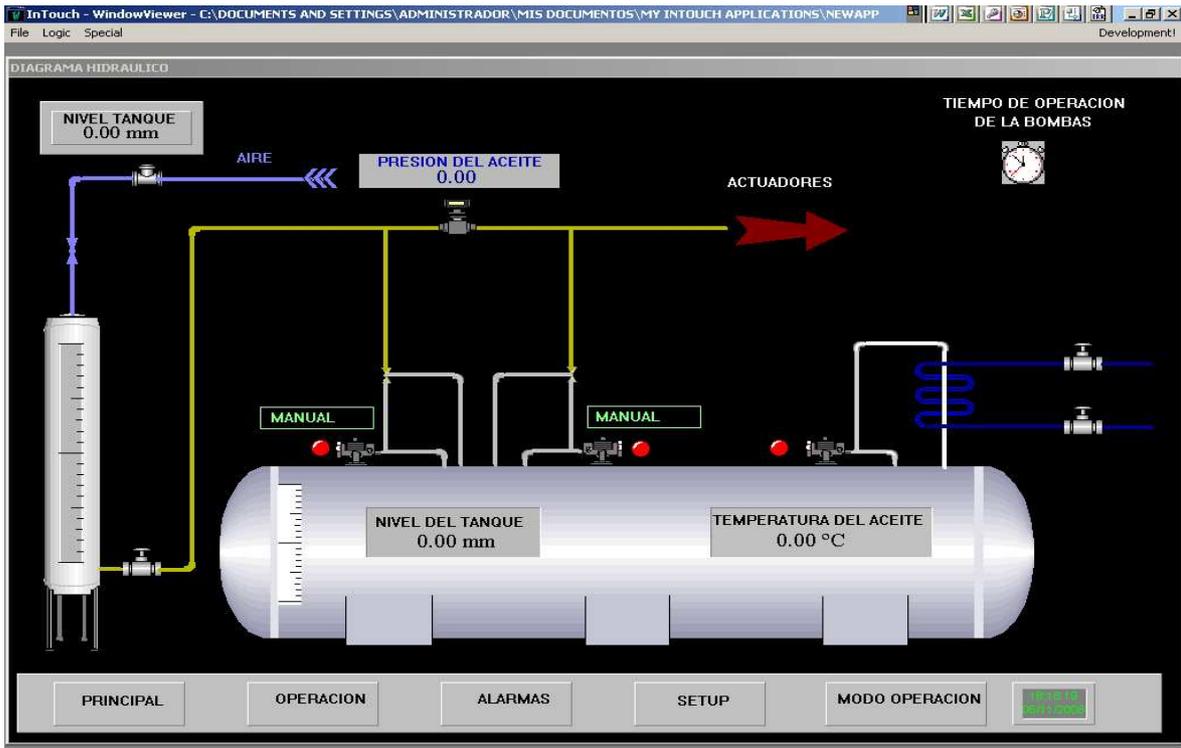


Figura 4.13 Pantalla principal

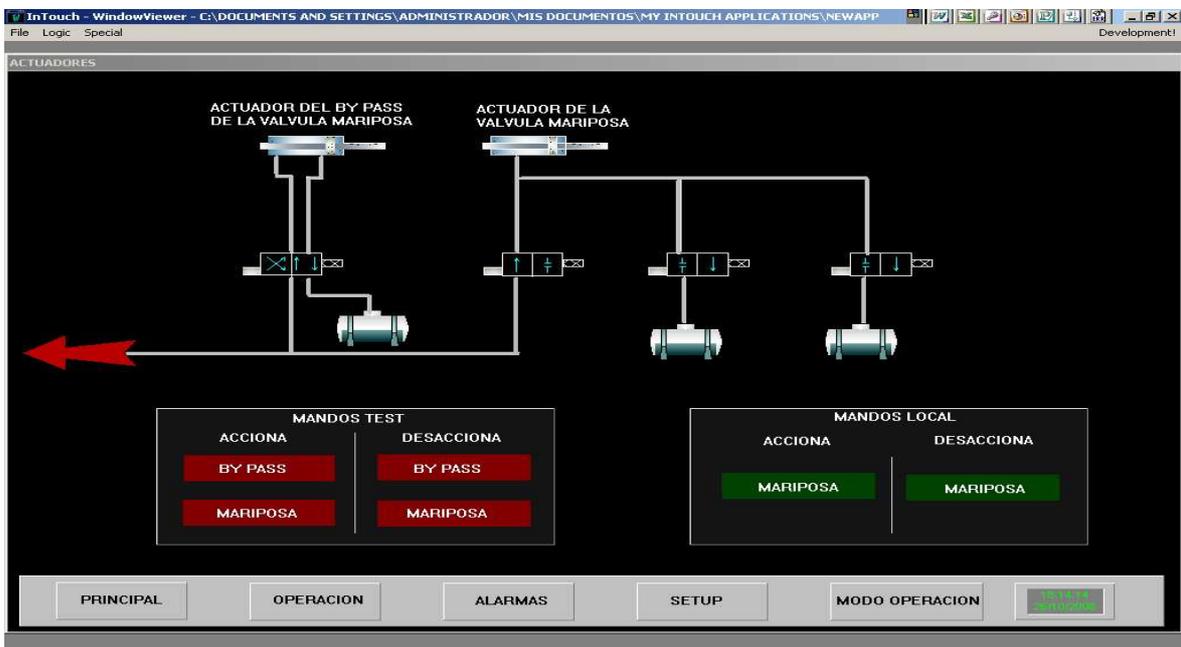


Figura 4.14 Pantalla de los actuadores

4.3.2 PANTALLA DE OPERACIÓN

En esta pantalla se encuentra el control de la unidad hidráulica. Aquí se encuentran disponibles los mandos de acciona / desacciona las bombas, la bomba refrigeración, los actuadores y seleccionar la reposición de aire, la selección bomba líder, rearme de fallas y selección manual / automático. Las palabras de los comandos acciona/ desacciona equivale a abrir y cerrar respectivamente, la razón por lo que se los mantiene con acciona y desacciona es para evitar confusiones con los operadores ya que el sistema actual cuenta con estas palabras para dar la orden de abrir o cerrar.

Además de eso contiene las medidas del Nivel Acumulador, Nivel Tanque, Presión de aceite y Temperatura aceite. En esta pantalla, en el lado izquierdo, se puede visualizar 20 indicaciones del sistema, tales como permisibles, alimentación, etc.

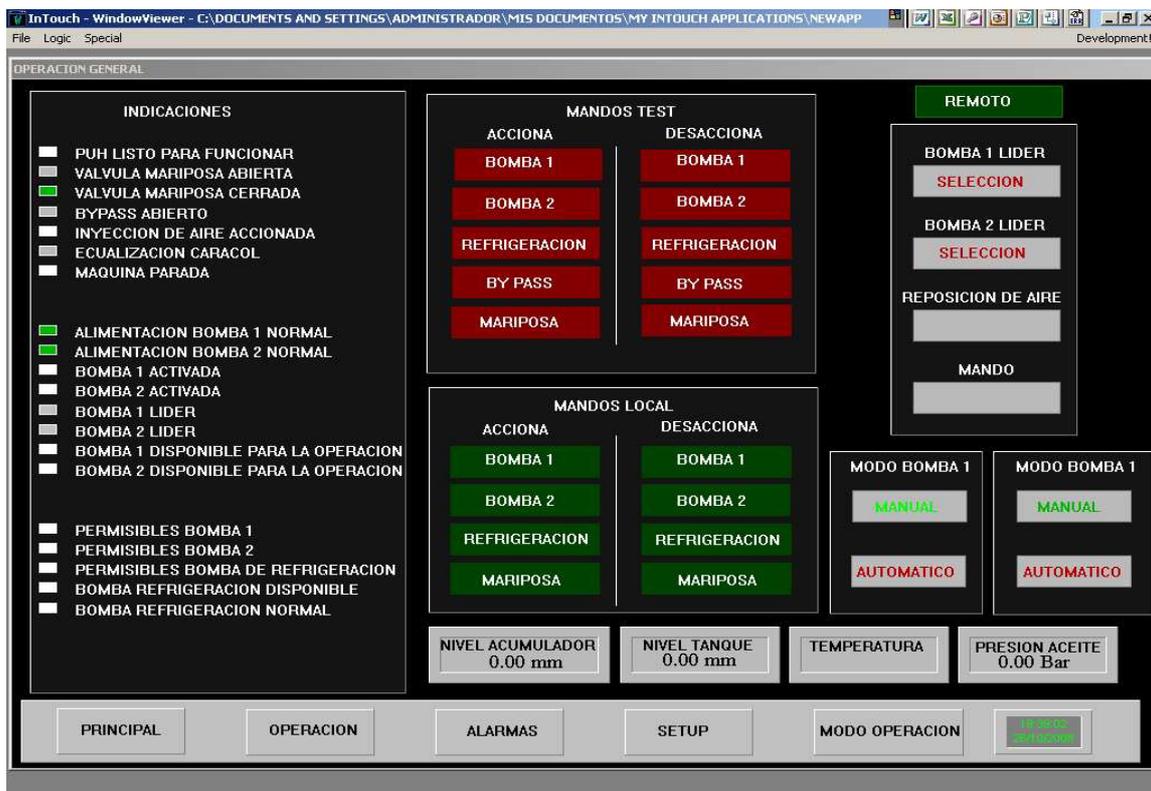


Figura 4.15 Pantalla de operación

En la pantalla de operación hay la opción de desplegar una ventana que permite exportar datos de las señales analógicas al Excel para su procesamiento, además de poder acceder al Excel directamente. También se tiene una opción de ayuda que muestra como es que se pueden exportar los datos. Los archivos que se guardan en esta ventana son tipo “delimitado por comas” (extensión **.csv**). Estos archivos se los guarda en un directorio y se los puede abrir en Excel como un conjunto de datos. Lo único que se debe hacer para guardar estos archivos es seleccionar la fecha y la hora de inicio de la toma de muestras.

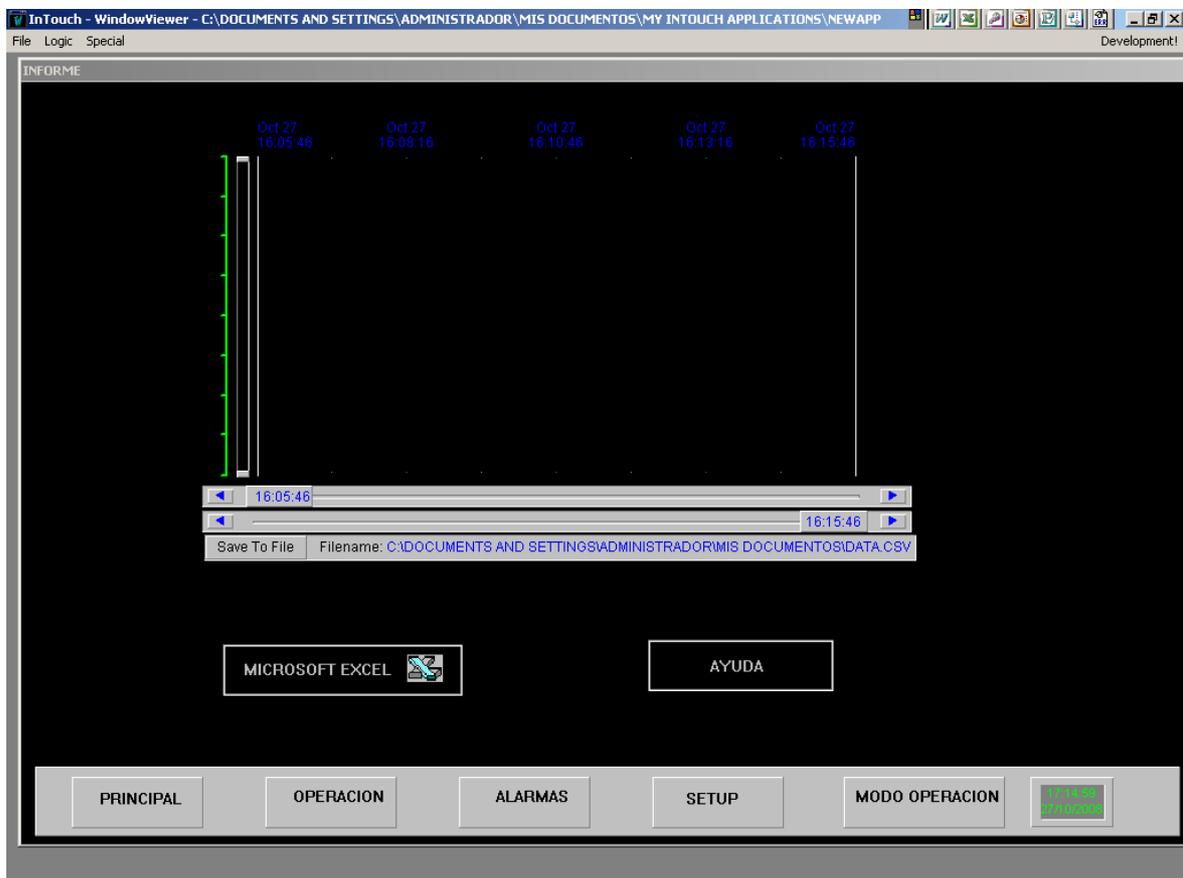


Figura 4.16 Ventana de informes

presión acciona bomba no líder, nivel bajo en el tanque de almacenamiento, nivel alto en el tanque de almacenamiento, nivel bajo en tanque de presión, nivel alto en el tanque de presión y temperatura del aceite alta.

Los valores definidos para la central óleo hidráulica se los muestra en la tabla 4.1

TABLA 4.1	
MEDICIONES EN EL SISTEMA	
Variable del Sistema	Valor
Nivel alto en tanque de almacenamiento	495 mm
Nivel bajo en el tanque de almacenamiento	150 mm
Nivel alto en tanque de presión	725 mm
Nivel bajo en el tanque de presión	160 mm
Presión acciona bomba líder	59 bar
Presión acciona bomba no líder	53 bar
Temperatura alta del aceite en operación	50°C

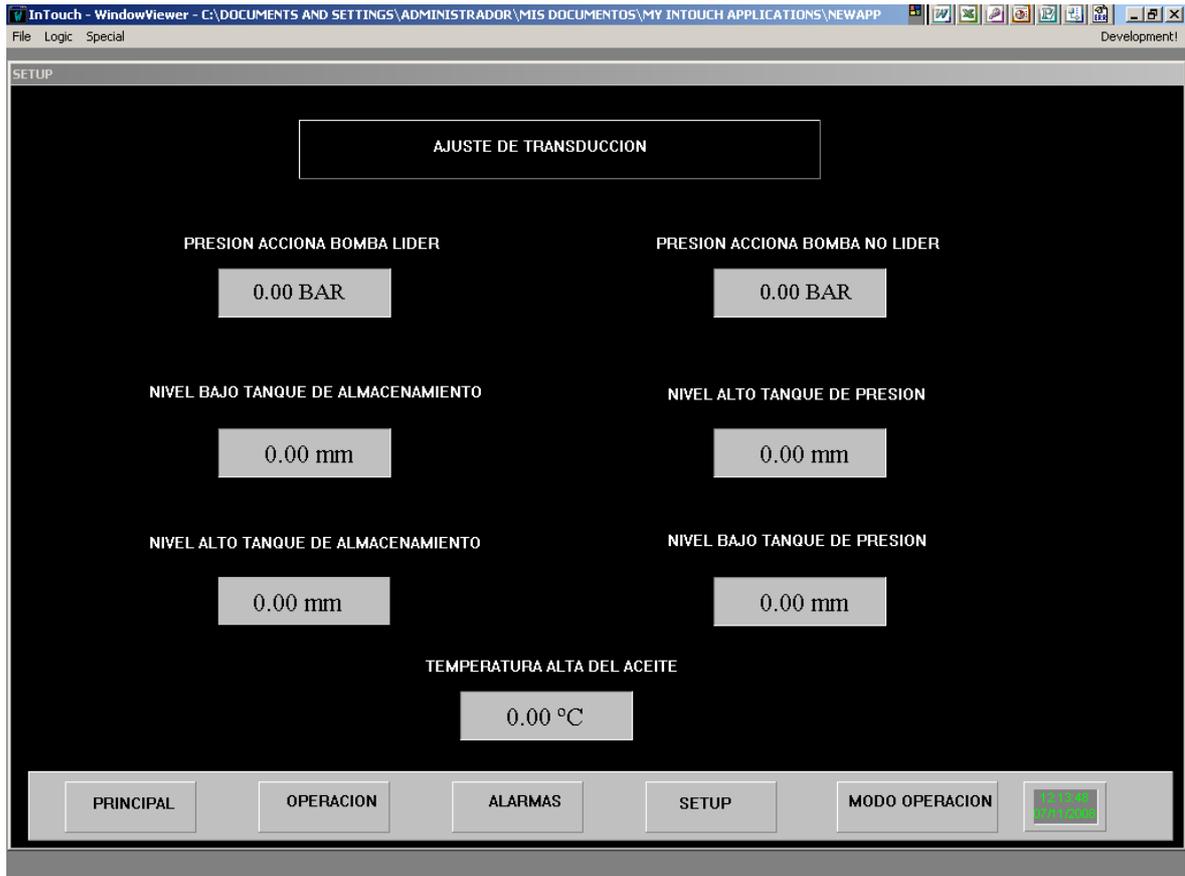


Figura 4.18 Pantalla setup

4.3.5 PANTALLA DE MODO DE OPERACIÓN

En esta pantalla se puede visualizar el estado actual de operación de la central óleo hidráulica, existiendo dos posibilidades: modo de operación local y modo de operación remoto. El modo de operación es elegido mediante el selector externo del tablero de control. En el caso de que el modo de operación este en “local” esta pantalla también permite seleccionar el modo de prueba y de igual manera, regresar al modo de operación local, como se observa en la Figura 4.19

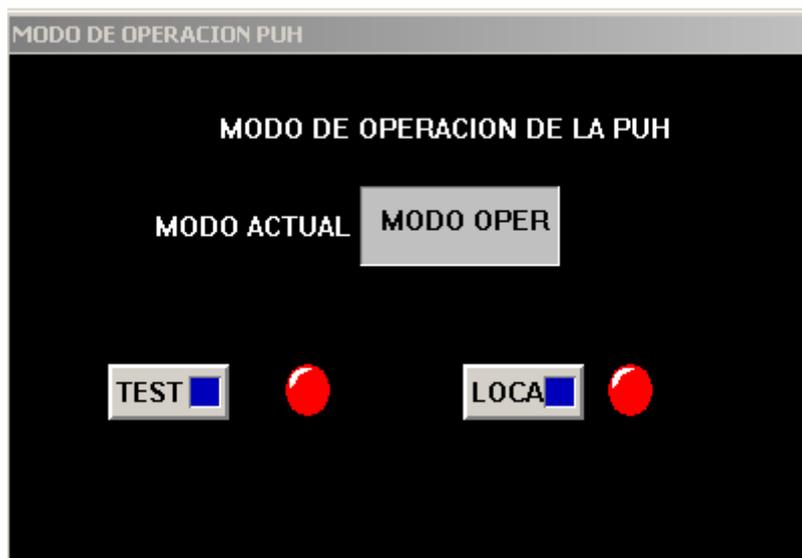


Figura 4.19 Pantalla de modo de operación

Finalmente, cabe aclarar que tanto el programa del PLC como la interfaz hombre máquina pueden someterse a cambios de acuerdo a las necesidades de los Ingenieros de la Central San Francisco. Esta es una de las principales ventajas de este proyecto de tesis ya que este sistema es de libre acceso y cualquier desventaja o mejoramiento del sistema se lo puede realizar al instante, disminuyendo el tiempo y las perdidas económicas que significa tener la central fuera de servicio por una falla en la central óleo-hidráulica.

CAPITULO 5

SIMULACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL

La simulación y pruebas del sistema de control para la central óleo hidráulica no es solo verificar si el sistema está diseñado correctamente, sino también de comprobar el buen funcionamiento de los dispositivos ya instalados, como alimentación, sensores de temperatura, presión y nivel, además de las protecciones que ya existen en el sistema.

La simulación y pruebas del sistema de control deben obedecer a normas de seguridad, procedimientos, precauciones que están contenidas en este capítulo, considerando que los generadores y las turbinas tanto como sus periféricos, poseen un elevado costo. La ejecución de estos procedimientos asociados a la seguridad, cautela y la responsabilidad en la toma de decisiones son fundamentales para evitar daños a estos equipos.

5.1 VERIFICACIÓN DE LAS ALIMENTACIONES DEL PANEL DE LA UNIDAD HIDRAULICA

Para verificar la alimentación se debe medir las tensiones de alimentación del equipo tanto como las generadas por el mismo. Con estos datos se llenan las tablas de verificación de las Alimentaciones, calculando la tolerancia y confirmándolas para que todas se encuentren dentro de la tolerancia aceptable.

Como proceder:

Antes de conectar cualquier fuente de alimentación:

- Desconectar los cables de componentes externos que son alimentados por el panel y no deban ser alimentados en esta etapa.

- Conectar la fuente principal del panel, normalmente 125 VCC, mida los puntos en que la misma deba estar alimentando.
- Conectar la fuente principal del panel con la fuente de alimentación del PLC y verifique su valor.
- Comprobar que todos los módulos del PLC estén alimentados correctamente

Las normas que se utilizan para tener una correcta alimentación en los paneles y en los módulos del PLC, son las normas de la IEEE 421.4 - 1990, en estas normas se establece el valor de alimentación del panel de control junto con la tolerancia que debe tener que es de $\pm 10\%$. La tabla 5.1 nos indica la regleta en la cual se debe conectar la alimentación, al igual que el número de borne donde debe conectarse para no invertir la polaridad.

TABLA 5.1					
ALIMENTACIÓN PANEL – VCC					
TENSIÓN			125	$\Delta\%$	10
Regla	Borne	Señal	Valor (Vcc)	$\Delta\%$	
P	33	(+)	133,4	6,72	
P	34	(-)			
P	39	(+)	133,6	6,88	
P	40	(-)			
Comentarios		Alimentación normal, dentro de la tolerancia del proyecto			

La tabla 5.2 muestra los módulos utilizados en este proyecto junto con la alimentación que necesita cada uno con una tolerancia de $\pm 10\%$ como lo dice la norma de la IEEE 421.4.

TABLA 5.2

--

ALIMENTACIÓN MÓDULOS			
Modulo	Tensión Entrada		Δ%
	MEDIDA	NOMINAL	
PS307	119.2	120	0.6
CPU 314	24.2	24	0.8
Entradas digitales	24.1	24	0.41
Salidas digitales	24.05	24	0.20
Entradas analógicas	23.9	24	0.83
Comentarios	Alimentación normal, dentro de la tolerancia del proyecto		

5.2 ALIMENTACIÓN DA LAS BOMBAS DE LA UNIDAD HIDRÁULICA – VCA

La alimentación de las bombas se basa de acuerdo a la norma de IEEE 421.4 – 1990 en la tabla 5.3 indica en regleta debe conectarse las bombas además de borne en el cual cada fase debe ir conectado.

TABLA 5.3				
ALIMENTACIÓN BOMBAS DE LA UNIDAD HIDRÁULICA				
TENSIÓN			480 VCA	Δ% 10
Regla	Borne	Fase	Tensión Entrada	 Δ%
BOMBA 1				
P	1	Fase A	475	1,04
P	2	Fase B		

P	3	Fase C	475	1,04
BOMBA 2				
P	4	Fase A	475	1,04
P	5	Fase B		
P	6	Fase C		
Comentarios		Alimentación normal, dentro de la tolerancia del proyecto		

5.3 AJUSTES DEL SISTEMA HIDRÁULICO

En la tabla 5.4 siguiente se muestran los valores con los cuales la unidad hidráulica funciona correctamente, estos valores fueron tomados de sistema actual que se encuentra en funcionamiento, estos valores me sirven para configurar correctamente la interfaz hombre máquina que se desarrollo en esta tesis, así como también para probar los comandos y estados de las señales que procesa el PLC.

TABLA 5.4			
AJUSTE DEL SISTEMA HIDRÁULICO			
Equipo	Función	Valor	Observaciones
Tanque de presión	Nivel normal	640 a 660 mm	Operación normal a 61 bares a partir del comienzo de la escala del medidor de nivel
Tanque de presión	Nivel accionamiento complementación del aire-comprimido	660 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Nivel muy alto	725 mm	Ajuste en el panel

			PUH
Tanque de presión	Nivel bajo (alarma)	220 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Nivel muy bajo	160 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Tiempo de inyección de aire-comprimido	45 seg	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión normal	61 bar	Presión normal de operación
Tanque de presión	Presión accionamiento bomba líder	59 bar	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión accionamiento bomba reserva	53 bar	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión baja (alarma)	51 bar	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión muy baja	50 bar	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión muy alta	66 bar	Ajuste en el panel PUH
Tanque de presión	Presión muy baja	50 bar	Ajuste por presostato
Tanque de presión	Presión muy alta	70 bar	Ajuste por presostato
Tanque de almacenamiento	Presión normal en la línea de la válvula mariposa	10 bar	Ajuste por presostato
Tanque de almacenamiento	Nivel normal	240 a 250 mm	Medido desde la arista inferior del reservatorio con la válvula mariposa abierta
Tanque de almacenamiento	Nivel bajo (alarma)	200 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de almacenamiento	Nivel muy bajo	150 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de almacenamiento	Nivel alto	495 mm	Ajuste en el panel PUH
Tanque de almacenamiento	Temperatura normal	27 °C	Medido con la unidad en operación normal
Tanque de	Temperatura alta	45°C	Ajuste en el panel

almacenamiento	(alarma)		PUH
Tanque de almacenamiento	Temperatura muy alta	50°C	Ajuste en el panel PUH

5.4 VERIFICACIÓN DE COMANDOS Y ESTADOS DE LA HMI

La verificación de los estados y comandos va a ser realizada en las tres etapas, esto es: modo de operación TEST, modo de operación LOCAL y modo de operación REMOTO, en las tablas 5.5, tabla 5.6 y tabla 5.7 se probará cada una de las funciones que realiza la HMI en los tres modos de operación.

Hay que tener en cuenta que la verificación de los estados de las funciones solo es posible si las condiciones mínimas para su operación están satisfechas, estas condiciones pueden confinarse en la HMI, si no se cumplen la acción no se realizará

5.6.1 MODO DE OPERACIÓN TEST

TABLA 5.5			
FUNCIÓN / TECLA	A	NA	ACCIÓN REALIZADA
Selector externo en local			Sistema de control en modo de operación local
Modo de operación test			Sistema del control en modo de operación Test
Mando acciona bomba 1			Acciona bomba 1
Válvula de intermitencia desligada luego de 5 segundos			Válvula de intermitencia no es accionada por estar en modo de prueba

Mando desenergiza bomba 1			Desenergiza bomba 1
Mando acciona bomba 2			Acciona bomba 2
Válvula de intermitencia desligada luego de 5 segundos			Válvula de intermitencia no es accionada por estar en modo de prueba
Mando desenergiza bomba 2			Desenergiza bomba 2
Mando acciona bomba de refrigeración			Acciona bomba de refrigeración
Mando de apertura By Pass			Abre la válvula By Pass
Mando apertura válvula mariposa			Abre la válvula mariposa siempre y cuando el by pass abierto y la condición de ecualización del caracol cumplida
Mando Cierre by pass			Cierra válvula by pass
Mando cerrar válvula mariposa			Cierra válvula mariposa

A: ACCIONA AN: NOACCIONA

5.6.2 MODO OPERACIÓN LOCAL

TABLA 5.6			
FUNCIÓN / TECLA	A	NA	ACCIÓN REALIZADA
Selector externo en local			Sistema de control en modo de operación local
Mando selección bomba 1 líder			Selecciona la bomba 1 como líder
Mando acciona bomba 1			Acciona bomba 1
Válvula de intermitencia desligada luego de 5 segundos			Válvula de intermitencia es desligada la presión pasa al sistema
Mando desenergiza bomba 1			Desenergiza bomba 1
Mando selección bomba 2 líder			Selecciona la bomba 2 como líder
Mando acciona bomba 2			Acciona bomba 2
Válvula de intermitencia desligada luego de 5 segundos			Válvula de intermitencia es desligada, la presión pasa al sistema
Mando desenergiza bomba 2			Desenergiza bomba 2

Mando acciona bomba de refrigeración			Acciona bomba de refrigeración
Mando reposición de aire			Acciona la reposición del aire en el acumulador un tiempo t
Mando apertura válvula mariposa			Abre la válvula mariposa siempre y cuando el by pass abierto (en este caso con el mando abrir válvula mariposa automáticamente da la señal de abrir el By Pass) y la condición de eculización del caracol cumplida
Mando cerrar válvula mariposa			Cierra válvula mariposa (en este caso dar la orden de cerrar válvula mariposa cierra automáticamente el By Pass se cierra)

A: ACCIONA AN: NOACCIONA

5.6.3 MODO OPERACIÓN REMOTO

En el modo de operación remoto ninguno de los comandos de la HMI se encuentran habilitados, en este caso la HMI solo sirve para visualizar el funcionamiento de la central óleo hidráulica, así como el reconocimiento de las posibles alarmas, en este modo de operación la central óleo hidráulica funciona de manera automática recibiendo ordenes solamente de sistema de supervisión y control (SDSC).

TABLA 5.7			
FUNCIÓN / TECLA	A	NA	ACCIÓN REALIZADA
Selector externo en remoto			Sistema de control en modo de operación remoto

Mando selección bomba 1 líder desde SDSC		Selecciona la bomba 1 como líder
Mando SDSC acciona las bombas		Acciona la bomba que se encuentre como líder
Bomba de refrigeración		Inmediatamente que la bomba líder arranca la bomba de refrigeración entra en servicio
Válvula de intermitencia bomba líder		Válvula de intermitencia está desenergizada siempre que la presión no baje
Presión baja		Válvula de intermitencia se energiza y la presión pasa al sistema hasta llegar a la presión norma (63 bar)
Presión muy baja		Acciona bomba no líder(53 bar)
Válvula intermitencia bomba no líder		Válvula de intermitencia accionada durante cinco segundos luego se desliga y permite que la presión vaya al sistema
Presión normal		Bomba no líder se apaga y válvula de intermitencia de bomba líder se desenergiza
Nivel de aceite alto en el tanque de almacenamiento		Acciona alarma nivel alto tanque de almacenamiento, este caso solo da alarma porque el tanque de almacenamiento esta dimensionado para recolectar todo el aceite que se encuentra en el sistema
Nivel de aceite bajo en el tanque de almacenamiento		Esto produce que todas las bombas incluyendo la de refrigeración se desaccionen previniendo que las bombas se quemen al no existir aceite en la succión de la bomba

Alimentación normal bomba 1			Apaga bomba 1 produciendo alarma en la HMI
Protección bomba 1			Apaga bomba 1 produciendo alarma en la HMI
Alimentación normal bomba 2			Apaga bomba 2 produciendo alarma en la HMI
Protección bomba 2			Apaga bomba 2 produciendo alarma en la HMI
Mando parar bombas SDSC			Apaga las bombas incluyendo la bomba de refrigeración
Nivel de aceite alto en el tanque de presión			Acciona la reposición de aire en el tanque de presión
Nivel de aceite bajo en el tanque de presión			Da alarma de nivel bajo en el tanque de presión
Temperatura alta			Da alarma de temperatura alta en la HMI
Mando abrir válvula mariposa			Abre la válvula mariposa si las condiciones de apertura son satisfechas
Presión normal válvula mariposa			Indica que la presión en el sistema está en niveles normales para la apertura de la válvula mariposa
By Pass abierto			Indica que el By Pass se abrió totalmente previa la orden de apertura de la válvula mariposa
Ecuilización del caracol			Indica que la ecuilización del caracol se realizó previa la apertura de la válvula By Pass, la ecuilización del caracol es una condición necesaria para la apertura de la válvula mariposa.

Cerrar válvula mariposa SDSC			Cierra válvula mariposa
------------------------------	--	--	-------------------------

A: ACCIONA AN: COACCIONA

5.5 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA UNIDAD HIDRÁULICA

En la tabla 5.8 se muestra valores reales medidos de la unidad hidráulica, estos valores nos indican el buen funcionamiento de la unidad hidráulica en condiciones normales.

TABLA 5.8		
MEDICIONES DEL SISTEMA DE PRESIÓN DEL ACEITE		
Variable del Sistema	Valor Medido	Observación
Presión del Sistema	61 bar	-
Tiempo de Intermitencia Activa (bomba cargando acumulador)	30 s	Medido en operación normal.
Tiempo de Repuesto en Vacío (bomba en vacío)	3 min	Medido en operación normal.
Temperatura del aceite en operación	27 °C	Medido en operación normal.

5.6 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL ACUMULADOR

La tabla 5.9 nos indica la respuesta del tanque acumulador de presión en la apertura y cierre de los alabes.

TABLA 5.9		
ENSAYO	Tanque de presión	
Posición del Servomotor	Presión (bar)	Nivel (mm)
Condición Inicial	56,1	554
Cierre	52,4	444
Apertura	49,3	327
Cierre	46,8	218
Apertura	44,6	109
50% cerrado	43,7	42
NÚMERO APERTURAS Y CIERRES	4 - 5	

5.7 MEDICIÓN DE LOS TIEMPOS DE LA VÁLVULA MARIPOSA

La tabla 5.10 mide los tiempos de respuestas en los cuales la válvula mariposa y by pass se abre o cierra, estos valores son el promedio de una toma de 10 muestras.

TABLA 5.10		
Variable del Sistema	Valor Medido	Observación
Tiempo de apertura	180 s	Atiende especificación
Tiempo de cierre normal	180 s	Atiende especificación
Tiempo de cierre emergencia	120 s	Atiende especificación
Tiempo de apertura del bypass	22 s	Atiende especificación
Tiempo de cierre del bypass	22 s	Atiende especificación

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Realizadas las pruebas en el sistema de control una de las variables de mayor variación es la presión. En el caso de tener presión baja en el sistema hidráulico se llegó a la conclusión que las posibles causas de la caída de la presión pueden ser por: rompimiento de las tuberías, falla en el panel de control, defecto en la bomba principal y de reserva.

- La presión alta en sistema es una variable de mucha consideración, sin embargo con la presión alta el sistema continúa operando, pues las válvulas de alivio mantienen la presión del sistema dentro de los límites de seguridad. Luego de analizar el caso de presión alta en el sistema se concluye que las causas probables de presión alta son: falla del panel de control, ajuste erróneo de los setpoints del control de presión de las bombas.

- En caso de presión muy alta en el tanque de presión la válvula de sobre-presión que es calibrada mecánicamente y que no tiene ninguna relación con el sistema de control, actúa inmediatamente y descarga la presión al tanque de almacenamiento, sin embargo el sistema continúa operando y las alarmas respectivas se muestran en el HMI así como en el SDSC. Este caso de presión muy alta en el sistema puede darse solamente por una falla en la válvula de intermitencia que se encuentra en cada bomba.

- En el caso que la temperatura del aceite sea alta, esta es advertida por la lógica del sistema de control, la situación de temperatura alta del sistema hidráulico puede producirse por un defecto en el funcionamiento de las válvulas limitadoras de presión. Cuando el aceite trabaja a temperaturas altas se produce una degradación del mismo.

- En el diseño implementado tiene la ventaja de trabajar aisladamente de la HMI, esto es, si se decide desconectar la HMI del PLC, el control continúa funcionando normalmente siempre que el control esté en modo automático que es el modo de operación normal del sistema.

- En principio la instalación del software para el desarrollo de la HMI se realizó en una computadora de última generación (HP Pavilion tx1000), actualmente estas computadoras no cuentan con el puerto de comunicaciones RS-232, pero sin embargo se adquirió un convertidor de USB a RS-232 pero tras un sin número de pruebas se llegó a la conclusión de que tras aumentaban las señales que se adquirirían el sistema se volvía inestable y tiende a colgar al sistema operativo.

- El sistema actual cuenta con la opción de presentación de datos de las señales analógicas en un intervalo de tiempo dado. Con estos datos presentados en Excel uno puede analizar de mejor manera la variación de las señales analógicas y determinar posibles anomalías así como también de poder crear una base de datos para su estudio.

- Las pruebas realizadas con las señales analógicas del sistema nos dio como resultado valores que no correspondían de acuerdo al valor de voltaje adquirido, por lo tanto se llegó a la conclusión de que los

instrumentos de medición no se han calibrado correctamente, esta es la razón por la cual los valores de voltaje no correspondían al valor real de medición.

- Las fallas en el sistema óleo hidráulico pueden ser variadas, pero si falla el PLC el sistema da una señal de PUH no lista, lo que produce la parada obligatoria de la unidad a la cual pertenece la PUH. El no tener un sistema redundante que asuma el control en caso de falla del PLC produciría grandes pérdidas además del tiempo que tomaría reparar las fallas en el PLC.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que en el caso de tener presión baja en el sistema oleo hidráulico se debe proceder con cada una de las causas posibles de la siguiente manera:
 - **Rompimiento de las tuberías:** esta falla es fácil de detectar lo que hay que hacer es observar cantidades de aceite alrededor de la tubería, la solución es cambiar la tubería afectada.
 - **Defecto en las motobombas principal y de reserva:** las posibles causas para el no funcionamiento de las motobombas son: motores quemados, bombas dañadas, protecciones actuadas.
 - **Falla en el panel de control:** esta falla ocurre en el caso de que los contactores o relés auxiliares dejen de funcionar ya sea malos contactos o bobinas abiertas, el sistema hidráulico no será debidamente comandado. En el caso de sospecha de falla en estos equipos se debe hacer el test del funcionamiento de cada uno de ellos de manera aislada.

- Es recomendable que el nivel de aceite en el tanque de almacenamiento, debe estar siempre dentro de los límites establecidos en el indicador de nivel. La manera de verificar si el nivel de aceite está adecuado es por la lectura directa del indicador de nivel situado en la lateral del tanque. En el caso que el nivel de aceite baje al nivel mínimo permitido para operación segura de la central hidráulica, un comando de bloqueo será dado por el regulador de velocidad.

- En el caso de tener presión alta el sistema continúa operando, pero esto no es recomendable, porque en el caso que la unidad hidráulica opere por

mucho tiempo con presión alta, ocurrirá un calentamiento del aceite, causando actuación de la protección de temperatura. Esta es una condición de bloqueo de la unidad hidráulica.

- Se recomienda que para la comunicación entre el PLC y la interfaz HMI se utilice computadoras que posean puerto de comunicaciones RS-232, debido que los convertidores de USB a RS-232 no garantizan un buen funcionamiento del sistema.

- Se recomienda tener almacenado el programa del PLC en un memoria flash EPROM para que en caso de una falla de energía eléctrica de alimentación del PLC y a la vez una falla de la batería de respaldo no se pierda el programa almacenado.

- Actualmente, el sistema de control de la unidad hidráulica permite tener acceso fácilmente al cambio de los setpoint, del estudio realizado se recomienda restringir el acceso a los cambios de parámetros de los setpoint, porque podrían producirse daños en el sistema o partes del mismo, si es que personal no autorizado realiza modificaciones indebidas.

- Se recomienda que la computadora donde se va a cargar el software de la HMI sea completamente aislado de dispositivos de almacenamiento externos y de conexiones a Internet, debido que la infección del sistema operativo con un virus podría interferir en el buen funcionamiento de la HMI.

- Es recomendable calibrar los instrumentos de medición de acuerdo a las normas que determine el producto, esto evitaría malas mediciones y posibles fallas en el sistema óleo hidráulico.

- Debido a la importancia de la unidad óleo hidráulica en la central hidroeléctrica San Francisco, es recomendable que el sistema que controla automáticamente la central sea redundante, con el fin de evitar que en el caso de un desperfecto en el PLC o en una de sus tarjetas otro PLC que esté a manera de esclavo del principal tome el control del sistema en caso de avería del PLC principal.

- Después de culminar este trabajo, me permito recomendar a las autoridades de la Escuela Politécnica Nacional que tengan una relación más directa con las centrales de generación eléctrica para el desarrollo de trabajos en las instalaciones, debido a que existen muchos sistemas que son exclusivos de ciertas transnacionales y que trabajan como sistemas cerrados lo cual crea ciertas ataduras a las instituciones del estado con el desarrollo tecnológico de otros países y que nuestros ingenieros pueden y deben desarrollar para mejorar y adquirir experiencia en la implementación de sistemas complejos.

BIBLIOGRAFÍA

- VATECH, Análisis de la turbina Francis. Rev 2. Italia .2005
- VATECH, Realizado por F. Pezzato / C. Baron, Análisis del alabe directriz. Rev 1. Italia .2005
- VATECH, Arreglo de la unidad hidráulica, Regulador de velocidad de la turbina, Rev 1.
- SIEMENS, SIMATIC STEP 7, Introducción y ejercicios básicos, Versión 5.1
- SIEMENS, SIMATIC STEP 7, Programar con Step 7, Versión 5.1
- SIEMENS, SIMATIC STEP 7, Configurar el Hardware y la comunicación con Step 7, Versión 5.1
- D680 SERIES, Proportional Control Valves with Integrated Electronics ISO 4401 Size 05 to 10, Hanns-Klemm-Straße 28 71034 Böblingen (Germany).
- IFM electronic PN2022 Detector de presión electrónico PN20.
- IFM electronic PF2658 Detector de presión electrónico PF26.
- VA TECH HYDRO Brasil, Diagrama eléctrico del tablero del regulador de velocidad. Rev 3, Brasil.
- VA TECH HYDRO Brasil, Diagrama eléctrico del tablero de la unidad Hidráulica. Rev 5, Brasil.
- PROYECTO HIDROELÉCTRICO SAN FRANCISCO, Diagrama Hidráulico, Regulador de velocidad de la turbina.
- In Touch, guía de usuario, revisión B, Enero 1997, Wonderware Corporation.
- Curso de In Touch básico, versión 7.1, Logitec s.a.

GLOSARIO

HMI: Interfaz Hombre Maquina

TBM: Tunnel Boring Machine

PLC: Programador Lógico Controlable

SF6: Hexafluoruro de azufre

PID: Proporcional integral y derivativo

ASTM: American Society of Testing Materials

SMVI: Sistema de monitoreo de velocidad independiente

RV: Rele de velocidad

RSV: Rele de sobrevelocidad

NA: Normalmente abierto

PUH: Panel de la unidad hidráulica

RTD: Sensor de temperatura resistivo

PS: Power source

CPU: Central process unit

IM: Modulo de interfaz

SM: Modulo siemens

DO: Digital output

DI: Digital input

AI: Analog input

AO: Analog output

CP: Communication port

MPI: Multipoint interface

PPI: Point to point interface

SDSC: Sistema de supervisión y control

ANEXOS

