



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROPUESTA PARA OPTIMIZAR LA AUTOMATIZACIÓN DEL CENTRO DE
ENERGÍA ESCUINTLA, SIDERÚRGICA DE GUATEMALA**

Ricardo Francisco López Sandoval

Asesorado por el Ing. José Ernesto López Sánchez

Guatemala, agosto de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA OPTIMIZAR LA AUTOMATIZACIÓN DEL CENTRO DE
ENERGÍA ESCUINTLA, SIDERÚRGICA DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

RICARDO FRANCISCO LÓPEZ SANDOVAL

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ERNESTO LÓPEZ SÁNCHEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón |
| VOCAL IV | Br. Juan Carlos Molina Jiménez |
| VOCAL V | Br. Mario Maldonado Muralles |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|---------------------------------------|
| DECANO | Ing. Sydney Alexander Samuels Milson |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Fernando Rodas |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Alberto Quijivix Racancoj |
| EXAMINADOR | Ing. Otto Fernando Andrino González |
| SECRETARIO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA PARA OPTIMIZAR LA AUTOMATIZACIÓN DEL CENTRO DE ENERGÍA ESCUINTLA, SIDERÚRGICA DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha agosto de 2009

Ricardo Francisco López Sandoval

Guatemala 11 de noviembre del 2011

Ing. Jorge Luis Perez
Coordinador de Area de Potencia
Escuela de Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universisad de San Carlos de Guatemala.

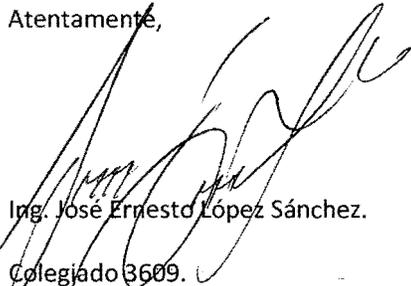
Estimado Ingeniero:

Por medio de la presente informo a Usted que he terminado satisfactoriamente el asesoramiento y revisión del trabajo de tesis titulado **"Propuesta para optimizar la automatización del Centro de Energía Escuintla, Siderúrgica de Guatemala"**. Realizado por el estudiante **Ricardo Francisco López Sandoval**.

Por lo anterior tanto el autor del presente trabajo como mi persona nos hacemos responsables de su contenido, recomendaciones y conclusiones.

Sin otro particular me suscribo de Usted,

Atentamente,



Ing. José Ernesto López Sánchez.

Colegiado 3609.

José Ernesto López Sánchez
ING. ELECTRICISTA
Colegiado 3609

cc/archivo



Ref. EIME 15. 2012
Guatemala, 12 de abril 2012.

FACULTAD DE INGENIERIA

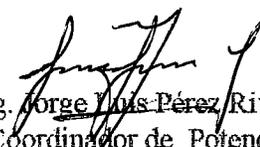
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**“PROPUESTA PARA OPTIMIZAR LA AUTOMATIZACIÓN DEL
CENTRO DE ENERGÍA ESCUINTLA, SIDERÚRGICA DE
GUATEMALA”**, del estudiante **Ricardo Francisco López
Sandoval**, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
Coordinador de Potencia

JLPR/sro





REF. EIME 24. 2012.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Ricardo Francisco López Sandoval titulado: "PROPUESTA PARA OPTIMIZAR LA AUTOMATIZACIÓN DEL CENTRO DE ENERGÍA ESCUINTLA, SIDERÚRGICA DE GUATEMALA", procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 11 DE MAYO 2012.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA PARA OPTIMIZAR LA AUTOMATIZACIÓN DEL CENTRO DE ENERGÍA ESCUINTLA, SIDERÚRGICA DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Ricardo Francisco López Sandoval**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, agosto de 2012

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por bendecir e iluminar mi vida, por permitirme cumplir este sueño y vivir este momento.
- Mis padres** Francisco y Bernarda, que me enseñaron el valor del estudio y a valorar lo que tengo. Gracias a su cariño, apoyo, esfuerzo y buen ejemplo, me han llevado a ser la persona que soy.
- Mis hermanas** Vanessa, Flor de María y Susan, gracias por todos los buenos momentos que pasamos juntos, por todo el cariño que nos tenemos y por su apoyo.
- Mi sobrina** Vanessa María, por todas las muestras de cariño y ternura.
- Mi novia** Wendy Hocirys, por recibirme cada día con un abrazo y un beso, para calmar mis preocupaciones.
- Mi familia y amigos** Por los buenos deseos que tienen hacia mí.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Templo de enseñanza que me dio la oportunidad de formarme como un profesional de la ingeniería.

Ing. José López

Por asesorarme, orientarme y acompañarme a lo largo de todo el desarrollo mi trabajo de graduación.

Ing. Rony Castillo

Por haberme facilitado los recursos necesarios para el desarrollo de mi trabajo de graduación en la empresa que representa. También por sus sabios consejos.

**Centro de Energía
Escuintla**

Empresa que me dio la oportunidad de iniciar mi carrera profesional y me permitió realizar mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XIII |
| GLOSARIO | XV |
| RESUMEN | XXIX |
| OBJETIVOS..... | XXXI |
| INTRODUCCIÓN | XXXV |
| | |
| 1. INFORMACIÓN GENERAL DEL CENTRO DE ENERGÍA ESCUINTLA.. | 1 |
| 1.1. Descripción del equipo | 1 |
| 1.1.1. El generador marca KATO..... | 1 |
| 1.1.1.1. Sistema de excitación de generador..... | 2 |
| 1.1.2. El motor marca Caterpillar serie 3616..... | 3 |
| 1.1.3. Caldera auxiliar | 5 |
| 1.1.4. Tanque condensado y desaereador | 6 |
| 1.1.5. Las centrífugas de aceite lubricante | 8 |
| 1.2. Descripción de los sistemas auxiliares | 11 |
| 1.2.1. Sistema eléctrico..... | 11 |
| 1.2.1.1. Sistema eléctrico de corriente alterna | 11 |
| 1.2.1.2. Sistema eléctrico de corriente directa | 14 |
| 1.2.2. Sistema de control de la planta..... | 15 |
| 1.2.2.1. Panel de control local..... | 15 |
| 1.2.2.2. Panel de control del generador | 15 |
| 1.2.2.3. Panel del edificio auxiliar..... | 15 |
| 1.2.2.4. Consola auxiliar..... | 16 |
| 1.2.2.5. Panel de control del sistema 1 | 16 |

| | | |
|----------|--|----|
| 1.2.2.6. | Panel de control del sistema 2..... | 16 |
| 1.2.2.7. | Red <i>Genius</i> | 18 |
| 1.2.2.8. | Controles lógicos programables serie 90-30 GE Fanuc | 18 |
| 1.2.3. | Sistema de vapora auxiliar | 19 |
| 1.2.4. | Sistema de condensado y agua de alimentación de calderas | 20 |
| 1.2.4.1. | Inyección de químicos | 21 |
| 1.2.5. | Sistema de agua de circulación..... | 21 |
| 1.2.5.1. | Plataforma de inyección de químicos | 22 |
| 1.2.6. | Sistema de agua de reemplazo | 22 |
| 1.2.7. | Sistema de aire comprimido | 24 |
| 1.2.8. | Sistema de aceite combustible pesado | 26 |
| 1.2.9. | Sistema de combustible destilado | 29 |
| 1.2.10. | Sistema de aceite de lubricación..... | 31 |
| 2. | AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE COJINETES DE GENERADOR..... | 33 |
| 2.1. | Antecedentes | 33 |
| 2.2. | Propuesta a implantar | 34 |
| 2.2.1. | Diseño de un sistema de control automático para lubricar cojinetes de generador | 35 |
| 2.2.2. | Diseño de una alarma de falla de lubricación de cojinetes de generador | 38 |
| 2.2.2.1. | Modo de funcionamiento..... | 40 |
| 2.2.2.2. | Diagramas de alambrado hacia el controlador lógico programable | 41 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.2.2.3. | Diagramas de escalera para la alarma de falla de lubricación de cojinetes de generador | 43 |
| 2.2.3. | Modificación de los puntos de alarma y disparo por alta temperatura de cojinetes de generador | 49 |
| 3. | DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE NIVEL DE LOS TANQUES DE CONDENSADO | 53 |
| 3.1. | Antecedentes..... | 53 |
| 3.2. | Diseño actual..... | 53 |
| 3.2.1. | Ventajas..... | 55 |
| 3.2.2. | Desventajas | 55 |
| 3.3. | Diseño propuesto..... | 56 |
| 3.3.1. | Definición de niveles en tanques de condensado | 58 |
| 3.3.1.1. | Longitud de la sonda..... | 59 |
| 3.3.1.2. | Distancia al cero..... | 59 |
| 3.3.1.3. | Nivel de rebalse | 60 |
| 3.3.1.4. | Nivel de escala completa | 60 |
| 3.3.1.5. | Paro de la bomba..... | 60 |
| 3.3.1.6. | Arranque de la bomba..... | 60 |
| 3.3.1.7. | <i>Set point</i> del control de la válvula reguladora | 61 |
| 3.3.1.8. | Niveles de operación de la bomba en tanque exterior | 61 |
| 3.3.2. | Diagramas de alambrado hacia el control lógico programable..... | 63 |
| 3.3.3. | Diagramas lógicos para el programa del control lógico programable | 65 |

| | | |
|------------|--|----|
| 3.3.3.1. | Medición del nivel del tanque de condensado principal | 65 |
| 3.3.3.2. | Fallo de sensor de nivel | 67 |
| 3.3.3.3. | Resumen de alarmas en tanque de condensado principal | 68 |
| 3.3.3.4. | Control de la bomba de reciclaje exterior.. | 70 |
| 3.3.3.5. | Control PID del nivel del tanque de condensado principal | 72 |
| 3.3.3.5.1. | Encontrando los valores de las constantes de control PID..... | 75 |
| 3.3.4. | Ventajas..... | 77 |
| 4. | PROTECCIÓN DE CALDERAS DE RECUPERACIÓN POR BAJO NIVEL DE AGUA | 79 |
| 4.1. | Antecedentes | 79 |
| 4.2. | Diseño actual..... | 80 |
| 4.3. | Diseño propuesto | 81 |
| 4.3.1. | Red <i>Genius</i> del sistema de control de la planta | 82 |
| 5. | AMPLIACIÓN DEL SISTEMA DE CENTRIFUGACIÓN DE ACEITE LUBRICANTE DE MOTORES | 91 |
| 5.1. | Antecedentes | 91 |
| 5.2. | Diseño propuesto | 92 |
| 5.2.1. | Modo de funcionamiento | 92 |
| 5.2.2. | Diagramas de alambrado hacia el controlador lógico programable | 94 |
| 5.2.2.1. | Señalización de estado de válvulas | 96 |
| 5.2.2.2. | Entradas de pulsadores | 97 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 5.2.2.3. | Entradas de selectores manual-automático..... | 98 |
| 5.2.2.4. | Salida de luces indicadoras..... | 99 |
| 5.2.2.5. | Salidas de válvulas solenoides | 100 |
| 5.2.3. | Diagramas de escalera en el programa del controlador lógico programable..... | 101 |
| 5.2.3.1. | Resumen de alarmas en válvulas de centrifugación de motores | 103 |
| 5.2.3.2. | Centrifugación en modo automático..... | 105 |
| 5.2.3.3. | Centrifugación en modo manual | 109 |
| 5.2.3.4. | Activación de válvula de <i>bypass</i> | 112 |
| 6. | AMPLIACIONES Y CORRECCIONES VARIAS EN LOS PROGRAMAS DE PLC | 115 |
| 6.1. | Antecedentes..... | 115 |
| 6.2. | Corrección en la configuración de tarjetas de entradas de termocoplas en los paneles de control local | 116 |
| 6.2.1. | Descripción del problema | 116 |
| 6.2.2. | Solución del problema | 116 |
| 6.3. | Corrección en la detección de algunas alarmas del ABP | 118 |
| 6.3.1. | Descripción del problema | 118 |
| 6.3.2. | Solución del problema | 118 |
| 6.4. | Corrección de luz indicadora de alarma de parada de emergencia..... | 121 |
| 6.4.1. | Descripción del problema | 121 |
| 6.4.2. | Solución del problema | 121 |
| 6.5. | Lubricación de motores después de apagados | 123 |
| 6.5.1. | Descripción del problema | 123 |
| 6.5.2. | Solución del problema | 124 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 6.6. | Corrección de la falsa alarma de fallo de sensor de transductores de presión de aceite | 127 |
| 6.6.1. | Descripción del problema | 127 |
| 6.6.2. | Solución del problema | 131 |
| 6.7. | Incorporación de nuevas mediciones analógicas | 133 |
| 6.7.1. | Descripción del problema | 133 |
| 6.7.2. | Solución del problema | 134 |
| 6.7.2.1. | Nivel de tanque de lodos | 135 |
| 6.7.2.2. | Presión de aire de arranque | 137 |
| 6.7.2.3. | Medición de voltaje en la barra de 22 KV | 139 |
| 6.7.3. | Diagramas de cableado hacia el controlador lógico programable | 140 |
| 7. | AGREGADOS EN LOS PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN..... | 143 |
| 7.1. | Automatización del sistema de lubricación de cojinetes de generador..... | 143 |
| 7.1.1. | Procedimiento para reconocer y restablecer una alarma de “fallo de lubricación de cojinetes de generador” | 143 |
| 7.2. | Sistema de control de nivel de los tanques de condensado.... | 145 |
| 7.3. | Protección de calderas de recuperación por bajo nivel de agua | 146 |
| 7.4. | Centrifugación de aceite de motores..... | 147 |
| | CONCLUSIONES..... | 151 |
| | RECOMENDACIONES..... | 155 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 157 |
| | APÉNDICES..... | 159 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Diagrama eléctrico unifilar del CEE..... | 13 |
| 2. | Diagrama de escalera del programa de PLC propuesto para el arranque automático de bombas de lubricación de cojinetes de generador..... | 35 |
| 3. | Gráfica de tiempos de accionamiento de la línea 16 de la figura 2 | 37 |
| 4. | Diagrama de interconexión entre paneles, para el sistema de lubricación de cojinetes de generador propuesto | 39 |
| 5. | Diagrama de entradas digitales de PLC para la automatización del sistema de lubricación de cojinetes de generador..... | 42 |
| 6. | Diagrama de salidas digitales de PLC para la automatización del sistema de lubricación de cojinetes de generador..... | 42 |
| 7. | Diagrama de escalera para la alarma: bajo nivel de aceite de cojinetes de generador | 43 |
| 8. | Diagrama de escalera para la alarma: bajo flujo de aceite de cojinetes de generador | 44 |
| 9. | Diagrama de escalera para la alarma: disparo de bombas de cojinetes de generador | 44 |
| 10. | Diagrama de escalera para el resumen de alarmas de cojinetes de generador (falla de lubricación de cojinetes de generador)..... | 46 |
| 11. | Diagrama de escalera para el resumen de alarmas de panel de control local | 47 |
| 12. | Diagrama de escalera para la sirena anunciadora de alarmas | 48 |

| | | |
|-----|--|----|
| 13. | Modificación del punto de alarma de alta temperatura de cojinetes de generador..... | 50 |
| 14. | Modificación del punto de disparo por alta temperatura de cojinetes de generador..... | 50 |
| 15. | Diseño actual de sistema de condensado y agua de alimentación de calderas | 54 |
| 16. | Diagrama de flujo de proceso del diseño propuesto | 56 |
| 17. | Definición de niveles en tanque de condensado principal..... | 58 |
| 18. | Definición de los niveles de arranque y paro de la bomba de reciclaje exterior | 62 |
| 19. | Diagrama de entradas y salidas digitales de PLC para el control de nivel del tanque de condensado | 63 |
| 20. | Diagrama de entradas y salidas analógicas de PLC para el control de nivel del tanque de condensado | 64 |
| 21. | Gráfica del comportamiento de la conversión a digital de la entrada de 4 a 20 mA..... | 65 |
| 22. | Diagrama de PLC para la medición del nivel de tanque de condensado | 66 |
| 23. | Diagrama de escalera para detectar el fallo de sensor | 67 |
| 24. | Diagrama de escalera para el resumen de alarmas de tanque de condensado | 69 |
| 25. | Diagrama de escalera para el control de la bomba de condensado exterior | 71 |
| 26. | Diagrama del programa de PLC para el control PID del nivel del tanque de condensado principal | 74 |
| 27. | Cuadro de diálogo “ <i>Tuning</i> ” para establecer los valores PID..... | 75 |
| 28. | Diagrama de escalera de la detección de nivel extremadamente bajo en caldera #1, en el ABP | 80 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 29. | Diagrama de escalera de detección, reconocimiento y anuncio de alarma de bajo nivel en caldera #1 en el AXP..... | 80 |
| 30. | Red <i>Genius</i> #1 | 82 |
| 31. | Red <i>Genius</i> #2 | 83 |
| 32. | Diagrama de bloques del disparo de motores #3 y #8 por bajo nivel en calderas de recuperación #1 y #2 | 84 |
| 33. | Diagrama de escalera de la detección de nivel extremadamente bajo en calderas #1 y #2, en el ABP | 86 |
| 34. | Diagrama de escalera para la generación de datos globales de salida en el PLC de la consola auxiliar (AXP)..... | 86 |
| 35. | Diagrama de escalera para la generación de datos globales de salida en el PLC del panel de control del sistema 1 (S1C)..... | 87 |
| 36. | Diagrama de escalera para la generación de datos globales de salida en el PLC del panel de control del sistema 2 (S2C)..... | 88 |
| 37. | Diagrama de escalera para la recepción de datos globales en el panel de control local desde el panel de control del sistema | 88 |
| 38. | Diagrama de escalera para el disparo del motor correspondiente a la caldera que tiene nivel de agua extremadamente bajo | 89 |
| 39. | Tablero de control de centrifugado de aceite de motores | 92 |
| 40. | Diagrama de flujo de proceso del sistema de control de válvulas de centrifugación | 94 |
| 41. | Diagrama de entradas de sensores de estado de válvula..... | 96 |
| 42. | Diagrama de entradas de pulsadores | 97 |
| 43. | Diagrama de entradas de selectores manual-automático | 98 |
| 44. | Diagrama de salidas de luces indicadoras | 99 |
| 45. | Diagrama de salidas de válvulas solenoides..... | 100 |
| 46. | Diagrama de escalera para el resumen de alarmas de válvulas de motor #1 | 103 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 47. | Diagrama de escalera para el resumen de alarmas de válvulas de motor #2..... | 104 |
| 48. | Resumen de alarmas de centrifugación de motores #1 y 2 | 105 |
| 49. | Diagrama de escalera para detectar transiciones de selectores manual-automático | 106 |
| 50. | Inicio de centrifugación de motores #1 y 2 en automático | 107 |
| 51. | Diagrama de escalera de la centrifugación en automático de motor #1 | 108 |
| 52. | Diagrama de escalera de la centrifugación en automático de motor #2..... | 109 |
| 53. | Diagrama de escalera de la centrifugación en manual del motor #1 ... | 110 |
| 54. | Diagrama de escalera de la centrifugación en manual del motor #2 ... | 111 |
| 55. | Diagrama de escalera para la activación de la válvula solenoide de <i>bypass</i> | 113 |
| 56. | Gráfica de tiempos de accionamiento de entradas y salidas en modo manual | 114 |
| 57. | Gráfica de tiempos de accionamiento de entradas y salidas en modo automático | 114 |
| 58. | Ventana de configuración de tarjetas de entrada de termocoplas | 117 |
| 59. | Diagrama de escalera actual para la detección de alarmas del ABP... | 119 |
| 60. | Diagrama de escalera corregido para la detección de alarmas en estudio | 120 |
| 61. | Diagrama de escalera actual para la detección y anuncio de parada de emergencia de motor #7 | 122 |
| 62. | Diagrama corregido para el restablecimiento de la parada de emergencia del motor #7 | 123 |
| 63. | Diagrama de escalera actual para el arranque de la bomba de prelubricación..... | 124 |
| 64. | Diagrama de escalera propuesto para la postlubricación de motores . | 125 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 65. | Diagrama de escalera para la medición de presión de aceite hacia el motor | 129 |
| 66. | Gráfica del comportamiento de la conversión a digital de la entrada de 4 a 20 mA..... | 130 |
| 67. | Conversión de digital a décimas de kilopascal de la presión de aceite de entrada al motor (salida de los filtros)..... | 132 |
| 68. | Conversión de digital a décimas de kilopascal de la presión de aceite de entrada a los filtros..... | 132 |
| 69. | Diagrama de escalera de la salida analógica para la presión de aceite..... | 133 |
| 70. | Diagrama de escalera de entrada analógica para la medición del nivel de tanque de lodos | 135 |
| 71. | Diagrama de escalera modificado para la detección de la alarma de “alto nivel de tanque de lodos” | 137 |
| 72. | Diagrama de escalera de entrada analógica para la medición presión de aire de arranque | 138 |
| 73. | Diagrama de escalera modificado para la detección de la alarma de “baja presión de aire de arranque” | 138 |
| 74. | Diagrama de escalera de entrada analógica para la medición voltaje en la barra de 22kV | 139 |
| 75. | Diagrama propuesto de cableado de entradas analógicas hacia el PLC del panel del edificio auxiliar..... | 140 |
| 76. | Diagrama propuesto de cableado de entradas analógicas hacia el PLC de la consola auxiliar (AXP) | 141 |

TABLAS

| | | |
|-----|---|----|
| I. | Significado de las variables usadas en el diagrama de la figura 2.. | 36 |
| II. | Significado de las abreviaturas utilizadas en la figura 4..... | 40 |

| | | |
|--------|--|-----|
| III. | Significado de las variables utilizadas en las figuras 7, 8 y 9..... | 45 |
| IV. | Significado de las variables utilizadas en la figuras 13 y 14 | 51 |
| V. | Significado de las nuevas variables utilizadas en la figura 22 | 67 |
| VI. | Significado de las variables utilizadas en el diagrama de la figura 23 (se muestra con negrita las nuevas variables utilizadas)..... | 68 |
| VII. | Significado de las variables utilizadas en la figura 24 (se muestra con negrita las nuevas variables utilizadas)..... | 70 |
| VIII. | Significado de las nuevas variables utilizadas en la figura 25 | 72 |
| IX. | Significado de las nuevas variables utilizadas en la figura 26 | 74 |
| X. | Significado de las variables utilizadas en las figuras 28 y 29..... | 81 |
| XI. | Definición de direcciones globales de entrada y salida para el disparo del motor #3 | 85 |
| XII. | Definición de direcciones globales de entrada y salida para el disparo del motor #8 | 85 |
| XIII. | Resumen de entradas y salidas digitales de PLC..... | 95 |
| XIV. | Declaración de variables para el programa de PLC | 101 |
| XV. | Declaración de variables utilizadas en la detección alarmas del ABP | 119 |
| XVI. | Declaración de las variables utilizadas en el diagrama de la figura 61 | 122 |
| XVII. | Declaración de variables para el diagrama de la figura 64 | 126 |
| XVIII. | Declaración de variables para el diagrama de la figura 65 | 128 |
| XIX. | Declaración de variables de los diagramas de escalera para medición del nivel de tanque de lodos | 136 |
| XX. | Declaración de variables de los diagramas de escalera de medición de presión de aire de arranque | 137 |
| XXI. | Correspondencia entre centrífugas de aceite y motores | 147 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------|---|
| A | Amperio (unidad de corriente) |
| HP | Caballos de fuerza, (unidad de potencia) |
| US\$ | Dólar estadounidense |
| °C | Grado centígrado |
| Hz | Hertz (unidad de frecuencia) |
| kPa | Kilopascal (unidad de presión) |
| kW | Kilovatio (unidad de potencia activa) |
| kVA | Kilovolt amperio (unidad de potencia aparente) |
| kvar | Kilovolt amperio reactivo (unidad de potencia reactiva) |
| kV | Kilovoltio (unidad de voltaje) |
| psi | Libra por pulgada cuadrada |
| m | Metro (unidad de longitud) |
| mA | Miliamperio (milésima parte de un amperio) |
| % | Porcentaje |
| Q | Quetzal |
| rpm | Revoluciones por minuto (unidad de velocidad angular) |

GLOSARIO

| | |
|--|--|
| Agua cruda/incendio | Agua contenida en un tanque con el mismo nombre que es alimentado mediante las bombas de pozo y que no tiene ningún tipo de tratamiento y se utiliza para alimentar las bombas de agua de servicio y la bomba contra incendios, dándole prioridad a esta última con 220 000 galones. |
| ABP | Panel del edificio auxiliar |
| AC/OC | Enfriador de aire/enfriador de aceite |
| Aire de instrumentación | Aire comprimido regulado a 120 psi y con tratamiento de secado, utilizado para alimentar la instrumentación de la planta. |
| AXP | Panel de la consola auxiliar de alarmas |
| Banda muerta | Rango de variación de la variable medida que no produce un cambio perceptible en la salida de un instrumento de medición. |
| Bombas de desplazamiento positivo | Bombas en las que el principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. |

| | |
|--------------------------------|--|
| Bornera | Accesorio eléctrico que se utiliza para seccionar cables, consta de dos bornes comunicados eléctricamente. |
| Botón luminoso | Botón que además de tener un contacto tiene un <i>socket</i> para conectar un bombillo. |
| Bunker | Combustible residual del petróleo que utilizan los motores de combustión del Centro de Energía, también llamado HFO, por sus siglas en inglés. |
| <i>Bypass</i> | Es una derivación, desvío o ruta alternativa a otra normal que se abre mediante una válvula. |
| CA | Corriente alterna |
| Caldera de recuperación | Caldera que aprovecha la energía térmica de los gases de escape del motor de combustión para calentar el agua y producir vapor. |
| Caldera piro tubular | Tipo de caldera en la cual dentro de los tubos circulan los gases a alta temperatura producto de la combustión, y el agua se evapora al contacto de los tubos calientes. |
| Cárter | Caja metálica ubicada en la parte inferior del motor de combustión que aloja el aceite lubricante del mismo. |
| CD | Corriente directa |
| CEE | Centro de Energía Escuintla |

| | |
|-------------------------------|---|
| Centrífuga | Máquina que pone en rotación una muestra para separar por fuerza centrífuga sus componentes o fases (generalmente una sólida y una líquida), en función de su densidad. |
| Cero | Es el valor mínimo que se desea medir con un transmisor, en el cual se desea que dé una salida de 4 mA. |
| Ciclo de concentración | Número de veces que se concentra el agua de caldera respecto del agua de alimentación. |
| Cojinete | Elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a este, que le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento. |
| Compresor | Es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar cierto tipo de fluidos llamados compresibles, tal como los gases y vapores. |
| Condensado | Agua de retorno de un sistema de vapor que pasa de estado gaseoso a líquido. |
| Conductividad | Capacidad de un cuerpo o medio, para conducir la corriente eléctrica. |
| Desaereador | Tanque de agua de alimentación de calderas en el que se elimina el oxígeno del agua para evitar corrosión en las tuberías. |

| | |
|-----------------------------|---|
| Deshollinador | Sistema de eliminación de hollín en las tuberías de fuego de las calderas. |
| DFO | Aceite combustible destilado |
| Diagrama de escalera | Lenguaje de programación gráfico dentro de los autómatas programables, que está basado en los esquemas eléctricos clásicos de control. |
| <i>Dip switch</i> | Conjunto de interruptores eléctricos que se presenta en un formato encapsulado, se utiliza comúnmente para modificar/personalizar el comportamiento <i>hardware</i> de un dispositivo electrónico en ciertas situaciones específicas. |
| Electroválvulas | Válvula que abre o cierra el paso de un fluido mediante la acción electromagnética de un solenoide. |
| Fallo de sensor | Alarma que detecta el PLC cuando a la entrada de este se detecta un valor fuera de rango. |
| Faro de emergencia | Faro ubicado en un panel de alarmas que emite una luz destellante para indicar al operador la existencia de una alarma. Este se apaga en el momento de reconocer dicha alarma. |

| | |
|---------------------------------|---|
| <i>Firmware</i> | Bloque de instrucciones de programa para propósitos específicos, grabado en una memoria de tipo no volátil que establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo de cualquier tipo. |
| Funciones booleanas | Función cuyo dominio son las palabras conformadas por los valores binarios 0 o 1 ("falso" o "verdadero", respectivamente), y cuyo codominio son ambos valores 0 y 1. |
| GCP | Panel de control del generador |
| <i>Hardware</i> | Corresponde a todas las partes tangibles de un sistema informático. |
| HFO | Aceite combustible pesado |
| Interfaz con el operador | Es el medio con que el usuario puede comunicarse con una máquina, un equipo o una computadora, y comprende todos los puntos de contacto entre el usuario y el equipo. |
| Interruptor SF6 | Interruptor de alto voltaje que usa como medio para extinguir el arco eléctrico, el hexafluoruro de azufre (SF6). |

| | |
|--------------------------------|---|
| Lazo cerrado | Sistema en que la acción de control está en función de la señal de salida. Los sistemas de lazo cerrado usan la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción de control en consecuencia. |
| LCP | Panel de control local |
| LO | Aceite lubricante |
| Marcas globales | Conjunto de contactos y bobinas utilizadas en un diagrama de escalera cuyo valor booleano se puede utilizar en cualquier dispositivo de la red. |
| Marcas locales | Conjunto de contactos y bobinas utilizadas en un diagrama de escalera cuyo valor booleano se puede utilizar únicamente en el dispositivo local. |
| MCC | Centro de control de motores |
| Muñón | Parte de un eje sobre el que se montan los cojinetes. |
| PCG | Panel de control de bombas de cojinetes de generador |
| PLC | Controlador lógico programable |
| Principio de Arquímedes | Principio físico que afirma que: “Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, recibe un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen del fluido que desaloja.” |

| | |
|---------------------------------------|--|
| PT | Transformador de potencial |
| Pulsador | Tipo de interruptor de control que luego de ser pulsado, retorna a su posición original y sus contactos, a su posición normal. |
| Purga | Proceso de expulsión o eliminación de residuos no deseados en un sistema industrial. |
| Rack | Es un bastidor destinado a alojar equipamiento electrónico, informático y de comunicaciones, como tarjetas de PLC. |
| Rectificador | Dispositivo electrónico que convierte la corriente alterna en corriente directa. |
| Red de comunicación Genius | Sistema distribuido de entradas y salidas, que intercambia información en tiempo real, que consiste en un cable de par trenzado apantallado. Los datos pueden ser transmitidos hasta una velocidad de 460 kilobaudios y una distancia de hasta 7500 pies. |
| Relé | Es un dispositivo electromecánico. Funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. |

| | |
|--------------------|--|
| Reset | Es puesta en condiciones iniciales de un sistema o bien poner a "0". Este puede ser mecánico, electrónico o de otro tipo. |
| RFO | Relé de corte de combustible |
| RTD | Detectores de temperatura resistivos |
| S1C | Panel de control del sistema 1 |
| SBA | Dirección en el bus serial |
| Scada | Proviene de las siglas " <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> " (Control de Supervisión y Adquisición de Datos). Es un sistema basado en computadores que permiten supervisar y controlar variables de proceso a distancia, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos) y controlando el proceso de forma automática por medio de un <i>software</i> especializado. |
| Seccionador | Interruptores de una subestación o circuitos eléctricos que protegen a una subestación de cargas eléctricas demasiado elevadas. Su operación puede hacerse únicamente bajo condiciones sin carga. |
| Selector | Interruptor de control de dos o más posiciones que sirve para elegir una función deseada. |

| | |
|-----------------------------|--|
| Sensor de proximidad | Es un transductor que detecta objetos o señales que se encuentran cerca del elemento sensor. |
| Servicios auxiliares | Conjunto de sistemas esenciales para la operación confiable de la planta. |
| Servomotor | Es un dispositivo similar a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición. |
| Set | Poner a "1" un sistema o en estado de activado. |
| Set point | Valor en que se desea tener la variable de proceso. |
| Sílice | Mineral formado por silicio y oxígeno, que debe ser controlado, para evitar la formación de incrustaciones en las tuberías de agua. |
| Sincronización | Proceso de igualar los voltajes, frecuencia y ángulo de fase de un generador, con los de una barra infinita para poder conectarlo a esta. |
| Slot | Conector o puerto de expansión en la placa base de de un rack. |
| SNI | Sistema Nacional Interconectado |

| | |
|------------------------|---|
| Software | Equipamiento lógico o soporte lógico de un sistema informático; comprende el conjunto de los componentes lógicos necesarios que hacen posible la realización de tareas específicas. |
| Span | Es el valor máximo que se desea medir con un transmisor, en el cual se desea que dé una salida de 20 mA. |
| Suavizador | Es un aparato que por medios mecánicos, químicos y/o electrónicos se trata el agua para evitar, minimizar o reducir, los contenidos de sales minerales y sus incrustaciones, en las tuberías y depósitos de agua. |
| Subestación | Instalación destinada a modificar y establecer los niveles de tensión de una infraestructura eléctrica, con el fin de facilitar el transporte y distribución de la energía eléctrica. |
| Switch de flujo | Es un dispositivo que, instalado en línea con una tubería, permite determinar cuándo está circulando un líquido o un gas mediante el cierre o apertura de sus contactos. |
| Switch de nivel | Se usa para comprobar si el nivel de un depósito ha rebasado o no un punto establecido, mediante el cierre o apertura de sus contactos. |
| Switchgear | Grupo de interruptores de alto voltaje. |

| | |
|--|--|
| Termocopla | También llamado termopar; es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje (efecto <i>Seebeck</i>), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente" o unión caliente o de medida y el otro denominado "punto frío" o unión fría o de referencia. |
| Torre de enfriamiento | Son estructuras para refrigerar el agua utilizada en el sistema de enfriamiento de los motores de combustión interna, mediante la circulación y ventilación forzada de la misma. |
| Transductor | Es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente a la salida. |
| Transductor de corriente a presión (IP) | Convierte una señal de corriente de 4 a 20 mA a una señal neumática por ejemplo de 3 a 15 psi. |
| Transductor de nivel | Convierte el nivel detectado de un recipiente a una señal analógica (por ejemplo 4 a 20 mA) . |
| Transductor de presión | Convierte la presión detectada a una señal analógica (por ejemplo 4 a 20 mA). |
| Transductor de voltaje | Convierte el nivel de voltaje detectado a una señal analógica (por ejemplo 4 a 20 mA). |

| | |
|-------------------------------------|--|
| Transformador | Máquina eléctrica estacionaria que se utiliza para aumentar o disminuir el nivel de tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia. |
| Transmisor | Instrumento que capta la variable de proceso y la transmite a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. |
| Turbocargador | Es un sistema de sobrealimentación que usa una turbina centrífuga accionada por los gases de escape del motor y a su vez acciona mediante un eje coaxial con ella, un compresor centrífugo para comprimir el aire de admisión del motor y así aumentar la cantidad de oxígeno inyectado a la cámara de combustión y con ello aumentar la potencia del motor. |
| Válvula de 3 vías | Válvula que consta de tres conductos, uno de entrada y dos de salida, en una posición, la entrada se dirige hacia una salida y en otra posición hacia la segunda salida. |
| Válvula de alivio de presión | Válvula diseñada para liberar fluido cuando la presión interna supera el umbral establecido. |
| Válvula solenoide | Válvula que abre o cierra el paso de un fluido mediante la acción electromagnética de un solenoide. |

| | |
|---------------------------------|--|
| Variable de control (CV) | En un sistema PID es la variable de salida que se encarga de modificar la variable de proceso para que esta última alcance el valor deseado definido por el <i>set point</i> . |
| Variable de proceso (PV) | En un sistema PID es la variable que se desea controlar. |
| Viscosidad | Es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. |
| Wise | Nombre del sistema de registro de eventos y control de producción de la planta Centro de Energía Escuintla. |
| Wois | Nombre del sistema <i>scada</i> de la planta Centro de Energía Escuintla. |

RESUMEN

A lo largo de la operación de la planta Centro de Energía Escuintla, se han identificado varias necesidades referentes a la automatización de la planta, las cuales, básicamente se pueden clasificar en tres tipos.

En primer lugar, se han observado errores cometidos en los programas lógicos de PLC, algunos de estos fueron involuntarios por parte del programador y otros en los que no se tomó en cuenta el comportamiento real de las variables de proceso.

En segundo lugar, la necesidad de diseñar sistemas que, tal vez por razones económicas, no fueron considerados originalmente; así como rediseñar sistemas existentes que se encuentra obsoletos y que se consideran necesarios para optimizar recursos y tener una adecuada operación de la planta.

Por último, se ha tenido la necesidad de automatizar las diversas ampliaciones que se han hecho en los sistemas auxiliares que componen la planta e integrarlo al sistema de control general de la planta.

En el presente trabajo de graduación se buscan y proponen soluciones a estas necesidades. Básicamente se trata de modificaciones y ampliaciones a los diagramas lógicos en los programas de PLC, y donde sea necesario, las correspondientes modificaciones en los cableados, así como la implementación o sustitución de equipo de instrumentación.

Se debe tener en cuenta que existen algunas limitaciones; por ejemplo, en el capítulo seis se proponen nuevas lecturas analógicas que deben ser desplegadas en el sistema *scada*, sin embargo, la propuesta se limita a los programas de PLC, ya que en la planta no se cuenta con la licencia para realizar estos agregados en el programa de dicho sistema, para este caso se debería contratar a la empresa respectiva para que los realice.

OBJETIVOS

General

Realizar propuestas de mejoras en la automatización de la planta de generación de energía eléctrica Centro de Energía Escuintla, con base en necesidades existentes en la planta, debidas a errores y limitaciones en el diseño original, así como a la necesidad de renovar equipo de instrumentación.

Específicos

1. Proponer la lubricación automática de cojinetes de generador y un resumen de alarmas que permita alertar al operador sobre cualquier anomalía en dicho sistema.
2. Proponer la renovación del sistema de control de nivel de tanque de condensado principal, de modo que sus fuentes de llenado estén en coordinación, y así evitar vertimientos innecesarios.
3. Realizar los cambios necesarios en el programa de PLC para corregir el sistema de disparo de motores por nivel de agua extremadamente bajo, en las correspondientes calderas de recuperación.

4. Realizar las ampliaciones necesarias en los programas del PLC que controlan las maniobras de válvulas automáticas de centrifugación de aceite lubricante de motores, de modo que se adapten a las ampliaciones en el número de centrífugas y por consiguiente a la nueva configuración de motores para cada centrífuga.
5. Corregir la configuración de tarjetas de entradas de termocoplas, de modo que se adapte al tipo de termocoplas utilizadas, para medir temperatura de puertos de escape en los motores de combustión.
6. Corregir la detección y anuncio de algunas alarmas en el PLC del panel del edificio auxiliar.
7. Corregir el anuncio de alarma de parada de emergencia en el panel de control del generador #7.
8. Proponer un sistema de postlubricación de motores de combustión, con el propósito de evitar daños en los rodamientos de los turbocargadores, ya que por su inercia estos continúan girando después de la parada del motor.
9. Proponer los cambios necesarios para evitar la falsa alarma de fallo de sensor en transductores de presión de aceite.
10. Proponer la incorporación de nuevas lecturas analógicas necesarias para facilitar la operación de la planta.

11. Realizar las modificaciones necesarias en los procedimientos de operación que impliquen la puesta en marcha de las propuestas hechas en este trabajo de graduación.

INTRODUCCIÓN

El Centro de Energía Escuintla (CEE) es una planta de generación de energía eléctrica anexa a la planta de acería Siderúrgica de Guatemala, que consta de diez motores reciprocantes, cuyo combustible normal de operación es el bunker (combustible pesado); acoplado a cada uno de ellos está un generador, que en total hacen una generación máxima de 38 MW.

El presente trabajo de graduación es una propuesta de mejoras de automatización del Centro de Energía Escuintla, en el que se ha tomado como base las necesidades surgidas a lo largo de la operación de la planta y que en general se deben a limitaciones y errores cometidos en el diseño original, ampliaciones que se han hecho efectivas en los equipos auxiliares y que no han tenido efecto en la automatización, así como la necesidad de renovar algunos equipos de instrumentación.

Básicamente, se trata de realizar modificaciones a los programas lógicos de PLC, para lo que se utilizará el *software* de programación *Proficy Machine Edition v5.70* de GE Fanuc^R. Pero también se proponen cambios de *hardware* donde se requiera, para lograr que la automatización sea óptima.

En el primer capítulo se presenta la información general de la planta, que incluye la descripción de los equipos principales y auxiliares que serán objeto de automatización; así como la descripción de los sistemas de los que se compone la planta.

En cada uno de los siguientes cuatro capítulos se desarrolla una propuesta para los problemas de automatización más importantes que son objeto en este trabajo de graduación; cada uno empieza con una reseña de los antecedentes que dieron lugar al problema, se describe brevemente la situación actual y sus desventajas, y se van desarrollando los diagramas de escalera que se necesita incorporar o modificar en el programa de PLC que corresponda. Además, donde se requiere nuevo *hardware*, se presentan los diagramas de alambrado hacia PLC necesarios. En los capítulos 2 y 3, donde la implementación de la propuesta requiere una inversión considerable, se presenta un listado y resumen de cotizaciones del equipo que requiere mayor inversión.

En el capítulo seis se desarrollan y presentan soluciones a seis problemas de automatización, que por tener una solución breve, se optó por estudiarlos en un solo capítulo, pero de igual forma se presentan los diagramas de escalera y de alambrado hacia PLC que requieren su solución, así como las características del *hardware* –si se requiere– que cumplan con las necesidades de cada situación.

Por último, en el capítulo siete, se presentan las modificaciones necesarias en los procedimientos de operación, que implican la ejecución de las propuestas hechas en este trabajo de graduación; esto con el objetivo de darle al equipo de operaciones de la planta el material bibliográfico que facilite su capacitación.

1. INFORMACIÓN GENERAL DEL CENTRO DE ENERGÍA ESCUINTLA

1.1. Descripción del equipo

En este apartado se presenta una breve descripción de los principales equipos del Centro de Energía Escuintla que de una manera u otra formarán parte de las propuestas hechas en los siguientes capítulos.

1.1.1. El generador marca KATO

La función del generador es la de convertir la energía mecánica del motor primario a energía eléctrica para el uso comercial y para proveer energía a varios sistemas de apoyo de la central. El generador es marca Kato de 900 rpm, ocho polos y enfriado por ventiladores internos forjados en el eje del generador. El generador trifásico tiene una potencia nominal de 4000 kW, 5000 kVA con un factor de potencia de 0,8 y, 60 Hz a un voltaje nominal de 13 800 voltios.

El armazón del estator tiene una construcción soldada y soporta el enchapado del estator y el campo rotativo. Además, provee patrones de flujo múltiples para la circulación de aire de enfriamiento a través del generador. Las placas de secciones internas en el estator proveen regiones anulares para el flujo del aire de enfriamiento a través del armazón del estator. El estator está construido de una serie de chapas de hierro al silicio. La alta permeabilidad de este material ofrece un patrón libre para el flujo magnético y concentra el flujo del campo en el embobinado del estator. La coraza es laminada en vez de ser sólida para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

Cada lámina está aislada con un barniz previo a ser montada, esto mantiene su integridad a temperaturas mucho más altas que la temperatura normal de operación.

El enchapado se arma de manera entrelazada y se separan en paquetes por bloques espaciadores para proveer ventilación de enfriamiento. Luego de que las laminaciones y bloques se ensamblan, estos se ajustan juntos para formar un enchapado rígido y cilíndrico. Luego de ser montado, el enchapado del estator se trata nuevamente con material aislante para protegerlo del moho y aumentar la aislación entre las chapas. El enchapado del estator está permanentemente montado en el armazón interior.

1.1.1.1. Sistema de excitación de generador

El sistema de excitación es una fuente de potencial, su función es la de proveer excitación o potencia de magnetización al embobinado rotativo del generador. El objetivo básico de este sistema de excitación es el de proveer corriente directa al embobinado del campo a un voltaje relativamente bajo (50 a 500 voltios) comparado con el voltaje del estator de generador.

El control del voltaje aplicado es preciso y sensitivo por diseño, para proveerle al operador el medio para controlar el voltaje de salida del generador, el factor de potencia y el control asociado de potencia reactiva entre el generador y el resto del sistema.

En adición de proveer la regulación, el sistema también incluye varias funciones de protección y de compensación que previenen y/o indican las condiciones indeseables de operación.

La excitatriz del generador Kato consta de un alternador de imanes permanentes de inductor móvil de doce polos, este suministra la potencia necesaria para alimentar al regulador de voltaje; luego el regulador recibe órdenes del potenciómetro del ajustador de voltaje si el generador se encuentra en vacío, o del potenciómetro del controlador de factor de potencia, si el generador se encuentra en línea; esto para determinar la cantidad de corriente directa de excitación que el regulador de voltaje le suministra al estator de la excitatriz principal de inducido móvil. Luego, la corriente inducida en el rotor es rectificadora mediante un puente rectificador trifásico y suministrada al inductor móvil del generador principal de ocho polos.

1.1.2. El motor marca Caterpillar serie 3616

Los motores son de modelo Caterpillar 3616, cada uno es una unidad autónoma montada en plataforma que contiene un motor de cuatro tiempos, dieciséis cilindros en "V" con un diámetro de 280 mm y una carrera de 300 mm con una relación de 13:1 para un total de 295 600 centímetros cúbicos; cuenta con unidad de inyección de combustible directa, turbocargador enfriado y opera a 900 RPM para generar una potencia aproximada de 3,85 a 4,00 MW.

Los motores, además, están diseñados para ser operados tanto manual como remotamente a través de paneles de control localizados en el cuarto de controles del Centro de Energía de Escuintla.

Los motores están provistos con un sistema de monitoreo de carga electrohidráulico para ajustar y mantener la producción de carga de los mismos. Adicionalmente, los motores requieren de varios sistemas de apoyo para la operación de los mismos.

El motor Caterpillar cuenta con un sistema de enfriamiento de punta de inyector que consiste en tres plataformas que se distribuyen de la siguiente manera: la número uno para los primeros tres motores, la número dos para los siguientes cuatro y la tres, para los últimos tres motores. Cada plataforma consiste en dos bombas: una en operación y la otra en reserva, que succionan aceite de enfriamiento de su tanque de reserva y lo envían a los inyectores de sus respectivos motores; luego el aceite retorna al módulo pasando previamente por un intercambiador de calor que enfría el aceite por medio de agua de circulación proveniente de la torre de enfriamiento.

El sistema de enfriamiento del motor consta de dos circuitos de agua separados, cada uno con su propia bomba de tipo centrífuga acopladas mediante engranajes al eje cigüeñal del motor principal.

El circuito de enfriamiento de aire de carga y enfriamiento de aceite lubricante o AC/OC por sus siglas en inglés (*air cooler/oil cooler*) es de baja temperatura, entre 35°C y 40°C, y succiona el agua directamente del intercambiador de calor y la descarga, a un cabezal que luego se divide en dos; por un lado se dirige al enfriador de aire de carga y por el otro, al enfriador de aceite.

El circuito de alta temperatura llamado de enfriamiento de camisas o JW por sus siglas en inglés (*Jacket Water*) succiona el agua del tanque de expansión y la descarga de la bomba se dirige hacia las camisas y culatas de los dieciséis cilindros y la carcasa de ambos turbocargadores, luego el retorno se dirige a una válvula de tres vías, operada por termostatos que desvían el agua al intercambiador de calor si fuera necesario, a modo de mantener el agua a una temperatura adecuada, entre 88°C y 95°C.

Además, el motor cuenta con un sistema de precalentamiento para mantener la temperatura de agua de enfriamiento de camisas a 60°C durante el tiempo que el motor se encuentra parado. Asimismo, cuenta con un sistema de prelubricación que permite la lubricación del motor, previo a ser arrancado.

1.1.3. Caldera auxiliar

La función de la caldera auxiliar es la de proveer vapor auxiliar. Esta puede ser operada independientemente de las calderas de recuperación de calor, para cumplir con la demanda de vapor de la planta.

La caldera auxiliar es una caldera horizontal pirotubular de tres pases marca York Shipley, con un quemador de combustible pesado. El tubo de quemado principal (hogar), donde ocurre la combustión, está localizado en el centro del cilindro de presión. Tubos de retorno más pequeños se encuentran localizados alrededor del hogar y componen el segundo y tercer pase para una mayor eficiencia. La caldera tiene una capacidad de 1620 galones de agua y tiene un peso total en seco de 37 360 lbs.

La plataforma de la caldera auxiliar cuenta con una válvula automática de agua, actuada por un servomotor, que le suministra agua en función de su nivel desde las bombas alimentadoras de agua de calderas. La modulación aire-combustible puede ser automática en función de la presión de vapor o bien en modo manual, ajustada por el operador mediante un potenciómetro.

El combustible pesado es suministrado por cualquiera de las dos bombas de desplazamiento positivo, una se encuentra en operación y la otra en modo de espera, en caso una fallara una o bien requiera mantenimiento.

Luego el combustible pasa por una válvula de alivio como protección contra una sobrepresión, después pasa por un precalentador eléctrico para mantener la temperatura del combustible a 100°C antes de ser suministrado al quemador, mediante dos válvulas solenoide de combustible conectadas en serie. Cuando la caldera se encuentra en modo de espera, el combustible a 100°C circula por la tubería de precalentamiento concéntrica con la tubería de combustible principal, con el propósito de mantener caliente esta última.

El control de la caldera auxiliar tiene el punto de arranque a 100 psi y el punto de paro a 110 psi. Además, tiene protección contra: bajo nivel de agua, alta y baja temperatura de combustible, alta y baja presión de combustible, baja presión de atomización, bajo flujo de aire de combustión y muy alta presión de vapor, que disparan la caldera para prevenir condiciones inseguras.

1.1.4. Tanque condensado y desaereador

La función del tanque de condensado y desaereador es la de almacenar el condensado, desaerear el mismo, almacenar el producto como agua de alimentación de calderas, además de proveer la presión de succión para las bombas de reciclado y alimentación de caldera.

El tanque combinado de condensado y desaereador está localizado en el centro del área de la caldera auxiliar en el edificio de tratamiento de combustible.

El tanque de condensado recibe el condensado de las trampas de vapor ubicadas en distintos puntos del sistema y condensado bombeado y además según sea necesario, agua suavizada de la estación de control del agua de reemplazo.

El tanque de condensado está equipado con una línea de drenaje, con una válvula de aislación y línea de ventilación con válvula de aislación. Una línea de enlace con válvula entre el tanque condensado y el desaereador, permite que estos se unan y se comporten como un tanque sencillo en caso de emergencia.

El desaereador recibe condensado desde las bombas de reciclaje a través de cuatro rociadores y vapor desde el sistema de vapor auxiliar. El condensado se calienta, se remueve el aire del condensado y los gases no condensables se ventilan a la atmósfera. El desaereador se conoce como un calentador abierto porque el vapor y el condensado tienen contacto directo el uno con el otro y se mezclan entre sí. El vapor se supe a 100 psi hacia la válvula de regulación de presión de vapor, la cual reduce la presión del vapor a 5 psi antes de admitir el mismo al desaereador.

El desaereador está equipado con dos válvulas de seguridad una de 20 psi y otra de 50 psi, una línea de drenaje con válvula de aislación, además de una línea de sobrellenado equipada con un flotador que dirige el flujo hacia arriba.

El tanque condensado y desaereador es de la marca *Industrial Steam* con una capacidad de calentador de 13 800 libras/hora (27,6 galones por minuto) y una capacidad de sobreflujo de vapor de 540 galones (en 19,3 minutos).

Un controlador de nivel neumático mantiene el nivel del tanque de condensado mediante la admisión de agua suavizada. El nivel muy bajo en el tanque de condensado dispara la bomba de reciclaje que se encuentre operando. La temperatura del condensado se muestra por un indicador montado localmente.

Un interruptor de nivel monitorea el nivel del desaereador y dispara la bomba de alimentación que se encuentre operando e inhibe el arranque de las bombas de alimentación de la caldera, cuando ocurre una condición de bajo nivel en el desaereador. Otro interruptor de nivel activa una alarma de alto nivel. Ambas alarmas son anunciadas localmente y enviadas como un resumen al panel de la consola auxiliar ubicada en el cuarto de control.

1.1.5. Las centrífugas de aceite lubricante

La función de las centrífugas de aceite es la de remover agua y otras impurezas del aceite de lubricación.

La centrífuga de aceite contiene varios componentes que actúan en conjunto para remover agua y otras impurezas del aceite de lubricación. El aceite del cárter de cada dos motores se extrae mediante la bomba alimentadora de la plataforma de la centrífuga. La bomba alimentadora es del tipo de desplazamiento positivo, clasificada para producir 20 galones por minuto a 50 psi. Cada bomba es impulsada por un motor eléctrico de 2HP. Durante la operación normal cada centrífuga limpia el aceite de dos motores alternándose a cada 30 minutos.

La bomba alimentadora descarga hacia la centrífuga a través de un calentador de vapor individual diseñado para precalentar el aceite a la temperatura óptima para la separación (95°C). Cada calentador de vapor es esencialmente un intercambiador de coraza y tubos con una superficie de intercambio de calor extendida, con el aceite fluyendo a través del lado de los tubos y el vapor del sistema auxiliar de vapor fluyendo por el lado de la coraza.

El vapor que fluye a través del calentador está controlado por una válvula de regulación de vapor operada por un motor. Esta es controlada por el sistema de control como respuesta a la salida de un sensor de temperatura tipo RTD, que mide la temperatura de salida del aceite. Un segundo RTD provee una segunda indicación independiente de temperatura hacia el sistema de control para controlar las alarmas.

Desde el calentador de vapor, el aceite fluye hacia la centrífuga a través de un medidor de flujo y una válvula de tres vías. El medidor provee una indicación del flujo de aceite hacia la centrífuga y se utiliza como guía para ajustarlo a su valor normal de 20 galones por minuto. El flujo de aceite se ajusta utilizando la válvula manual que desvía el flujo en exceso desde el cabezal de descarga de las bombas de alimentación hacia el retorno. La válvula de tres vías, operada por aire, dirige el flujo de aceite hacia la centrífuga durante la operación normal; durante el arranque o la detención de la unidad, esta dirige el flujo de aceite hacia el retorno.

La centrífuga opera con el principio de la fuerza centrífuga que separa el agua y los otros contaminantes, los cuales tienen una densidad mayor que la densidad del aceite de lubricación. El corazón de la centrífuga es el envase rotativo que se utiliza para impartir la fuerza centrífuga al aceite de lubricación.

El aceite sucio fluye hacia arriba a través de los agujeros de distribución en los discos; la alta fuerza centrífuga ejercida por el envase rotativo causa que los materiales más densos (es decir sucio, fango y agua) se muevan hacia afuera y el aceite purificado hacia el centro del tubo.

El aceite limpio sale del envase a la salida de aceite limpio, mientras que el agua y el fango separado del aceite se acumulan en el espacio de fango alrededor de la periferia del envase. El aceite limpio de la centrífuga fluye de regreso al cárter del motor correspondiente.

Cuando el espacio del fango en el envase de la centrífuga se llena y el agua entra al espacio de los discos, una pequeña cantidad de aceite sale con agua. Esto se detecta por el transductor de agua que se encuentra en la línea de descarga de aceite limpio.

Cuando el contenido de agua alcanza un límite determinado, la unidad de control inicia una descarga de agua o de fango, dependiendo del espacio de tiempo desde la última descarga de fango. Si el tiempo desde la última descarga de fango es menos que el tiempo requerido entre las descargas de fango, el agua se drena del envase a través de la válvula operada por una válvula solenoide. Si el tiempo mínimo entre descargas de fango se ha cumplido, se inicia una descarga de fango.

Durante una descarga de fango, el envase deslizante se mueve hacia abajo, descubriendo agujeros a través de los cuales se descarga el fango y el agua acumulada.

El fango y el agua descargados desde la centrífuga, se dirigen hacia un tanque de fango calentado por vapor en la plataforma de la centrífuga. Cuando el nivel en este tanque aumenta, una bomba de fango, operada por aire, se arranca para bombear el fango hacia el tanque principal de fango.

1.2. Descripción de los sistemas auxiliares

Los sistemas auxiliares son aquellos que complementan a las unidades de generación para que en conjunto se obtenga el correcto funcionamiento de la planta. A continuación se describen por separado cada uno de ellos.

1.2.1. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico se compone básicamente de dos subsistemas: uno de corriente alterna y otro de corriente directa.

1.2.1.1. Sistema eléctrico de corriente alterna

El sistema de corriente alterna es el medio que se utiliza para transmitir la energía eléctrica generada en la estación hacia la Siderúrgica y el Sistema Nacional Interconectado. Este sistema se utiliza también para proveer potencia de servicio para el equipo de la planta.

Cuando el sistema eléctrico CA se opera normalmente, la potencia se genera por los generadores de los diez motores bunker. Desde estos generadores la energía eléctrica fluye a través de un interruptor de corriente asociado (52-G1 hasta 52-G10) hacia la barra colectiva de 13,8 kV en el “*switchgear*” de metal, localizado en el cuarto eléctrico del edificio de generación.

Los interruptores de corriente se utilizan para aislar el generador del sistema cuando este se encuentre fuera de servicio y para proteger los generadores y el equipo de transmisión en caso de una falla eléctrica.

La potencia de la barra colectiva de 13,8 kV se supe por medio de la salida de los interruptores de corriente hacia el lado primario de dos transformadores de potencia: el principal de generación y el servicios auxiliares, localizados en la subestación del centro de energía.

El transformador de potencia principal, eleva el voltaje desde 13,8 kV (conectado en delta) en el lado de baja tensión a 22 kV (conectado con Y) en el lado de alta tensión.

La salida del transformador de 22 kV se dirige a través de un interruptor de corriente en SF6 y un seccionador de línea en la subestación hacia la subestación de la siderúrgica. Aquí la energía se alimenta a través de un interruptor de corriente hacia la barra colectiva existente de 22 kV.

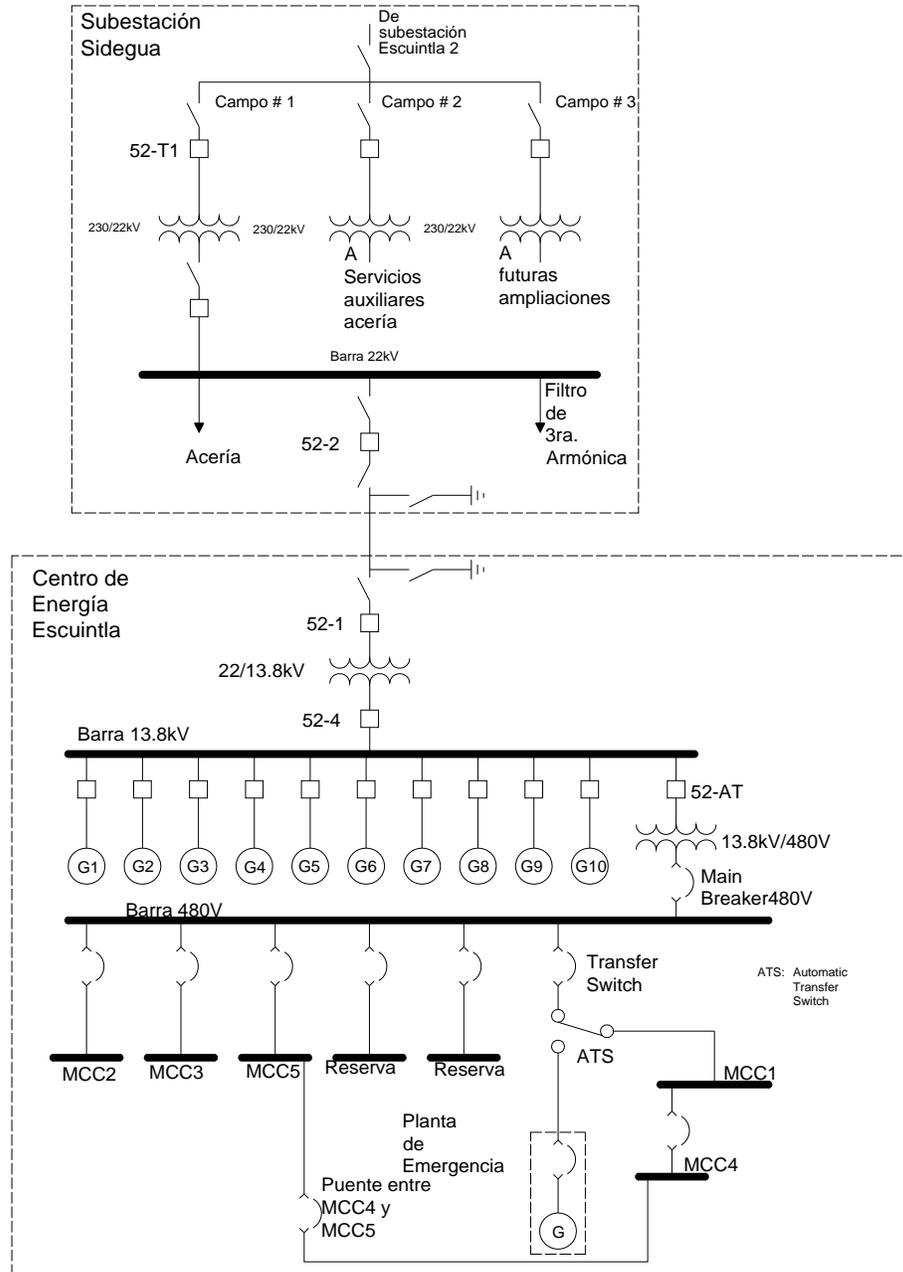
El interruptor de corriente nuevo está equipado con seccionadores de línea y de barra. La barra colectiva de 22 kV alimenta el “*switchgear*” de la planta de acero de 22 kV, el transformador del horno y el transformador T1, el cual aumenta el voltaje a 230 kV para conectarlo al Sistema Nacional Interconectado (SIN). La barra colectiva de 22 kV está, además, conectada a un banco de filtros que se utiliza como compensación de potencia reactiva.

Los transformadores de servicio de la estación, disminuyen el voltaje de 13,8 kV (conectado en delta) en el lado de alta tensión a 480 V (conectado en Y) en el lado de baja tensión. La salida del transformador de 480 se alimenta hacia el “*switchgear*” de 480 V, localizado en el cuarto eléctrico del edificio de generación. El “*switchgear*” de 480 V distribuye la potencia a lo siguiente:

- Centro de Control de Motores (MMC) 1
- MCC 2

- MCC 3
- MCC 5

Figura 1. Diagrama eléctrico unifilar del CEE



Fuente: elaboración propia.

En la figura 1 se muestra el diagrama unifilar de alta, media y baja tensión del Centro de Energía Escuintla, aparece encerrado en cuadros separados el quipo ubicado en la subestación Sidegua y lo ubicado en el CEE.

Los MCCs distribuyen la potencia de 480V a varias cargas de la planta a través de interruptores de circuitos individuales. El MCC1 de servicio esencial supe además el MCC4 de los equipos esenciales del edificio de tratamiento de combustible. Los MCCs #1 y #2 suplen además los transformadores que disminuyen el voltaje a 240/120V para iluminación y otras cargas de bajo voltaje. Cuando los generadores no están en servicio, se toma energía del sistema nacional para alimentar todos los servicios auxiliares de la planta.

1.2.1.2. Sistema eléctrico de corriente directa

El sistema eléctrico CD comienza en el MCC 1, con una salida de 480 VAC suplida al cargador de batería de la estación. La entrada se procesa por el rectificador/cargador de batería para crear una salida de 125 VCD (nominal), la cual mantiene la batería de la estación cargada y provee energía DC al panel de control CD. El panel de potencia distribuye la potencia en 125 VCD a las cargas críticas de la planta. Cuando el sistema normal CA de la planta se encuentra funcionando inadecuadamente o se pierde, la batería de 125 de la estación toma el control del suprido de cargas CD de la planta. Las siguientes se suplen desde el panel de control CD:

- Relevador de falla de presión del transformador principal
- Energía de control de "Switchgear" de 13,8 KV
- Potencia de control del interruptor de Gas 52-1
- Protección del cable de 22 KV
- Protección del transformador principal

1.2.2. Sistema de control de la planta

El sistema de control de la planta consiste en los paneles locales de control para varios sistemas y equipos además de las conexiones hacia el cuarto de control para despliegues y control de los mismos.

1.2.2.1. Panel de control local

Los paneles de control local o LCP por sus siglas en inglés (*Local Control Panel*), están ubicados frente a cada unidad de generación y como su nombre lo indica sirven para controlar localmente la unidad, en ellos se realizan las maniobras para prelubricar y arrancar la unidad; además cuenta un anunciador de alarmas locales e instrumentos analógicos que proporcionan las lecturas más importantes del motor generador.

1.2.2.2. Panel de control del generador

Los paneles de control del generador o GCP por sus siglas en inglés (*Generator Control Panel*), están ubicados en el cuarto de control y corresponden uno para cada unidad. En este panel se controla la velocidad/carga, voltaje/ponencia reactiva y sincronización de cada unidad, cuenta también con un anunciador de alarmas.

1.2.2.3. Panel del edificio auxiliar

El panel del edificio auxiliar o ABP se encuentra ubicado en el edificio auxiliar y se encarga de recolectar toda la información relacionada con los equipos auxiliares de la planta, cuenta con un anunciador de alarmas y el control de las válvulas de centrifugación de aceite.

1.2.2.4. Consola auxiliar

La consola auxiliar o AXP se encuentra ubicada en el cuarto de control; cuenta con un anunciador de alarmas y se encarga de recolectar toda la información de los equipos eléctricos de la subestación; además, recibe la información del ABP vía red *genius*

1.2.2.5. Panel de control del sistema 1

Se encuentra ubicado en el cuarto de control junto al GCP #5 y se encarga de recolectar la información de las primeras cinco unidades, como la de la barra de utilidades, cuenta con un anunciador de alarmas y un sincronizador.

1.2.2.6. Panel de control del sistema 2

Se encuentra ubicado en el cuarto de control junto al GCP #6 y se encarga de recolectar la información de las últimas cinco unidades, así como la de la derivación hacia el transformador de equipos auxiliares.

La información de campo se colecta tanto desde cada uno de los diez generadores como de los sistemas de apoyo.

Cada unidad de generación tiene una caja de conexiones asociada con ella misma, que es el punto de terminación para la información de campo de la unidad de generación.

La información de campo entonces supe al panel de control local del generador (LCP) y al panel de control del generador (GCP).

Estaciones de control adicionales (suavizadores, bombas de combustibles, etc.) se utilizan de modo autónomo con sus valores claves, y los estados de alarma se envían hacia el panel del edificio auxiliar (ABP) y/o la consola auxiliar (AXP).

Con el fin de facilitar el arranque, sincronización y control de carga, la información de campo para los generadores 1–5, se provee al panel de control del sistema #1, mientras que la información de campo de los generadores 6-10 se provee al panel de control del sistema #2. Los paneles de control se encuentran atados y reciben entradas del panel de control auxiliar, el panel del edificio auxiliar, el *switchgear* de utilidades y el *switchgear* de servicios auxiliares.

Con el fin de permitir el monitoreo desde el cuarto de control y registro de la información, los paneles de control de sistema # 1 y 2 están equipados con un sistema scada llamado *WOIS* y *WISE*.

Lo siguiente contiene los componentes principales y subsistemas del sistema de control de planta:

- Diez (10) paneles de control local del motor
- Diez (10) paneles de control del generador
- Dos (2) paneles de control del sistema
- Estaciones de control local
- Panel del edificio auxiliar
- Panel de la consola auxiliar
- Sistemas *scada* *WOIS* y *WISE*.

1.2.2.7. Red Genius

Todos los paneles están interconectados mediante dos redes de comunicación *genius* y distribuidos así: la red #1 incluye los cinco primeros LCP, los cinco primeros GCP, el S1C y la interconexión con la red #2 mediante el AXP. La red #2 incluye los últimos cinco LCP, los últimos cinco GCP, el S2C, el ABP y la interconexión con la red #1 mediante el AXP. Ambas redes se interconectan con el sistema *scada*.

1.2.2.8. Controles lógicos programables serie 90-30 GE Fanuc

El controlador lógico programable (PLC) utilizado en el Centro de Energía Escuintla es de la serie 90-30 y es miembro de la familia de PLCs Series 90 de GE Fanuc.

Los PLCs 341 e inferiores de las series 90-30 y el PLC de las series 90-20, utilizan un microprocesador 80188. La operación incluye la ejecución de programas y tareas internas, tales como diagnóstico de rutinas, exploraciones de entrada/salida y procesamiento de alarmas. El *firmware* del sistema contiene también rutinas para la comunicación con el programador. Estas rutinas permiten la carga y descarga de los programas de aplicación, retorno de la información del estado y el control del PLC.

En las series 90-30 de PLCs, el programa de aplicación (lógica del usuario) que controla el proceso final al que se aplica el PLC, es controlado por un coprocesador secuencial de instrucciones (ISCP). El ISCP es implementado mediante *hardware* en el modelo 313 y superiores y mediante *software* en los sistemas del modelo 311, y del PLC Micro.

El microprocesador y el ISCP basado en *hardware* pueden ejecutarse simultáneamente, permitiendo al microprocesador servir a las comunicaciones; mientras que el ISCP está ejecutando el grueso del programa de aplicación; sin embargo, el microprocesador debe ejecutar los bloques de funciones no booleanas.

1.2.3. Sistema de vapor auxiliar

El sistema de vapor auxiliar utiliza dos calderas recuperadoras de calor y la caldera auxiliar para la producción de vapor a 110 psi. El vapor entonces se distribuye a través de la planta para que el mismo sea utilizado en los calentadores de tanques de HFO, módulos de acondicionamiento de combustible, centrífugas de HFO y de LO, deshollinadores de calderas de recuperación, etc.

Las dos calderas de recuperación que son intercambiadores de calor de coraza y tubos, son idénticas. El agua de alimentación se dirige hacia cada una de las calderas desde el sistema de condensado y agua de alimentación. Las unidades de generación # 3 y 8 tienen asociadas las calderas de recuperación 1 y 2, respectivamente. Los gases calientes del motor-generador pasan a través de tubos, calientan el agua de alimentación y producen vapor. La línea de vapor para cada una de ellas contiene una válvula de flujo en una sola dirección, una manga flexible, línea de drenaje con válvula y una tapa enroscada y válvulas de aislación, previo a conectarse con el cabezal de vapor auxiliar.

Además, la caldera auxiliar también se supe con agua desde el sistema de condensado y agua de alimentación. El agua de alimentación se dirige a través de una válvula de control de nivel hacia la caldera para mantener el nivel normal de agua (aproximadamente 1 pie – 2 pulgadas del tope de la caldera).

El vapor saturado de 110 psi desde las calderas en servicio, se dirige hacia el cabezal de vapor auxiliar el cual supe una lanceta de vapor a través de dos válvulas de aislación y al desaereador, para eliminar oxígeno en el condensado.

La tubería está, además, equipada con varias trampas de vapor para prevenir la acumulación de condensado en la tubería y para su recuperación.

Una vez el vapor ha sido utilizado en cualquiera de los componentes, la salida del mismo es una mezcla de vapor y condensado y esta se dirige a través de una trampa de vapor que permite solamente que pase el flujo de condensado a través de la misma, hacia la tubería de colección.

1.2.4. Sistema de condensado y agua de alimentación de calderas

El sistema de condensado y agua de alimentación de las calderas sirve de punto de colección tanto para el condensado que viene de las trampas de vapor como el condensado bombeado del área de tanques que regresa con el propósito de permitir que el flujo combinado sea calentado y desaereado nuevamente, previo a ser suplido en las calderas de recuperación de calor y en la caldera auxiliar en forma de agua de alimentación.

El condensado se regresa del sistema de vapor auxiliar por dos medios. El primero utiliza las bombas de retorno de condensado ubicadas en el área de tanques, para dirigir el flujo de la sección de condensado al desaereador. El segundo colecta el condensado desde las trampas de vapor en el sistema de vapor y dirige el flujo al desaereador a través de una trampa de vapor.

1.2.4.1. Inyección de químicos

El sistema de tratamiento químico de las calderas supe la línea de descarga común de las bombas de alimentación de agua con amino volátil (para el control de corrosión en el condensado) y con fosfato (para control de corrosión en la caldera). Cada químico se supe a través de líneas de suplido individuales que contienen una válvula de flujo en una sola dirección y otra de aislación. Además, se alimenta de sodio para realizar el barrido de oxígeno en la caldera (es decir, remoción química de oxígeno del agua de alimentación). El sulfito de sodio se inyecta en la línea de recirculación de la bomba de alimentación para ser regresado al desaerador.

1.2.5. Sistema de agua de circulación

El sistema de agua de circulación es un sistema cerrado que provee agua de enfriamiento a los diez generadores diesel, los cinco intercambiadores de calor de combustible liviano y los tres módulos de enfriamiento de puntas de inyectores. La energía térmica que se transfiere al agua de circulación en los intercambiadores de calor, se rechaza a la atmósfera en una torre de enfriamiento de flujo contrario e inducido. La pérdida de agua de ciclo debida a la evaporación, se reemplaza por agua de servicio suplida en la base de la torre de enfriamiento desde el sistema de agua de reemplazo.

La base de la torre de enfriamiento se separa en dos secciones que se encuentran enlazadas con una línea de eculización. Una sección de la base de la torre de enfriamiento provee la succión a la bomba de circulación A, la otra sección provee la succión a la bomba de enfriamiento C y la línea de eculización provee la succión a la bomba de circulación B.

El cabezal de retorno de agua de circulación dirige el flujo combinado hacia la torre de enfriamiento. Un indicador local de temperatura marca la temperatura del agua de circulación. Una vez que el flujo alcanza la torre de enfriamiento, un cabezal supe a las cinco celdas de la torre a través de válvulas individuales de aislación.

En cada una de la celdas de la torres de enfriamiento, el agua de circulación se rocía hacia abajo mientras el aire pasa hacia arriba enfriando el agua. El agua enfriada desde las celdas A y B, se conecta en una de las bases mientras el agua enfriada desde las celdas C, D y E, se colecta en la otra sección de la torre de enfriamiento.

1.2.5.1. Plataforma de inyección de químicos

La plataforma de inyección de químicos contiene agentes para el control de corrosión/formación de escamas y agente insecticida biológico.

El agente biológico se añade a la base de la torre de enfriamiento, mientras que el agente de control de corrosión/formación de escamas se añade al flujo de agua de circulación.

1.2.6. Sistema de agua de reemplazo

El sistema de agua de reemplazo tiene la función de suplir con agua la planta. Esto incluye suplir agua de pozo al tanque de almacenaje de agua cruda/incendio, tratamiento con hipoclorito (según sea necesario), el suavizador de agua (según sea necesario), y la distribución a varias localizaciones.

La fuente de agua para servicio y reemplazo son dos pozos de agua; cada uno tiene una bomba de agua de pozo. La línea de descarga en común de las bombas del pozo de agua está equipada con un sistema de alimentación de hipoclorito, para la destrucción y control de materia orgánica antes de que el agua sea dirigida al tanque de almacenaje de agua cruda/incendio.

El tanque de almacenaje de agua cruda/incendio supe las dos bombas de agua de servicio a través de la línea de succión en común, que toma succión 12 pies y 9 pulgadas sobre la base del tanque. Esto asegura 220 000 galones debajo del lugar de dicha succión, solamente para proveer al sistema de protección contra incendios.

Cuando está lleno, el tanque de almacenaje de agua cruda/incendio puede suplir 40 000 galones de agua a las dos bombas de agua de servicio. Las bombas de agua de servicio descargan a un cabezal en común que está equipado con una línea de recirculación de vuelta, al tanque de almacenaje de agua cruda/incendio, con una válvula de control de flujo.

Este arreglo permite suplir el servicio de la bomba de agua en servicio a una razón variada del flujo de agua. En este punto, se usa un poco de agua sin tratamiento adicional, mientras que el resto del agua es dirigido a la plataforma del suavizador del agua.

El agua de servicio no suavizada se usa en toda la planta para varios fines: lavado de ojos/duchas de seguridad, llenar la torre de enfriamiento con agua de reemplazo, así como fregaderos y duchas en el cuarto de control y edificio de administración.

La plataforma del suavizador de agua tiene dos suavizadores de zeolito de sodio y un tanque de agua salada ("*brine*") para regenerar el suavizador en servicio después que se consume. Un suavizador está en servicio mientras el otro está en regeneración con una solución de agua salada ("*brine*") o en espera. El suavizador en servicio remueve las durezas del agua, específicamente iones de calcio (Ca⁺⁺) y de Magnesio (Mg⁺⁺).

El agua suavizada se usa para:

- Reemplazo de agua para el ciclo vapor-condensado de la planta y es dirigida al tanque de almacenaje condensado a través de una válvula automática de control.
- Dilución de químicos que serán usados para el control químico de las calderas.
- El tanque principal de las centrífugas de aceite lubricante.
- Tanque principal de las centrífugas de combustible pesado.

1.2.7. Sistema de aire comprimido

Dos plataformas de compresores localizadas en el edificio de tratamiento de combustible suplen aire al motor de arranque de las diez unidades de generación, aire de servicio, y el aire de instrumentación. Cada plataforma contiene un compresor reciprocante de etapa sencilla impulsado por motor eléctrico. Cada receptor está equipado con una válvula automática de drenaje de condensado. Durante la operación normal, una plataforma del compresor se encuentra en operación y la otra en espera.

Durante los períodos de arranque u otros momentos de alta demanda, puede ser necesario o deseable operar ambas unidades, simultáneamente.

Las salidas de los recibidores en las dos plataformas se atan en un cabezal común, el cual alimenta lo siguiente:

- El aire de arranque para cada uno de las diez unidades de generación. El aire de arranque para cada uno de los motores se supe a través de una válvula de aislación manual hacia la conexión de línea flexible en el motor. El punto bajo de la línea de suprido se provee con un drenaje equipado con una trampa de agua.
- El aire de servicio en el edificio de generación, cada una con una válvula manual y un conector rápido.
- Aire de servicio hacia el taller y bodega de almacenaje.
- Aire de operación hacia la bomba neumática de transferencia de aceite lubricante. Una válvula de aislación manual se utiliza para arrancar y detener esta bomba.
- Aire de operación hacia la bomba del sumidero de contención de aceite lubricante. Esta bomba se aísla por una válvula operada por un flotador, la cual abre para arrancar la bomba en caso de alto nivel del sumidero.
- Aire hacia los secadores de aire del sistema de aire de instrumentación, según se describe a continuación.

1.2.8. Sistema de aceite combustible pesado

El propósito del sistema de combustible es el de proveer combustible a la presión, temperatura y calidad necesarias para la operación de los motores diesel. El sistema incluye los subsistemas de recibo y almacenaje y el sistema de tratamiento.

Las entregas de aceite combustible se reciben en la estación de descarga de combustible. Se proveen dos líneas equipadas con conexiones de mangas flexibles, para recibir el aceite de los camiones y entregar el mismo a la succión de tres bombas de desplazamiento positivo para la descarga del aceite. El diseño del sistema es tal, que con dos bombas operando pueden descargar el combustible suficiente para un día de generación en menos de cuatro horas, con la tercera bomba en descanso, o en el modo de mantenimiento.

Cada tanque de almacenaje de aceite combustible tiene una capacidad de 2270 m³ (600 000 galones), lo que corresponde a un suplido de diez días de combustible a carga completa de los motores. El nivel de cada tanque se monitorea y se muestra localmente en un indicador local de nivel.

El aceite fluye por gravedad desde los tanques de almacenaje hacia un cabezal común que supe las dos bombas de desplazamiento positivo, montadas en sus propias plataformas. Estas bombas sirven de transferencia y mezclado de aceite. Cada una está impulsada por un motor de 15 kW (20 HP) y están diseñadas para producir 110% de los requisitos de combustible de la planta. Durante la operación normal, una bomba se encuentra en operación, con la otra en espera o recirculando el aceite hacia el tanque de almacenamiento.

El tanque de asentamiento de aceite es un tanque que tiene una capacidad de 454 m³ (120 000 galones), calentado con vapor para mantener la temperatura de aceite combustible a 60°C. Si el nivel del tanque se encuentra alto, se anuncia una alarma en el panel de control auxiliar y en el cuarto de controles. Si el nivel del tanque llega a su límite alto, las bombas de transferencia y mezclado se disparan para prevenir el sobre llenado del tanque. Además, se activa una alarma en caso de que el nivel del tanque se encuentre bajo; cuando el nivel del tanque continúa bajando, las bombas de transferencia se disparan.

El tanque de asentamiento supe el cabezal de succión de las bombas de adelantamiento a través de un arreglo de succión flotante. Estas bombas son de desplazamiento positivo, cada una impulsada por un motor de 7,5 kW (10 HP) y están diseñadas para entregar un 110% del requisito de flujo, a la capacidad completa de la planta.

La descarga de las bombas de transferencia del tanque de asentamiento se dirige hacia la plataforma de las centrífugas del aceite combustible (módulo de tratamiento), localizado en el edificio de tratamiento de combustible.

El cabezal de descarga de las bombas de alimentación de aceite supe cuatro centrífugas de aceite, las cuales se utilizan para separar el agua y las partículas foráneas del aceite. El flujo a cada centrífuga es a través de un calentador de vapor asociado, el cual mantiene la temperatura en el nivel adecuado para una separación eficiente.

El sistema de tratamiento de aceite está diseñado de manera que durante la operación normal del mismo, dos bombas de alimentación y dos centrífugas con sus calentadores asociados, pueden llenar la demanda del combustible.

El aceite limpio descargado desde las centrífugas, fluye hacia el tanque diario de aceite combustible localizado en el área de tanques, mientras el agua y el fango separado del aceite se descargan a un tanque de lodos.

El tanque diario de aceite es un tanque de capacidad de 227 m³ (60 000 galones), calentado por vapor para mantener la temperatura del aceite a 60°C.

La descarga de las bombas de adelantamiento del tanque diario fluye hacia los cinco módulos de acondicionamiento de aceite (módulos de aumento) localizados en el edificio de tratamiento de aceite. Estos módulos son llamados también *Booster*. Los módulos de aumento están diseñados para suplir el aceite hacia los motores a la viscosidad y presión adecuadas.

El flujo para cada uno de los cinco módulos es idéntico. El aceite se dirige hacia la succión de dos bombas de suplido, una de estas está en servicio y la otra se encuentra en espera.

El módulo de aumento de las bombas suple el combustible al desaereador, donde el combustible se mezcla con el aceite en exceso que regresa de los motores y cualquier aire o vapores de aceite que se encuentren en el mismo, son removidos.

Los módulos de aumento suministran más combustible de lo necesario para la operación de los motores, el exceso se recircula desde los motores hacia el desaereador del módulo de aumento. El sistema está diseñado con un factor de circulación de 4; esto significa que el flujo de combustible hacia los motores, es aproximadamente cuatro veces la capacidad requerida. El combustible de cada módulo fluye a través de un filtro final, y luego hacia los motores.

1.2.9. Sistema de combustible destilado

El propósito principal del sistema de combustible destilado (DFO, "*Distillate Fuel Oil*") es el de proveer combustible a los motores diesel durante las etapas de arranque y detenida de los mismos y de funcionar como un combustible alternativo para la operación de los motores diesel. El sistema además supe combustible a la caldera auxiliar, a la planta de emergencia y la planta contra incendios.

Las entregas de combustible destilado se realizan por medio de camiones en la estación de descarga de combustible. Una sola línea equipada con conexiones de mangas flexibles recibe el combustible desde el camión y lo lleva hacia la succión de la bomba de descarga de combustible destilado.

El tanque de almacenaje de combustible destilado tiene una capacidad de 152 m³ (40 000 galones). Un transmisor de nivel provee una indicación de nivel de tanque al panel de control de combustible en el edificio de tratamiento de combustible, y provee una alarma al panel del edificio auxiliar y a la consola auxiliar ubicada en el cuarto de control en caso de que exista un nivel bajo en el mismo.

El aceite fluye por gravedad desde el tanque de almacenamiento hacia un cabezal común que supe las dos bombas de transferencia de combustible destilado. Estas bombas son de tipo de desplazamiento positivo. Cada una de estas es impulsada por un motor eléctrico de 15 kW (20 HP), y está capacitada para producir un 110% de los requisitos de combustible, cuando la planta opera a su capacidad máxima.

Desde las bombas de transferencia de destilado, el combustible fluye hacia cuatro filtros separadores designados para remover tanto partículas sólidas como contaminación líquida (agua).

El combustible desde los separadores fluye hacia el cabezal de alta presión en el edificio de tratamiento de combustible. La presión en el cabezal de alta presión se controla por medio de una válvula de contrapresión, la cual está ajustada a 6,9 bar (100 psi). El flujo principal de combustible destilado desde el cabezal de alta presión es hacia el sistema de baja presión de combustible destilado. Se utilizan válvulas de regulación de presión dobles para reducir la presión del destilado a 3,45 bar (50 psi) para suplir la caldera auxiliar y para los motores, a través de los módulos de aumento de aceite combustible pesado.

El destilado de baja presión, desde la salida de las válvulas reguladores de presión se supe además hacia los tanques de aceite combustible de la planta de emergencia y la planta contra incendios.

El flujo normal de combustible destilado hacia los motores diesel durante el arranque y la detenida, se hace a través de los módulos de aumento del aceite combustible pesado (plataformas de acondicionamiento) definidos en la descripción del sistema de aceite combustible pesado.

El destilado de baja presión desde la estación de reducción de presión fluye hacia los cinco módulos de aumento de aceite pesado, donde se admite a través de una válvula de selección de tres vías, operada por un motor. Cada módulo de aumento provee el combustible necesario para dos motores.

1.2.10. Sistema de aceite de lubricación

El sistema de aceite de lubricación distribuye aceite lubricante a los componentes internos del motor para remover el calor de fricción de los mismos y así ejercer funciones de control del motor.

El sistema de aceite de lubricación supe aceite de motor a los anillos de los pistones, cojinetes, válvulas, turbocargadores y la bomba de aceite del gobernador.

El sistema consiste de una bomba de aceite de desplazamiento positivo impulsada por el motor, un juego de filtros centrífugos, un juego de filtros de aceite, un enfriador de aceite, una válvula de regulación de presión de aceite y el receptáculo de aceite o cárter.

Cada motor tiene una capacidad de 400 galones de aceite lubricante. La bomba de aceite de lubricación es impulsada por el motor durante la operación del mismo. La bomba de aceite toma succión en el cárter y descarga el mismo a través de los filtros de aceite, los cuales remueven partículas mayores de 25 micrones.

2. AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE COJINETES DE GENERADOR

El sistema original de lubricación de cojinetes de generador consiste en una bomba de accionamiento manual de desplazamiento positivo, cuya función es bañar el muñón del eje del generador con aceite para reducir la fricción de este con el cojinete.

Existen dos bombas, una por cada cojinete, que deberían ser giradas manualmente por el operador antes de arrancar la unidad. El cojinete cuenta con un anillo lubricador que cuelga del muñón, gira alrededor de él cuando la unidad está operando, y se encarga de recoger aceite del sumidero y salpicarlo sobre el muñón; sin embargo, esto no es suficiente para obtener una lubricación adecuada, por lo que el operador debía recircular aceite con la bomba manual cuando las condiciones de temperatura llegaban a su punto de alarma.

2.1. Antecedentes

Debido a las frecuentes fallas de arrastre en los cojinetes, se implementaron dos bombas, una por cada cojinete con motor eléctrico, para que estas permanezcan encendidas durante toda la operación de la unidad; sin embargo, el encendido de estas no es automático y lo debe hacer el operador antes de arrancar la unidad de generación, estando sujeto a un eventual error humano y la posible falla de lubricación que esto conlleva. Además, al momento de un disparo de las bombas nadie da cuenta de ello hasta que se refleja un una alta temperatura de cojinete.

Otro problema que se ha observado es que los puntos de alarma y disparo por alta temperatura de cojinetes de generador, están muy por encima de los valores operativos, de tal manera que cuando la temperatura llega a estos valores, las bombas han pasado mucho tiempo sin operar, ocasionando daños severos al cojinete hasta el punto que ha sido necesario reemplazarlo.

La remanufacturación de cada cojinete tiene un costo de Q20 000,00 aproximadamente; el costo por indisponibilidad de la unidad es de US\$7,90 por kW*mes y requiere de unas 10 horas realizar dicho cambio; suponiendo un tipo de cambio de ocho quetzales por cada dólar estadounidense y una potencia de 3800 kW, se tendría un costo por indisponibilidad de Q3335,00, para un total de Q23 335.00.

2.2. Propuesta a implantar

Se procederá a dividir la propuesta en tres partes:

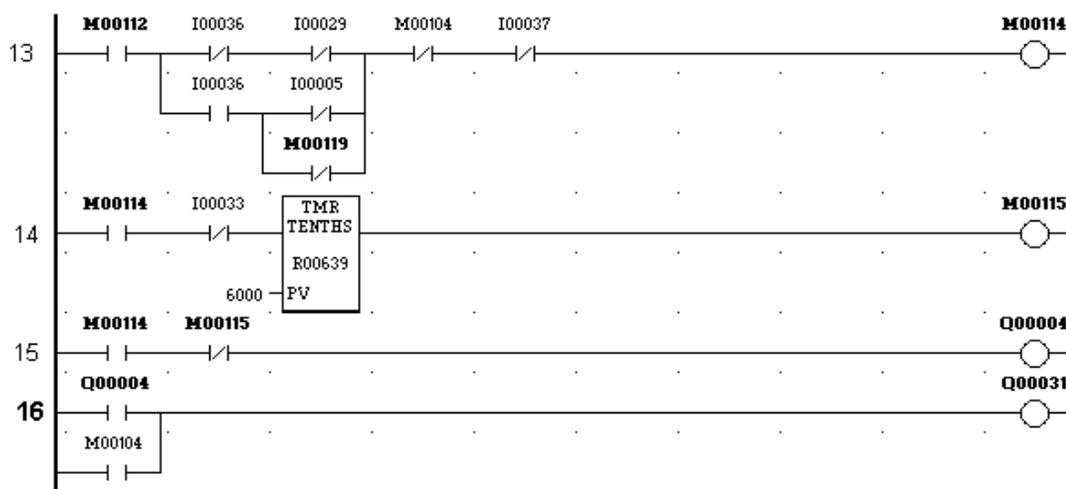
- La primera se refiere al arranque automático de las bombas de lubricación;
- En la segunda se busca diseñar un resumen de alarmas al que se le llamará “falla de lubricación de cojinetes de generador”, que incluya alarmas que se consideran necesarias para alertar al operador y prevenir una situación de riesgo para la integridad del cojinete;
- Finalmente, se propondrán modificaciones a los puntos de alarma y disparo por alta temperatura de cojinetes de generador, de modo que se adecúen a las necesidades.

2.2.1. Diseño de un sistema de control automático para lubricar cojinetes de generador

Para realizar las modificaciones que se proponen en los programas lógicos de PLC se utiliza el software de programación llamado *Proficy Machine Edition*, que es compatible con los PLC marca GE Fanuc, de la serie 90-30, que se utilizan en esta planta.

En la figura 2 se muestra el diagrama de escalera que se propone para el arranque automático de las bombas de lubricación de cojinetes de generador. En dicha figura, las líneas 13, 14 y 15 ya existen en el diseño original y solo se ha agregado la línea 16, la cual se ha marcado con negrita. En la tabla I se muestra el significado de cada uno de los elementos de la figura 2 y aparecen con negrita las nuevas variables utilizadas.

Figura 2. Diagrama de escalera del programa de PLC propuesto para el arranque automático de bombas de lubricación de cojinetes de generador



Fuente: elaboración propia.

Tabla I. **Significado de las variables utilizadas en el diagrama de la figura 2**

| Variable | Significado |
|-----------------|--|
| I00005 | <i>Switch</i> de presión de prelubricación |
| I00029 | Parada de motor en panel local |
| I00033 | Botón de <i>reset</i> |
| I00036 | Selector de arranque en panel local |
| I00037 | Modo apagado en panel local |
| M00104 | Motor operando |
| M00114 | Requerimiento de prelubricación de motor primario |
| M00115 | Parar prelubricación |
| M00119 | Presión de prelubricación de motor primario aceptable (50 kPA) |
| Q00004 | Relevador de prelubricación de motor primario |
| R00639 | Temporizador (tiempo de pre lubricación) |
| Q00031 | Relevador de lubricación de cojinetes de generador |

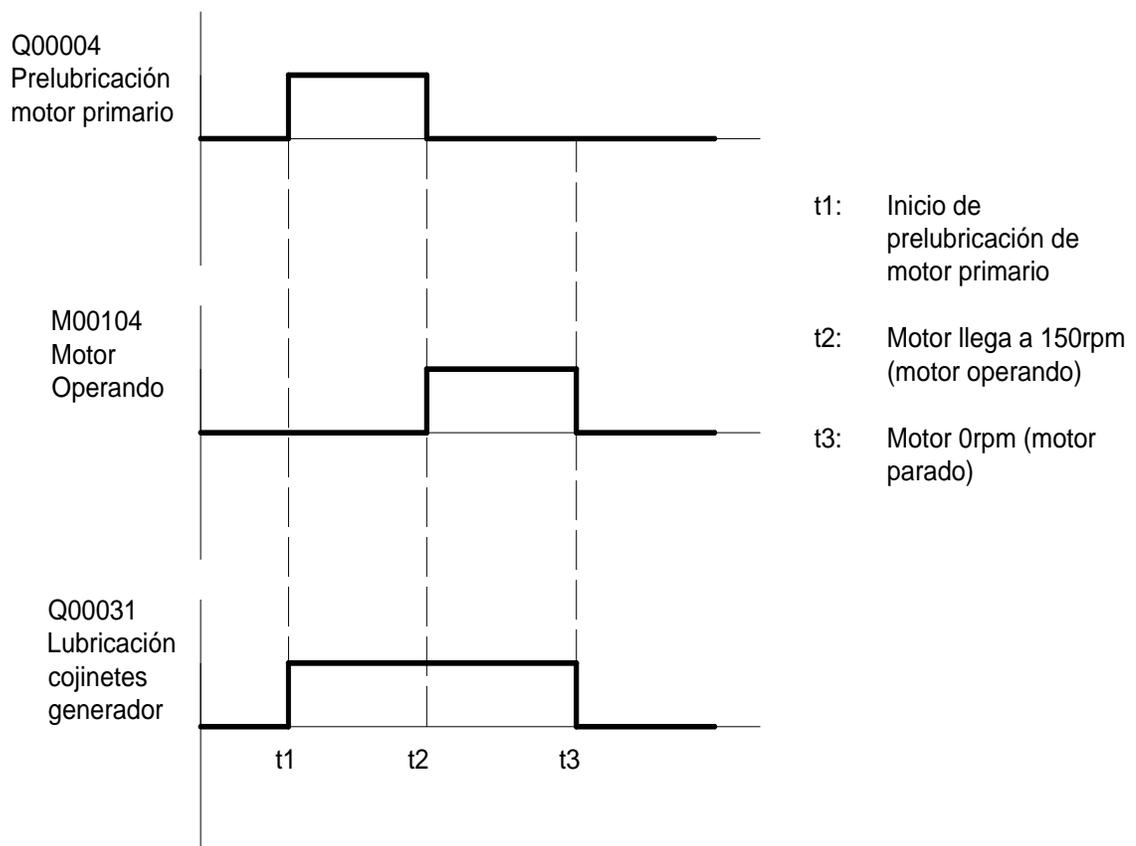
Fuente: elaboración propia.

Las bombas de lubricación de cojinetes de generador al igual que la bomba de prelubricación del motor primario, deben arrancar antes de que lo haga la unidad de generación; sin embargo, a diferencia de esta última, las primeras deben quedar operando durante toda la operación de la unidad motor-generador.

Es decir, que con cualquiera de estas dos condiciones que exista –motor prelubricando o motor operando– las bombas de lubricación de cojinetes de generador deben operar. Esto se refleja en la línea 16 del diagrama de escalera de la figura 2.

Cuando el motor primario alcanza 150 rpm se activa la marca M00104 (motor operando) mediante un *switch* de velocidad, que es la que desactiva la salida Q00004 del relevador de prelubricación y a la vez mantiene activada la Q00031 (relevador de lubricación de cojinetes de generador), esto garantiza que M00104 cierre antes que abra Q0004 y así no se produzcan interrupciones instantáneas hacia Q00031. En la figura 3 se muestra la correspondiente gráfica de tiempos de accionamiento.

Figura 3. **Gráfica de tiempos de accionamiento de la línea 16 de la figura 2**



Fuente: elaboración propia.

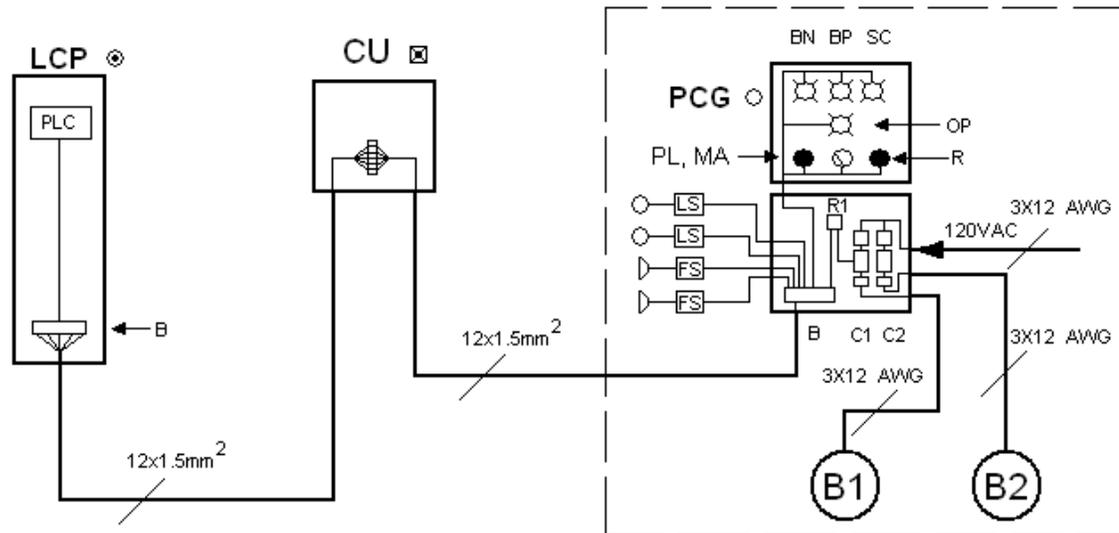
2.2.2. Diseño de una alarma de falla de lubricación de cojinetes de generador

Básicamente se identifican tres tipos de anomalías que pueden poner en riesgo la integridad del cojinete de generador y que ameritan ser incluidas en un resumen de alarmas al que se le llama “falla de lubricación de cojinetes de generador”. Cabe hacer notar que la alarma “alta temperatura de cojinetes de generador” se podría considerar dentro de este resumen de alarmas, pero debido a que ya existe en el programa original se dejará por separado e independiente de este y se tomarán en cuenta solo las que se refieren a falla de lubricación, las cuales son:

- Bajo nivel de aceite
- Bajo flujo de aceite
- Disparo de bombas de cojinetes de generador

Para realizar esto se propone instalar un tablero en el área aledaña al generador, al que se le llamará: panel de control de bombas de cojinetes de generador (PCG). Dicho panel consta de cuatro luces indicadoras: una para cada una de las alarmas del resumen y la cuarta para indicar la operación de las bombas de lubricación; un botón para reconocer estas alarmas, un botón para probar las luces indicadoras (prueba de lámparas) y un selector de modo de operación de las bombas (automático o manual); todo esto se muestra en la figura 4. En el modo “automático” las bombas arrancan por una señal del PLC que depende de las condiciones descritas en la sección 2.2.1 y en el modo de arranque “manual”, estas arrancan directamente, que podría ser útil en caso existiera algún tipo de problema con el PLC o bien se desee realizar pruebas con el motor primario apagado.

Figura 4. **Diagrama de interconexión entre paneles, para el sistema de lubricación de cojinetes de generador propuesto**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 4 se muestra el diagrama de interconexión entre los tres paneles involucrados y se ha encerrado en un cuadro de trazos el equipo nuevo a instalar. En el panel de control de bombas se detallan tanto los componentes internos como los externos. Es de hacer notar que el panel de control local (LCP) y la caja de uniones (CU) ya existen, y solo se necesita agregarles los bornes necesarios.

Por razones de economía, el control de las bombas y las alarmas se pretende hacer con el mismo PLC, aunque los accesorios como botoneras y luces indicadoras estarán en el nuevo panel de control de bombas de cojinetes de generador, solo será necesario cablear entre paneles.

En la tabla II se muestra el significado de las abreviaturas utilizadas en la figura 4 y se muestran con negrita los componentes que no existen en el diseño actual.

Tabla II. **Significado de las abreviaturas utilizadas en la figura 4**

| Abreviatura | Descripción |
|--------------------|--|
| LCP | Panel de control local |
| CU | Caja de uniones (<i>junction box</i>) |
| PCG | Panel de control de bombas de cojinetes de generador |
| PLC | Control lógico programable |
| B1 | Bomba de lubricación de cojinete # 1 |
| B2 | Bomba de lubricación de cojinete # 2 |
| LS | Switch de nivel de aceite |
| FS | Switch de presión de aceite |
| BN | Bajo nivel de aceite de cojinetes (luz indicadora) |
| BF | Baja presión de aceite de cojinetes (luz indicadora) |
| SC | Disparo por sobre carga de bombas (luz indicadora) |
| OP | Bombas operando (luz indicadora) |
| R | Reconocer alarmas (botón) |
| M A | Selector manual-automático |
| PL | Prueba de lámparas (botón) |
| C1 | Contactador de bomba # 1 + guardamotor |
| C2 | Contactador de bomba # 2 + guardamotor |
| R1 | Relevador de control |
| B | Borneras |

Fuente: elaboración propia.

2.2.2.1. Modo de funcionamiento

En el momento de exponerse cualquiera de las alarmas en el panel de control de bombas de cojinete de generador –PCG– (es decir: bajo nivel de aceite, bajo flujo de aceite o disparo de bombas de cojinetes de generador) mediante una luz indicadora debidamente identificada.

Luego, simultáneamente aparece la nueva alarma propuesta: “falla de lubricación de cojinetes de generador” en el panel de control local –LCP– del correspondiente motor-generador; de esta manera llega la alerta al cuarto de control, a través de la red *Genius* del sistema de control general de la planta.

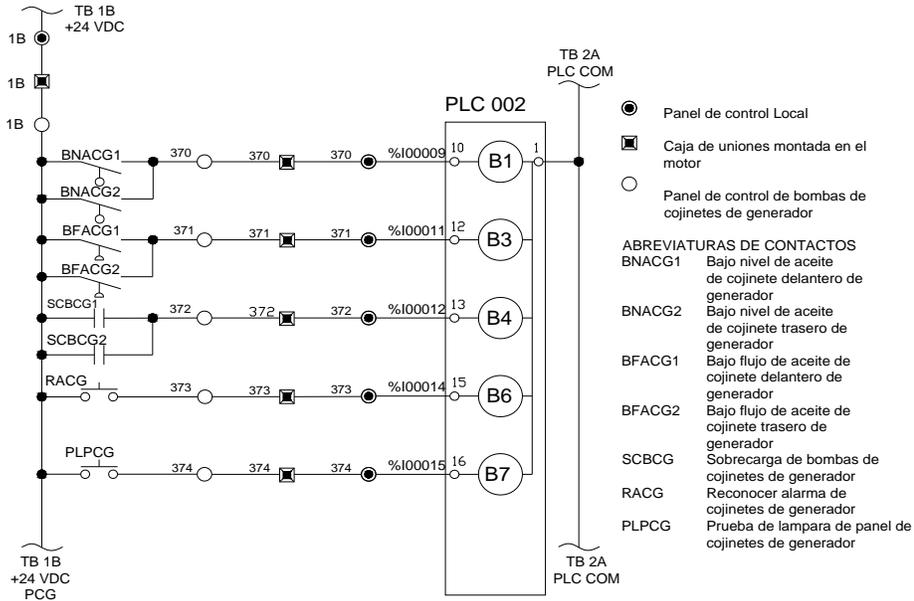
Seguidamente el operador reconoce la alarma en el panel de control local y luego acude al PCG a identificar cuál de las tres alarmas está expuesta y la reconoce mediante un pulso al botón debidamente identificado. Después de haberse restablecido las condiciones normales de operación, las indicaciones de alarma desaparecen tanto en PCG como en el LCP. Como se mencionó anteriormente, en el PCG existe un botón para prueba de lámpara y la opción de arrancar las bombas en forma manual o automática, mediante un selector de dos posiciones sostenidas.

2.2.2.2. Diagramas de alambrado hacia el controlador lógico programable

En la figura 5 se muestra diagrama de alambrado hacia la tarjeta de entradas digitales de PLC, por simplicidad se ilustran solamente las nuevas variables necesarias para la propuesta. Por otro lado, se detalla el número de borne y el panel al que pertenece. De igual forma en la figura 6, se muestra el diagrama de la tarjeta de salidas digitales.

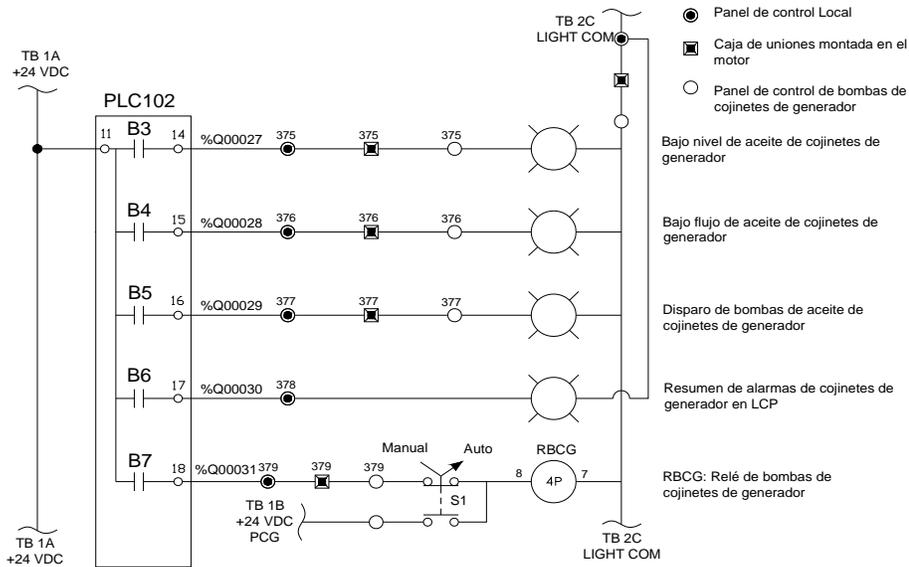
En ambas figuras se incluyen las entradas y salidas necesarias para el arranque automático de las bombas de lubricación, así como dos botones, uno para reconocer cualquiera de estas tres alarmas y el otro para hacer prueba de lámparas en el panel de control de bombas de cojinetes de generador.

Figura 5. Diagrama de entradas digitales de PLC para la automatización del sistema de lubricación de cojinetes de generador



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Diagrama de salidas digitales de PLC para la automatización del sistema de lubricación de cojinetes de generador

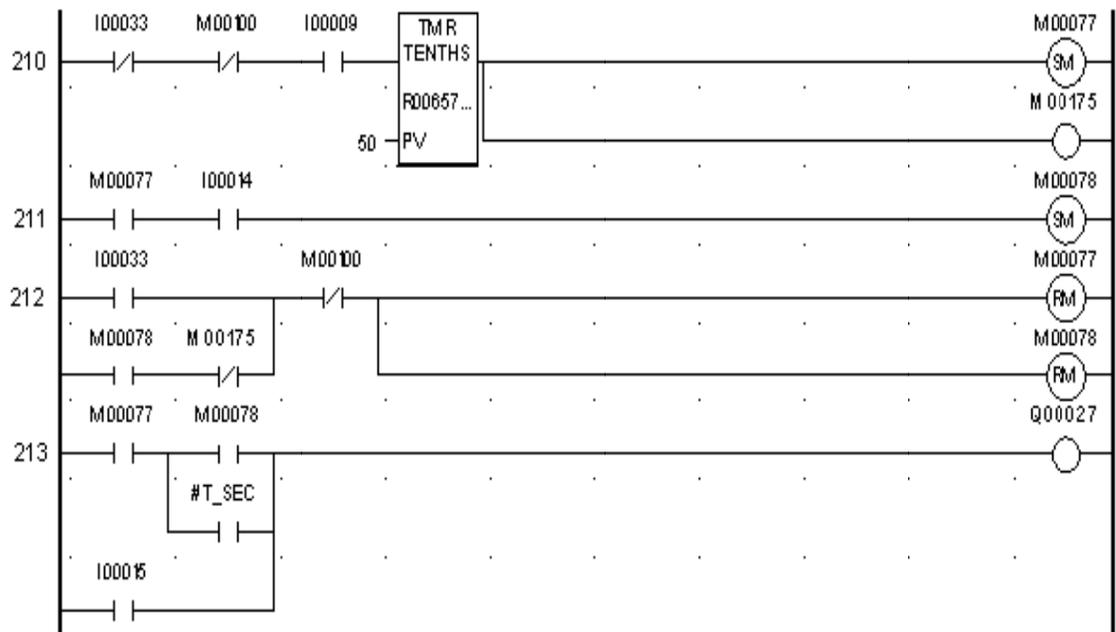


Fuente: elaboración propia.

2.2.2.3. Diagramas de escalera para la alarma de falla de lubricación de cojinetes de generador

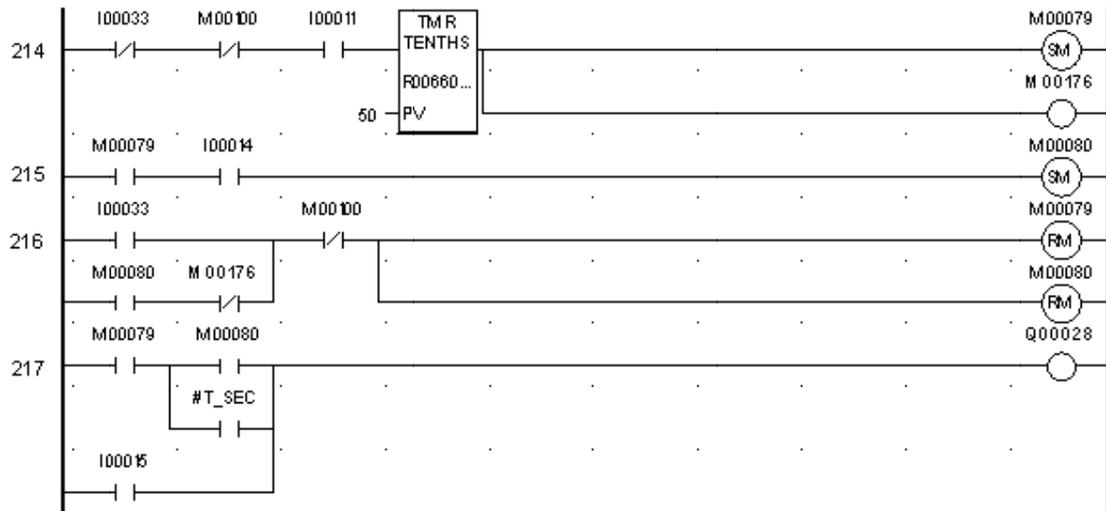
En las figuras 7, 8 y 9 se muestran respectivamente los diagramas de escalera para las alarmas de bajo nivel de aceite, bajo flujo de aceite y disparo de bombas que constituyen la falla de lubricación de cojinetes de generador. Estos diagramas deben ser incluidos al final del bloque de programa llamado “alarms” de cada PLC de los Paneles de Control Local. En la tabla III se muestra el significado de las variables utilizadas en las figuras 7, 8 y 9, con **negrita** aparecen las nuevas variables utilizadas.

Figura 7. **Diagrama de escalera para la alarma: bajo nivel de aceite de cojinetes de generador**



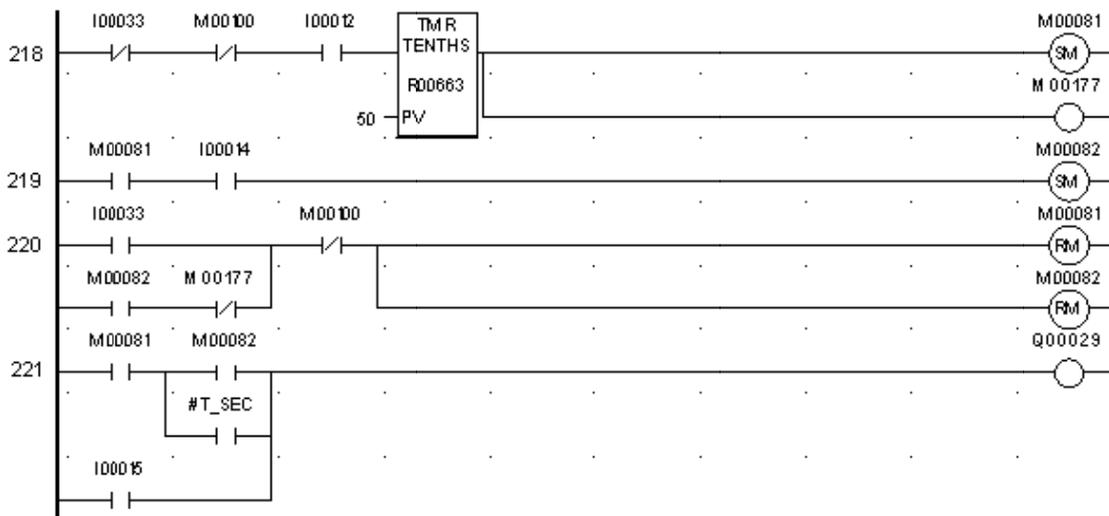
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Diagrama de escalera para la alarma: bajo flujo de aceite de cojinetes de generador



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Diagrama de escalera para la alarma: disparo de bombas de cojinetes de generador



Fuente: elaboración propia.

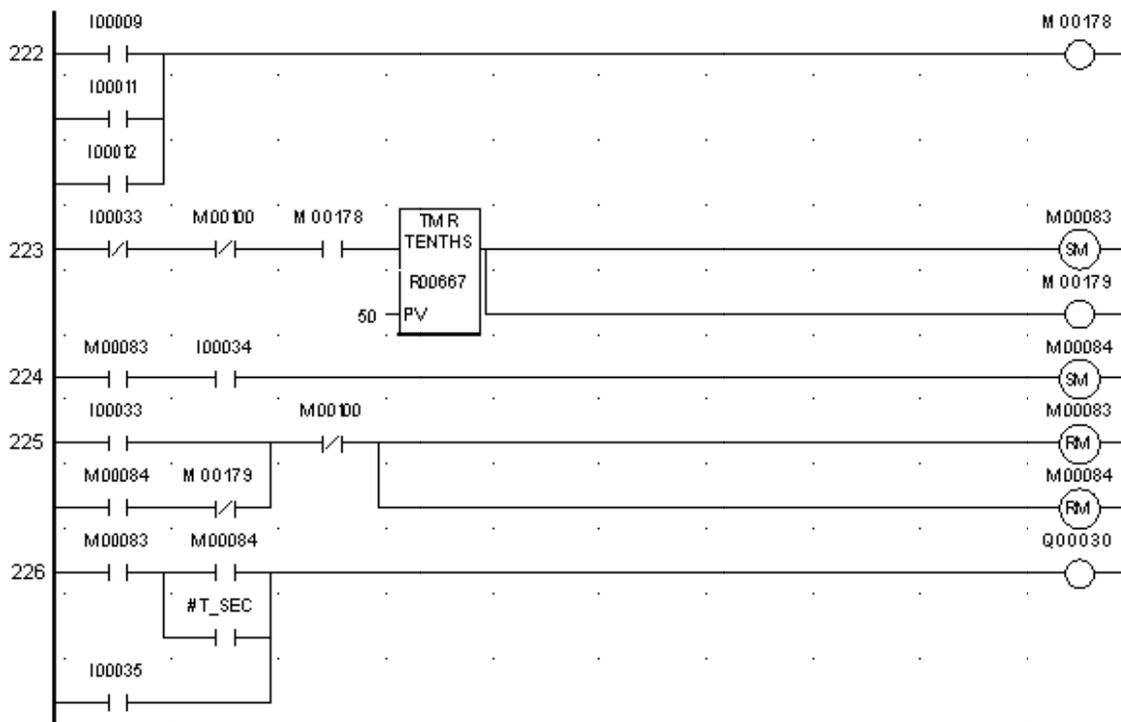
Tabla III. **Significado de las variables utilizadas en las figuras 7, 8 y 9**

| Variable | Significado |
|-----------------|--|
| I00009 | Bajo nivel de aceite de cojinetes de generador (entrada) |
| I00011 | Bajo flujo de aceite de cojinetes de generador (entrada) |
| I00012 | Disparo de bombas de cojinetes de generador (entrada) |
| I00014 | Reconocer alarma en PCG |
| I00015 | Prueba de lámpara en PCG |
| I00033 | Botón de reset en LCP |
| M00077 | Detección de bajo nivel de aceite de cojinetes de generador |
| M00078 | Alarma de bajo nivel de aceite de cojinetes de generador reconocida |
| M00079 | Detección de bajo flujo de aceite de cojinetes de generador |
| M00080 | Alarma de bajo flujo de aceite de cojinetes de generador reconocida |
| M00081 | Detección de disparo de bombas de cojinetes de generador |
| M00082 | Alarma de disparo de bombas de aceite de cojinete de generador reconocida |
| M00083 | Detección de resumen de alarmas de cojinetes de generador |
| M00083 | Resumen de alarmas de cojinetes de generador, reconocida |
| M00100 | Resumen de disparos del motor generador |
| M00175 | Bajo nivel de aceite de cojinetes de generador |
| M00176 | Bajo flujo de aceite de cojinetes de generador |
| M00177 | Disparo de bombas de cojinetes de generador |
| Q00027 | Luz indicadora de alarma de bajo nivel de aceite de cojinetes de generador |
| Q00028 | Luz indicadora de alarma de bajo flujo de aceite de cojinetes de generador |
| Q00029 | Luz indicadora de alarma de disparo de bombas de aceite de cojinetes |
| #T_SEC | Variable interna (intermitente ½ segundo <i>ON</i> y ½ segundo <i>OFF</i>) |
| R00657 | Temporizador de retardo (5seg.) para evitar accionamiento por señales cortas |
| R00660 | Temporizador de retardo (5seg.) para evitar accionamiento por señales cortas |
| R00663 | Temporizador de retardo (5seg.) para evitar accionamiento por señales cortas |
| M00124 | Resumen de alarmas # 3 de LCP |
| M00127 | Resumen de alarmas de LCP |
| M00133 | Resumen sirena y faro de emergencia # 5 |
| Q00022 | Relevador de sirena y faro de emergencia |

Fuente: elaboración propia.

Las alarmas descritas en las figuras 7, 8 y 9 se anuncian en el panel de control de bombas de cojinetes de generador –PCG–; sin embargo, debe existir un resumen de estas tres alarmas, al que se le llamará “falla de lubricación de cojinetes de generador” que se anuncie en el panel de control local, para que el operador tenga la facilidad de identificarla, ya que es a este panel donde acude cuando se cae una alarma. Para eso se incluirá en el programa de PLC el diagrama de escalera que se muestra en la figura 10.

Figura 10. **Diagrama de escalera para el resumen de alarmas de cojinetes de generador (falla de lubricación de cojinetes de generador)**

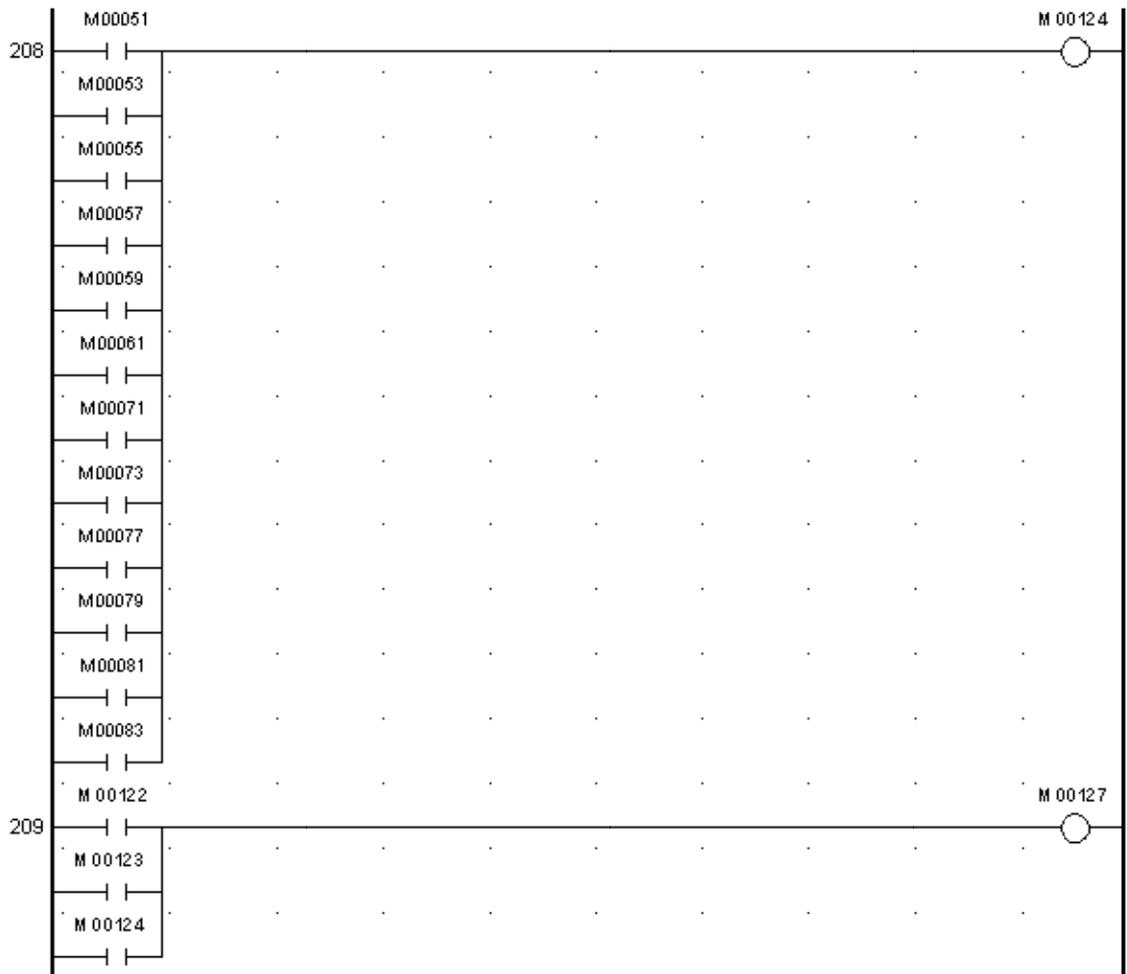


Fuente: elaboración propia.

La variable M00178 en la figura 10 es activada cuando cualquiera de las tres alarmas del PCG está activa; luego se sigue la misma lógica que en las figuras 7, 8 y 9.

Además es necesario incluir esta alarma a un resumen de alarmas de panel de control local –LCP– como se muestra en la figura 11, en la que solo se han agregado los contactos normalmente abiertos M00077, M00079, M00081 y M00083, que activan la marca M00124, que a la vez activa la M00127 la cual es el resumen antes mencionado.

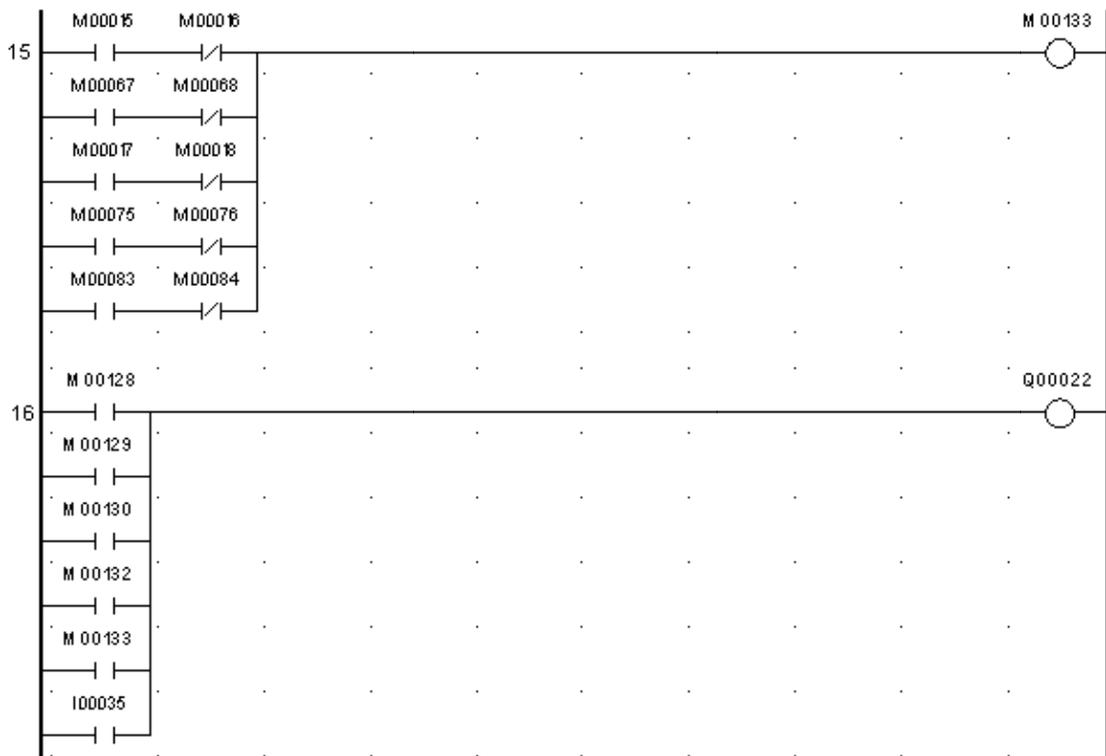
Figura 11. **Diagrama de escalera para el resumen de alarmas de panel de control local**



Fuente: elaboración propia.

Para concluir la lógica del programa y poderlo integrar al programa original, es necesario activar la sirena y faro de emergencia mediante la salida Q00022, que es la que activa el relevador correspondiente; esto se logra simplemente agregándole a la línea 15 del bloque “*remote*” un contacto abierto M00083 (alarma detectada) en serie, con un contacto cerrado M00084 (alarma reconocida) como se muestra en la figura 12; de modo que M00133 se active cuando se detecte la alarma y solo durante el tiempo que no haya sido reconocida, que son las condiciones para que se active la sirena y el faro de emergencia.

Figura 12. **Diagrama de escalera para la sirena anunciadora de alarmas**



Fuente: elaboración propia.

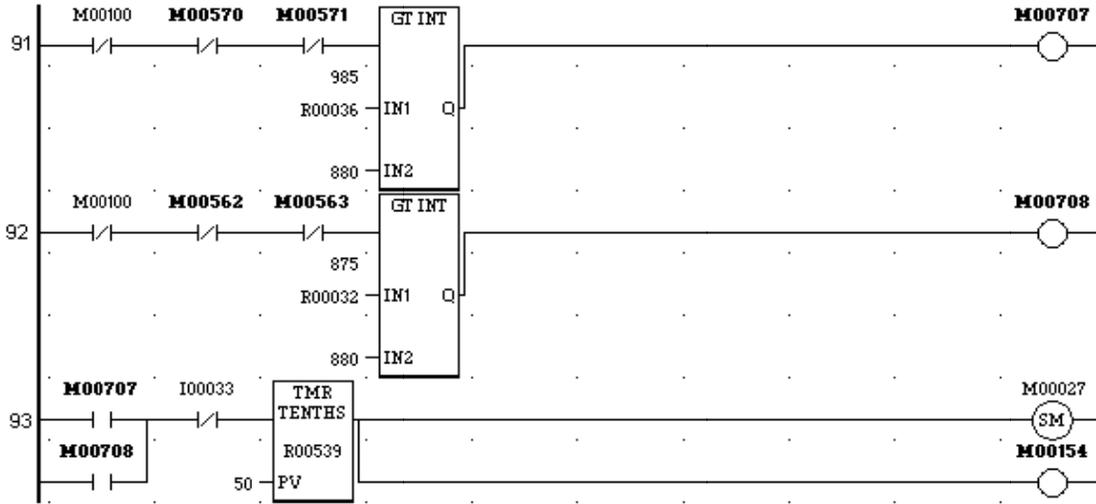
2.2.3. Modificación de los puntos de alarma y disparo por alta temperatura de cojinetes de generador

En el programa de PLC del panel de control local existe una protección contra alta temperatura de cojinetes de generador que consiste en un punto de alarma que avisa al operador de la condición anormal y un punto que dispara la unidad motor-generador. Actualmente, los puntos de alarma y disparo están muy por encima de los valores de operación, al extremo que cuando la temperatura llega a dichos valores; el cojinete ha pasado mucho tiempo sin circulación de aceite o incluso sin aceite cuando existe algún tipo de fuga. Esto se soluciona bajando dichos puntos a valores más cercanos a los de operación.

Las temperaturas de cojinetes de generador se sensan mediante RTD (resistencia dependiente de temperatura) y a través de módulos de entradas de RTD en el PLC. La alarma de alta temperatura de cojinetes de generador actualmente está fijada a 95°C; sin embargo, los valores normales de operación oscilan entre 80 y 86°C y cuando supera este valor es señal de que algo anda mal en la lubricación de los cojinetes, por lo que se propone fijar la alarma a 88°C y el disparo del motor-generador a 95°C, que actualmente está a 105°C.

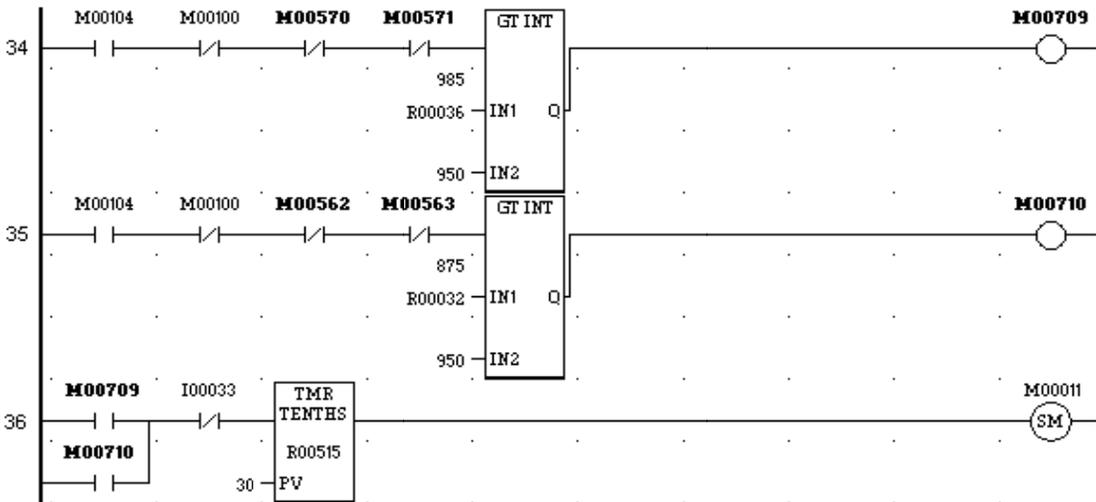
Los diagramas de escalera deben quedar como los de las figuras 13 y 14, respectivamente. En estos diagramas existe un comparador para cada cojinete que da una señal de salida "Q" cuando el valor almacenado en "IN1" es mayor que el de "IN2". En este caso "IN1" es el registro que corresponde al valor actual de temperatura de cojinete de generador y en "IN2" se escribe la constante que corresponde al valor de alarma o disparo, según sea el caso, en décimas de grado centígrado. También se puede notar que existe un temporizador antes de activar la alarma con el objetivo de evitar que esta se active por señales de corta duración.

Figura 13. **Modificación del punto de alarma de alta temperatura de cojinetes de generador**



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Modificación del punto de disparo por alta temperatura de cojinetes de generador**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla IV se muestra el significado de las variables utilizadas en las figuras 13 y 14, con negrita aparecen las nuevas variables utilizadas.

Tabla IV. **Significado de las variables utilizadas en la figuras 13 y 14**

| Variable | Significado |
|-----------------|--|
| I00033 | Botón de Reset de LCP |
| M00011 | Disparo de alta temperatura de cojinetes de generador detectado |
| M00027 | Alarma de alta temperatura de cojinetes de generador detectada |
| M00154 | Alarma de alta temperatura de cojinetes de generador |
| M00100 | Sumario de disparos |
| M00104 | Motor operando |
| M00562 | Fallo de sensor de temperatura de cojinete trasero, baja señal |
| M00563 | Fallo de sensor de temperatura de cojinete trasero, alta señal |
| M00570 | Fallo de sensor de temperatura de cojinete delantero, baja señal |
| M00571 | Fallo de sensor de temperatura de cojinete delantero, alta señal |
| M00707 | Alarma cojinete de generador frontal |
| M00708 | Alarma cojinete de generador trasero |
| M00709 | Disparo cojinete de generador frontal |
| M00710 | Disparo cojinete de generador trasero |
| R00032 | Registro de temperatura de cojinete trasero |
| R00036 | Registro de temperatura de cojinete frontal |

Fuente: elaboración propia.

En el apéndice 2 se resume el material necesario para la implementación de la propuesta hecha en este capítulo.

3. DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE NIVEL DE LOS TANQUES DE CONDENSADO

En el sistema de condensado y agua de alimentación de calderas se tiene una deficiencia en la capacidad para recuperar el condensado, en el presente capítulo, se estudia y propone una solución, para su óptima operación.

3.1. Antecedentes

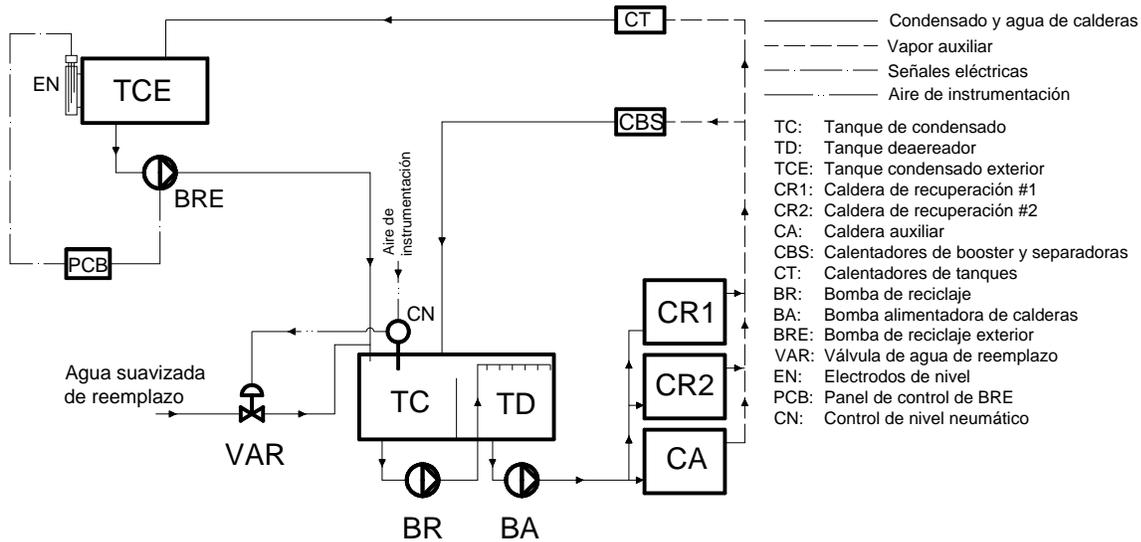
Debido a que el tanque de condensado exterior que sirve para recolectar el que viene de los calentadores del área de tanques, no está en coordinación con el tanque de condensado principal. El primero transfiere su contenido en momento de llegar a cierto nivel, sin importar el nivel del tanque de destino (tanque principal), provocando vertimientos y el consecuente desperdicio de condensado que se traduce en un alto consumo de agua suavizada de reemplazo.

A esto se le suma la incapacidad del sistema de control neumático, para reemplazar con agua suavizada al tanque de condensado principal.

3.2. Diseño actual

En la figura 15 se muestra el diagrama de flujo de proceso del sistema de condensado y agua de alimentación de calderas que actualmente existe en la planta; en él se puede observar el circuito cerrado vapor-condensado y una válvula de agua suavizada para reemplazar el agua que se pierde en purgas, válvulas de alivio y fugas.

Figura 15. **Diseño actual de sistema de condensado y agua de alimentación de calderas**



Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior puede observarse que el retorno de condensado proviene de dos tipos de consumidores de vapor diferentes, recuperándose por medio de trampas de vapor mecánicas: el primero corresponde a los calentadores de los módulos *booster* y separadoras (CBS), cuyo flujo se dirige directamente hacia el tanque de condensado principal (TC) para ser reciclado y bombeado nuevamente hacia las calderas.

El segundo consumidor se refiere a los calentadores del área de tanques cuyo flujo se dirige a un tanque receptor de condensado exterior (TCE) que luego es bombeado mediante BRE al tanque de condensado principal cuando recibe la orden de un juego de electrodos, el cual indica la existencia de condensado en dicho tanque. Sin embargo, no existe ningún tipo de comunicación con el tanque de destino para coordinar arranques y paros de la bomba acorde al nivel de este.

También se muestra el sistema de agua de reemplazo para el tanque de condensado principal que consiste en una válvula de agua de reemplazo (VAR) gobernada por aire de instrumentación (3 a 15 psi) a través de un controlador neumático (CN) marca Magnetrol, que sensa el nivel por medio de un desplazador que utiliza el principio de Arquímedes de flotación de los cuerpos.

3.2.1. Ventajas

Algunas de las ventajas que se pueden rescatar son la simplicidad y sencillez del diseño.

3.2.2. Desventajas

A continuación se mencionan algunas desventajas del diseño actual:

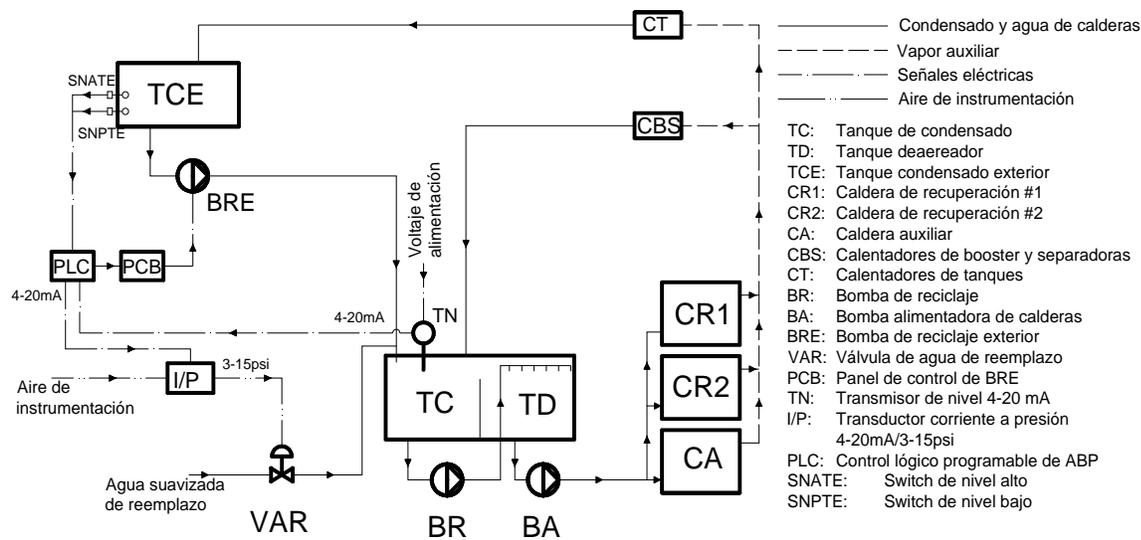
- Desperdicio del retorno de condensado
- Alto consumo de agua suavizada
- Alto consumo de químicos
- Mal funcionamiento del juego de electrodos que controla BRE, debido a la baja conductividad del condensado.
- Continuas alarmas de alto nivel en tanque de condensado/desaerador
- El operador no le presta la atención adecuada a un resumen de alarmas en tanque condensado/desaerador, pensando que es alto nivel por la alta recurrencia, cuando podría ser un bajo nivel.

- Acumulación de humedad y lodo en el área de tanques, debido al constante vertimiento del tanque.
- Acumulación de humedad y vapores en el área de tanque condensado/desaereador.
- El controlador de nivel neumático está obsoleto y existe dificultad para encontrar repuestos.

3.3. Diseño propuesto

El diagrama de flujo de proceso del diseño que se propone, se muestra en la figura 16, el cual difiere del de la figura 15 únicamente en el sistema de control de nivel de los tanques de condensado.

Figura 16. Diagrama de flujo de proceso del diseño propuesto



Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior se puede notar que el tanque de condensado principal tiene tres entradas de agua: la primera es el agua suavizada de reemplazo; la segunda fuente es el condensado que es trasegado mediante BRE desde el tanque de condensado exterior; y, por último, el constante flujo de condensado proveniente de los calentadores de los módulos *booster* y separadoras (CBS).

A diferencia de la tercera fuente de llenado, las primeras dos se pueden controlar eléctricamente y es de lo que se tratará en el resto del capítulo.

La idea general de la propuesta consiste en reemplazar el controlador de nivel neumático existente del tanque condensado/desaerador por uno electrónico, el cual debe estar integrado por un transmisor de nivel que envíe una señal de 4 a 20 mA hacia el PLC y un transductor corriente a presión (IP) que recibe 4 a 20 mA desde el PLC, con base en un control PID previamente programado, luego el IP envía una señal neumática de 3 a 15 psi a la válvula reguladora de agua de reemplazo, la cual alimenta agua suavizada a dicho tanque para reponer las pérdidas surgidas en el circuito vapor condensado.

Paralelamente a esto, se encuentra el control de la bomba de reciclaje exterior que es la que se encarga de trasegar el condensado recolectado en el tanque exterior hacia el tanque condensado principal; para esto se deben instalar adecuadamente dos *switch* de nivel que definan los puntos a los que la bomba (BRE) va a iniciar y parar el trasiego de condensado.

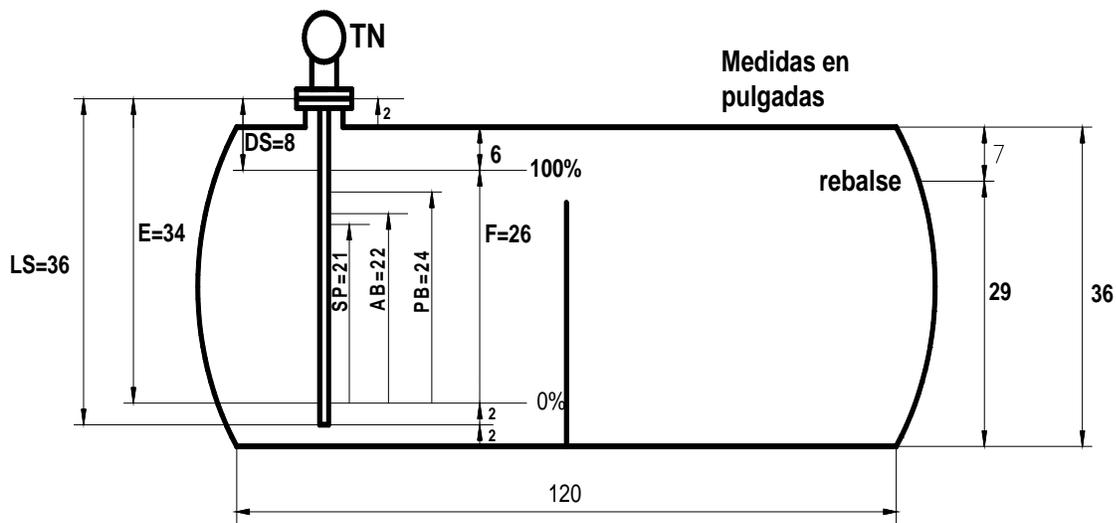
La señal de estos *switch* de nivel será enviada hacia el PLC y en conjunto, con la señal de nivel del tanque de destino será procesada para dar una señal hacia el contactor que acciona la bomba de reciclaje exterior.

3.3.1. Definición de niveles en tanques de condensado

A continuación se procederá a definir los niveles en el tanque principal a los que la bomba de reciclaje exterior debe arrancar y parar, así como varios puntos necesarios en la programación del transmisor de nivel y del PLC, los cuales se resumen en la figura 17.

Posteriormente, se definirán los niveles de arranque y paro en el tanque exterior.

Figura 17. Definición de niveles en tanque de condensado principal



| | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| LS: Longitud de la sonda | SP: Set point de válvula reguladora |
| E: Distancia al cero | PB: Paro de bomba (BRE) |
| DS: Distancia al span | AB: Arranque de bomba (BRE) |
| F: Span | TN: Transmisor de nivel |

Fuente: elaboración propia.

3.3.1.1. Longitud de la sonda

Se pretende utilizar un transmisor de nivel tipo radar de onda guiada, ya que según un resumen de cotizaciones y características que se presenta en el apéndice 3, resulta ser este el más adecuado para lo que se pretende.

Este tipo de transmisor emite una señal que viaja casi a la velocidad de la luz a través de la sonda y mide el tiempo que tarda en regresar después de rebotar en la superficie del producto medido; luego con un simple cálculo aritmético y las dimensiones del recipiente, se puede conocer el nivel del producto, en este caso el condensado.

Este tipo de transmisor tiene la ventaja de no ser afectado por las turbulencias, ni por la conductividad del líquido que se va a medir.

El tanque principal es un cilindro horizontal de 36 pulgadas de diámetro (altura) por 120 pulgadas de longitud; luego, tomando en cuenta la altura de 2 pulgadas de la brida, donde se instalará el transmisor, se consideran 36 pulgadas de longitud adecuada para la sonda; con esto, la parte inferior de la sonda queda a 2 pulgadas del fondo del tanque.

3.3.1.2. Distancia al cero

Tomando en cuenta que el rango de operación normal del tanque se encuentra entre 6 y 29 pulgadas, se definirá la distancia desde la brida al cero (0%) o nivel de vacío (E) a 34 pulgadas.

3.3.1.3. Nivel de rebalse

El nivel de rebalse del tanque está definido por una válvula de control de presión que se abre cuando el nivel de condensado está 7 pulgadas por debajo de la parte superior del tanque

3.3.1.4. Nivel de escala completa

Se considera una holgura de 1 pulgada arriba del nivel de rebalse, por lo que el nivel de escala completa debe ser de 26 pulgadas. Medido desde el fondo del tanque sería de 32 pulgadas, pero se aplica F ya que son los parámetros utilizados en la programación del transmisor.

3.3.1.5. Paro de la bomba

Se considera que 1 pulgada abajo del nivel de rebalse, es una buena altura para que la bomba se detenga por alto nivel en el tanque de condensado principal, por lo que el nivel medido desde el 0% es de 24 pulgadas.

3.3.1.6. Arranque de la bomba

Se establecen 2 pulgadas de diferencial entre el arranque y paro de la bomba, la altura medida desde el 0% sería de 22 pulgadas.

El objetivo de dejar cierto rango de espacio entre el arranque y el paro de la bomba, es evitar arranques y paros demasiado frecuentes, ya que debido a la turbulencia del agua, el *switch* de nivel se estaría abriendo y cerrando constantemente.

3.3.1.7. Set point del control de la válvula reguladora

Debe recordarse que de las tres entradas de agua que tiene el tanque, dos se pueden controlar; una mediante la bomba de reciclaje exterior y la otra con la válvula reguladora; sin embargo, lo que se pretende es darle prioridad al condensado recolectado en el tanque exterior, es decir, el control de la bomba. Por esta razón el *set point* debe quedar por debajo de los puntos de operación de la bomba.

Se definirá el *set point* 3 pulgadas por debajo del nivel de paro de la bomba, es decir 21 pulgadas por encima del nivel 0%, o lo que es lo mismo 27 pulgadas desde el fondo del tanque.

3.3.1.8. Niveles de operación de la bomba en tanque exterior

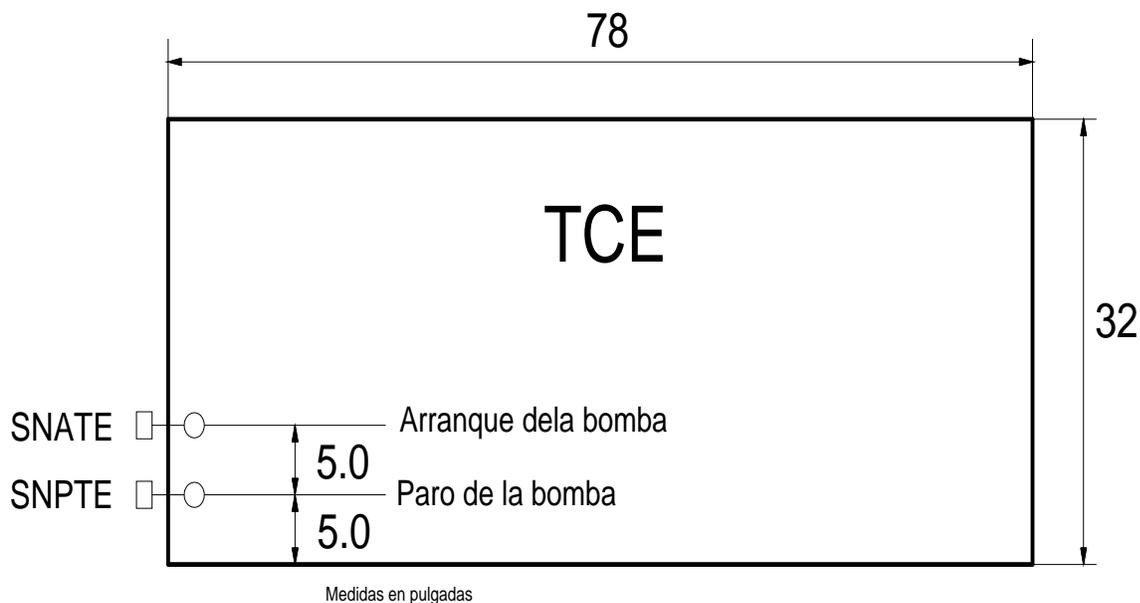
Mediante cálculos adecuados se determinó que el volumen de condensado en el tanque principal entre el *set point* y el nivel de paro de la bomba es aproximadamente 50 galones; entonces el volumen de condensado a trasegarse desde el tanque exterior debe ser menor o igual a este valor.

Se debe notar que en condiciones normales de operación la cantidad de condensado que retorna al tanque principal es menor que la que sale de él, ya que en el circuito vapor-agua condensada existen pérdidas por fugas, purgas y desfuegos. Con esto se deduce que serán los *switch* de nivel del tanque exterior los que regularmente definan la operación de la bomba y no los niveles PB y AB del tanque principal, ya que el volumen recolectado entre los *switch* SNATE y SNPTE, no bastará para llevar el nivel a PB en el tanque principal.

En la figura 18 se muestran los niveles de arranque y paro de la bomba en el tanque exterior. Se definió el nivel mínimo a 5 pulgadas desde el fondo del tanque. Iterando un poco con el cálculo se obtiene que un diferencial de 5 pulgadas equivale aproximadamente a 45 galones que cumple con el requisito de no llegar al nivel máximo del tanque principal.

Si en dado caso se acumulara suficiente condensado en el tanque exterior, por ejemplo, a causa de un mantenimiento de la bomba, entonces serían los niveles PB y AB gobernados por el transmisor de nivel a través del PLC, los que definan la operación de la bomba.

Figura 18. **Definición de los niveles de arranque y paro de la bomba de reciclaje exterior**

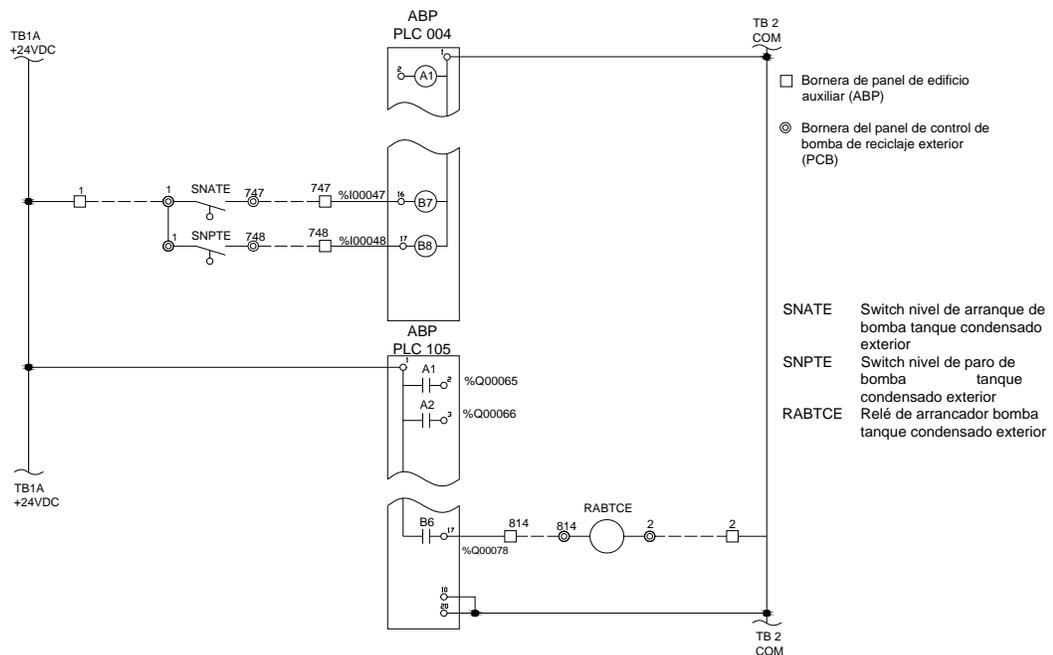


Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Diagramas de alambrado hacia el control lógico programable

En la figura 19 se muestra el diagrama de entradas y salidas digitales propuesto para el control de nivel que se está estudiando. Como puede observarse, el diagrama se refiere al panel del edificio auxiliar (ABP) ya que es el más próximo y el que pertenece a los equipos auxiliares de la planta. Se tomaron en cuenta las entradas y salidas que están de reserva, de manera que no es necesario comprar ningún módulo de entradas ni de salidas digitales. La numeración de las borneras se ha hecho correlativamente con base en la última bornera numerada en los planos originales. Se ha introducido una nueva simbología para la bornera del panel de control de bomba de reciclaje exterior, ya que este panel no existe en los planos originales.

Figura 19. Diagrama de entradas y salidas digitales de PLC para el control de nivel del tanque de condensado.

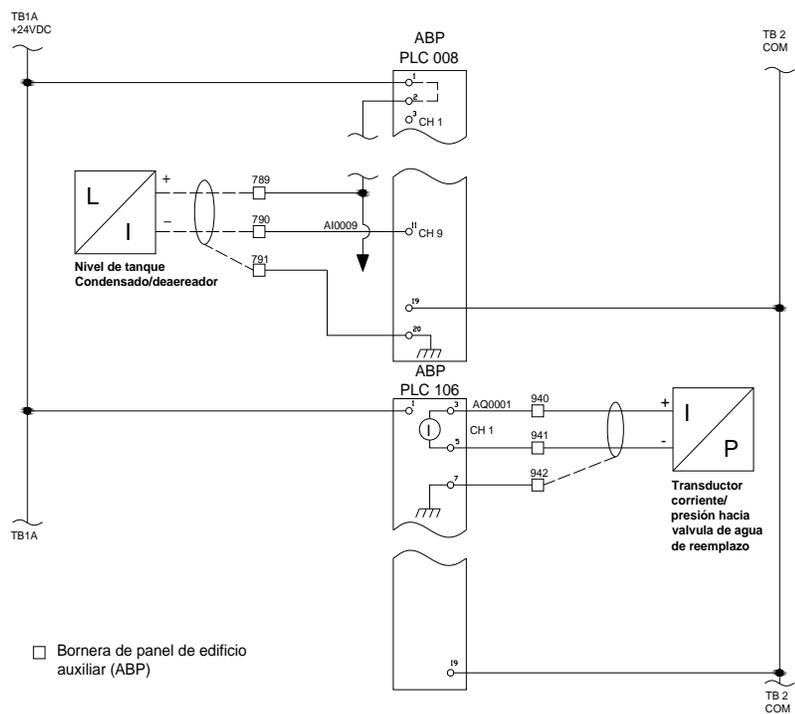


Fuente: elaboración propia.

De igual forma en el figura 20 se muestra cómo deben quedar alambradas las entradas y salidas analógicas hacia el PLC del panel del edificio auxiliar (ABP). Para el caso de la entrada analógica se ha tomado el primer canal disponible en el PLC 008, es decir; el canal 9. Sin embargo, en el panel del edificio auxiliar no cuenta con módulos de salidas analógicas, por lo que es necesario agregar uno en el *slot* # 06 del *rack* # 1 tal y como lo sugiere la nomenclatura PLC 106, que identifica este módulo en la mencionada figura.

El modelo de la tarjeta de salidas digitales debe ser IC693ALG391, la cual tiene un voltaje de alimentación de 24 VDC y cuenta con cinco canales de salidas; sin embargo, en la figura solamente se muestra que se va a usar y luego se representa mediante un corte.

Figura 20. **Diagrama de entradas y salidas analógicas de PLC para el control de nivel del tanque de condensado**



Fuente: elaboración propia.

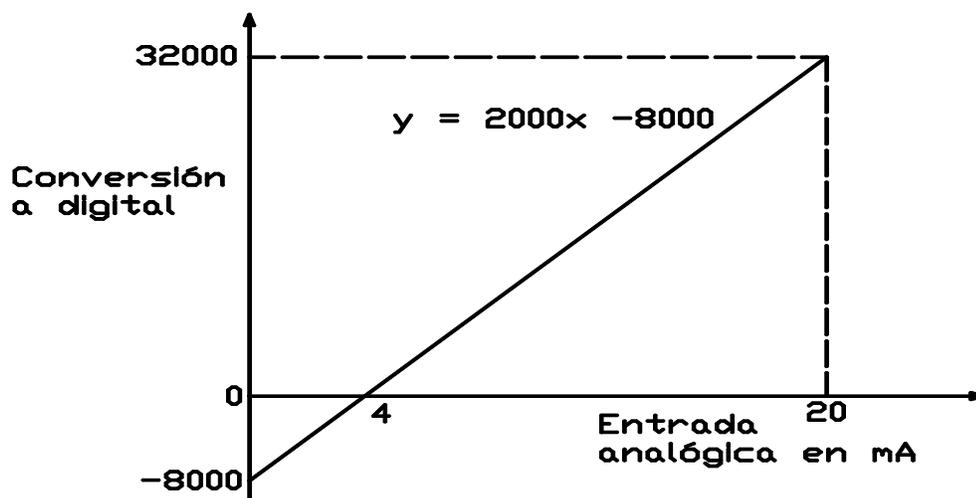
3.3.3. Diagramas lógicos para el programa del control lógico programable

Al igual que todos los diagramas lógicos de PLC presentados en este trabajo, los siguientes diagramas fueron diseñados y elaborados en el *software* de programación Proficy Machine Edition^R V5.70 de GE Fanuc^R. Todos los diagramas presentados en este capítulo pertenecen al PLC panel del edificio auxiliar, bloque principal (*MAIN*).

3.3.3.1. Medición del nivel del tanque de condensado principal

La señal analógica de 4 a 20 mA que entra al PLC, se convierte en una señal digital de 0 a 32 000, donde 4 mA equivale a 0 y 20 mA a 32 000. De igual forma, para valores inferiores a 4 mA se comportan linealmente, es decir, 0 mA equivale a -8000. En la gráfica de la figura 21 se resume dicho comportamiento.

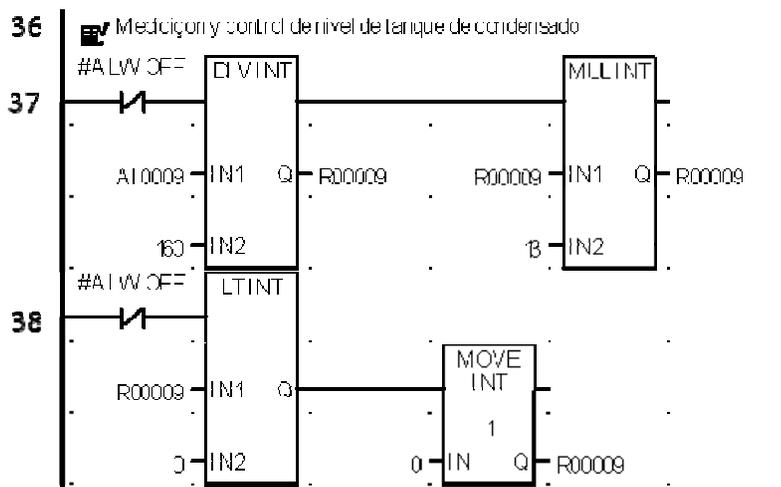
Figura 21. Gráfica del comportamiento de la conversión a digital de la entrada de 4 a 20 mA



Fuente: elaboración propia.

Como se definió en el apartado 3.3.1.4, el nivel de escala completa es de 26 pulgadas, por lo tanto, 20 mA equivale a 26 pulgadas, o bien 2600 centésimas de pulgada, para darle más exactitud. De aquí se deduce que el factor para convertir la señal a centésimas de pulgada es $2600/32\ 000 = 13/160$, tal y como aparece la multiplicación por 13 y división por 160, de la línea 37, del diagrama de la figura 22.

Figura 22. **Diagrama de PLC para la medición del nivel de tanque de condensado**



Fuente: elaboración propia.

En la línea 36 del diagrama de la figura anterior, se insertó un texto para indicar el inicio del programa que se está estudiando en este capítulo.

En la línea 38, simplemente se mueve a cero cualquier dato que sea negativo. En la tabla V se muestra el significado de cada variable utilizada en la figura 22.

Tabla V. **Significado de las nuevas variables utilizadas en la figura 22**

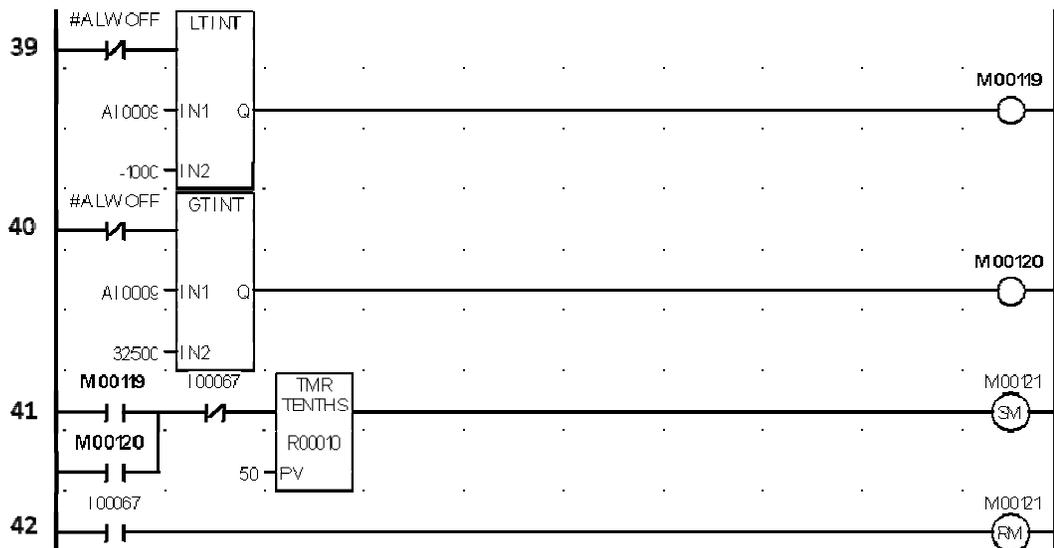
| Variable | Significado |
|----------|--|
| #ALW OFF | Variable interna siempre permanece en su estado normal |
| AI0009 | Entrada analógica: nivel de tanque de condensado |
| R00009 | Nivel de tanque de condensado en centésimas de pulgada |

Fuente: elaboración propia.

3.3.3.2. Fallo de sensor de nivel

Se definirá como fallo de sensor cuando el PLC sensa una corriente menor que 3,5 mA o mayor que 20,25. Por lo tanto, se procederá a insertar dos comparadores de números enteros, uno para el miliamperaje bajo y el otro para el alto, tal y como se muestra en el diagrama de la figura 23.

Figura 23. **Diagrama de escalera para detectar el fallo de sensor**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Significado de las variables utilizadas en el diagrama de la figura 23 (se muestra con negrita las nuevas variables utilizadas)**

| Variable | Significado |
|-----------------|---|
| #ALW OFF | Variable interna siempre permanece en su estado normal |
| AI0009 | Entrada analógica: nivel de tanque de condensado |
| I00067 | Entrada: Botón de restablecimiento del sistema |
| M00119 | Fallo de sensor de nivel de TC, entrada menor que 3,5 mA |
| M00120 | Fallo de sensor de nivel de TC, entrada mayor que 20,25 mA |
| M00121 | Fallo de sensor de nivel común de TC |
| LT INT | Comparador de números enteros, menor que |
| GT INT | Comparador de números enteros, mayor que |

Fuente: elaboración propia.

Los comparadores del diagrama de la figura anterior activan respectivamente sus marcas, cuyos contactos en la línea 41 también lo hacen a través de un temporizador de 50 décimas de segundo la marca M00121, que da la alarma de fallo de sensor de nivel de tanque de condensado y se usará en el siguiente apartado para anunciar la correspondiente alarma.

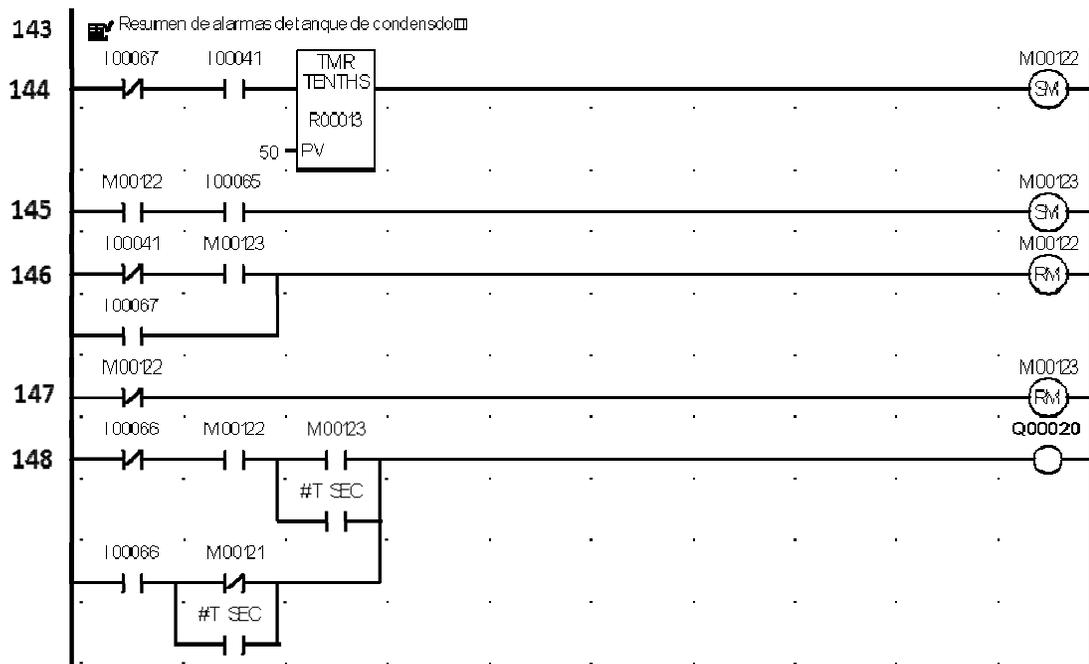
3.3.3.3. Resumen de alarmas en tanque de condensado principal

El resumen de alarmas está compuesto por alto o bajo nivel en el tanque de condensado principal; con cualquiera de estas dos condiciones anormales que se dé, se deberá activar el resumen de alarmas a través de una lámpara debidamente identificada en el anunciador de alarmas. Actualmente, el programa está diseñado para activar esta alarma únicamente en la consola auxiliar del cuarto de control. Se utilizará la misma entrada digital para anunciar la alarma en el panel del edificio auxiliar.

En la figura 24 se muestra cómo debe quedar el diagrama de escalera. La entrada I00041 que detecta la condición anormal, activa la marca M00122 a través de un temporizador para descartar señales de corta duración.

Luego, en la línea 145, la alarma detectada en conjunción con la señal de reconocimiento de alarma, activa la marca M00123 (alarma reconocida) que se utiliza en la línea 148, para que la lámpara anunciadora (Q00020) deje de destellar y se quede encendida fijamente hasta que la alarma desaparezca cuando le llega una señal de restablecimiento a la marca M00122.

Figura 24. **Diagrama de escalera para el resumen de alarmas de tanque de condensado**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Significado de las variables utilizadas en la figura 24 (se muestra con negrita las nuevas variables utilizadas)**

| Variable | Significado |
|--|--|
| I00041 | Resumen de alarmas en TC y TD |
| I00065 | Reconocimiento de alarmas en ABP |
| I00066 | Prueba de lámparas |
| I00067 | Restablecimiento del sistema |
| M00122 | Resumen de alarmas en TC y TD (detectado) |
| M00123 | Resumen de alarmas en TC y TD (reconocido) |
| Q00020 | Lámpara de resumen de alarmas de TC y TD |
| #T SEC | Contacto temporizador, oscila ON, OFF con un periodo de 1 segundo. |
| R00013 | Temporizador en décimas de segundo, fijado a 50 |
| TC= Tanque de condensado, TD= Tanque desaereador | |

Fuente: elaboración propia.

En la línea 148 de la figura anterior, también se muestra lo que sucede al realizar prueba de lámpara a través de I00066; la lámpara anunciadora (Q00020) queda destellando si existe un fallo de sensor (M00121) y queda encendida fijamente si este no existe, ya que es el procedimiento para saber si existe fallo de sensor.

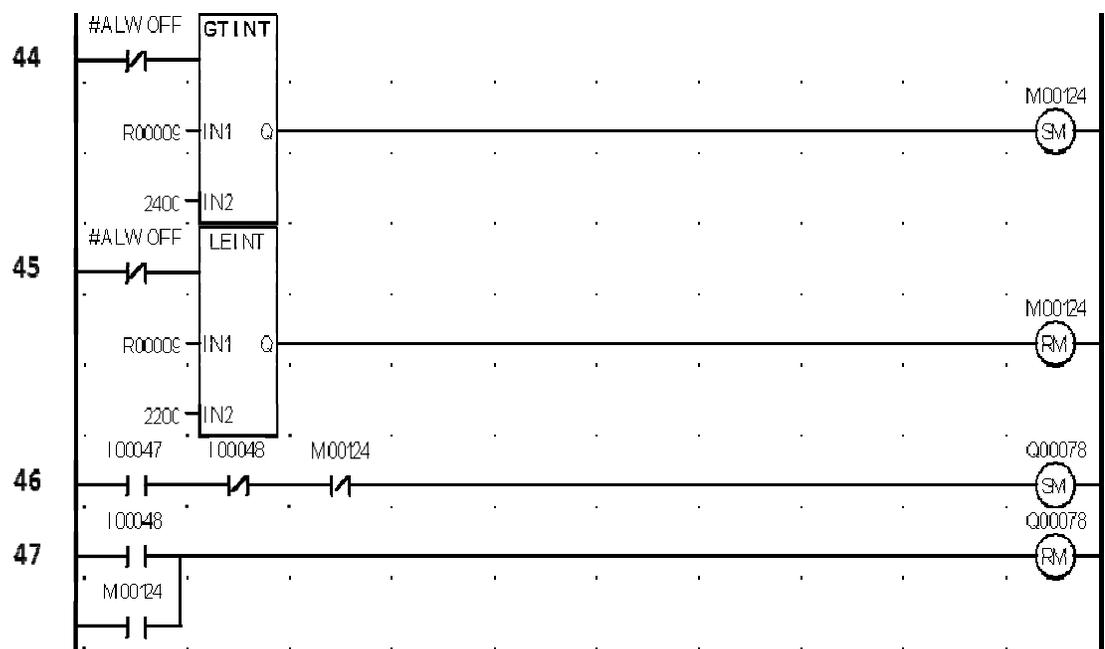
3.3.3.4. Control de la bomba de reciclaje exterior

Para el control de la bomba exterior se tienen dos puntos de operación en el tanque exterior y dos en el tanque principal. Tal y como se vio en la sección 3.3.1, en el tanque exterior los niveles de arranque y paro son de 10 y 5 pulgadas respectivamente y serán los *switch* de nivel los que gobiernen la operación de la bomba.

Por otro lado, en el tanque principal, el nivel de paro es de 24 pulgadas y el permiso para arrancar es de 22; sin embargo, en este caso será a través de la señal del transmisor de nivel que se gobierne la operación de la bomba.

De lo anterior se obtiene información para la lógica del programa de PLC que se muestra en la figura 25 y su correspondiente tabla de significados (tabla VIII).

Figura 25. **Diagrama de escalera para el control de la bomba de condensado exterior**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Significado de las nuevas variables utilizadas en la figura 25**

| Variable | Significado |
|----------------------------------|---|
| #ALW OFF | Variable interna siempre permanece en su estado normal |
| R00009 | Nivel de tanque de condensado en centésimas de pulgada |
| I00047 | Switch de nivel de arranque de BRE |
| I00048 | Switch de nivel de paro de BRE |
| M00124 | Paro de BRE por alto nivel en TC |
| 2400 | Nivel de paro de BRE por alto nivel en TC en centésimas de pulgada |
| 2200 | Nivel en TC que permite arrancar BRE después de un nivel alto en TC |
| Q00078 | Relevador de arranque de BRE |
| BRE= Bomba de reciclaje exterior | |

Fuente: elaboración propia.

En la línea 44 del diagrama de la figura 25 se define mediante un comparador el nivel de paro en el tanque principal, es decir, se le da una señal de “set” a la marca M00124 para que dé orden de paro a la bomba en la línea 47 y bloquee el arranque en la línea 46. En la línea 45 se da señal de “reset” a M00124 cuando el nivel baja de 22 pulgadas, es decir, que permite el arranque si existe nivel en el tanque de origen. En lo que respecta al tanque exterior, la señal de arranque la da el *switch* de nivel superior mediante la entrada I00047 en la línea 46 y el paro con el *switch* inferior, mediante I00048 en la línea 47.

3.3.3.5. Control PID del nivel del tanque de condensado principal

El control de la bomba que se estudió en la sección anterior tiene el objetivo de recuperar la mayor cantidad posible de agua condensada que se acumula en el tanque receptor del área de tanques (tanque de condensado exterior).

Sin embargo, para reemplazar las pérdidas de agua en el circuito vapor-condensado, se utilizará un sistema de control PID (proporcional, integral, derivativo) integrado en el programa de PLC.

El control proporcional integral derivativo (PID), es un algoritmo de propósito general usado para control de proceso de lazo cerrado.

El bloque de función PID utilizado en el *software* de programación, compara una variable de proceso (PV), con el valor de proceso deseado o *set point* (SP) y actualiza la variable de control (CV) de salida basado en un error, es decir, la diferencia entre SP y PV.

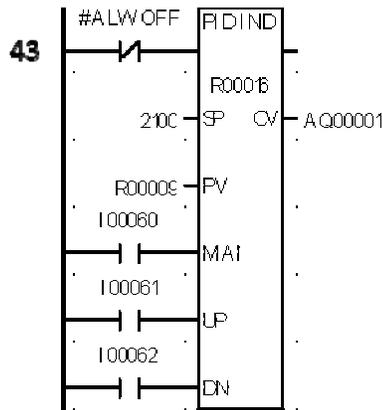
Para el caso que se está estudiando, la variable de proceso (PV) es la retroalimentación del nivel del tanque (R0009) que llega al PLC como una señal de 4 a 20 mA.

El *set point* (SP) en este caso en particular será una constante que según se estableció anteriormente, es de 21 pulgadas (2100 centésimas).

Finalmente, la variable de control (CV) es la salida de 4 a 20 mA que abre o cierra gradualmente la válvula controlada neumáticamente (VAR) a través de un transductor de corriente a presión (IP).

El programa de PLC se ilustra en la siguiente figura y su correspondiente tabla de significados es la número IX.

Figura 26. **Diagrama del programa de PLC para el control PID del nivel del tanque de condensado principal**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Significado de las nuevas variables utilizadas en la figura 26**

| Variable | Significado |
|----------|--|
| SP | Set point del lazo de control |
| PV | Variable de proceso del lazo de control |
| CV | Variable de control del lazo de control |
| MA | Cuando recibe señal, la función PID está en modo manual |
| UP | Cuando está en modo manual, CV incrementa una vez por cada barrido |
| DN | Cuando está en modo manual, CV disminuye una vez por cada barrido |
| #ALW OFF | Variable interna siempre permanece en su estado normal |
| AQ0001 | Salida analógica: variable de control hacia válvula reguladora |
| R00009 | Nivel de tanque de condensado en centésimas de pulgada |
| R00016 | Bloque de función PID |
| I00060 | Variable de control en control manual |
| I00061 | Incrementar CV cuando está en modo manual |
| I00062 | Disminuye CV cuando está en modo manual |
| 2100 | Set point (SP) en centésimas de pulgada |

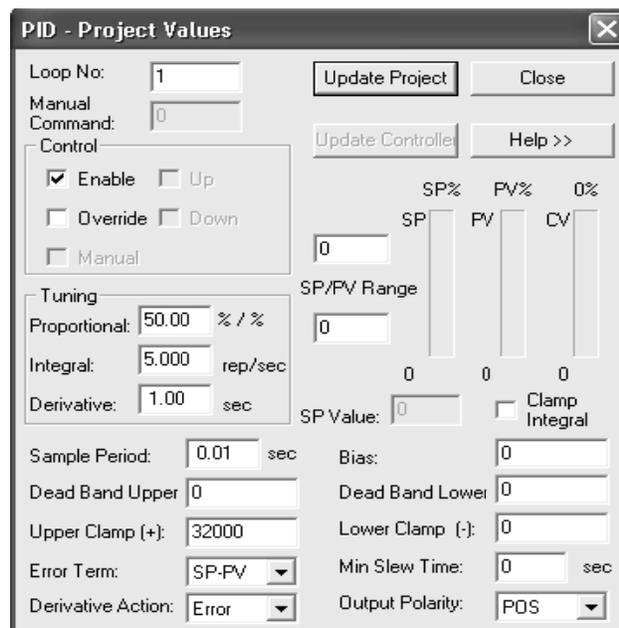
Fuente: elaboración propia.

3.3.3.5.1. Encontrando los valores de las constantes de control PID

Los parámetros del bloque de función PID son dependientes del proceso que se va a controlar; no hay valores predeterminados que se pueda asegurar que funcionarán adecuadamente; sin embargo, un procedimiento iterativo funciona para encontrar la ganancia de lazo aceptable para este proceso. A continuación se enumeran los pasos del procedimiento que se propone:

- Establecer todos los parámetros definidos por el usuario a cero, a continuación establecer los valores de la variable de control superior e inferior que se espera tener (“*upper clamp*” y “*lower clamp*”) en el cuadro de diálogo “*Tuning*”. En la figura 27 se ilustra este cuadro de diálogo.

Figura 27. Cuadro de diálogo “*Tuning*” para establecer los valores PID



Fuente: Ventana del software *Proficy Machine Edition*[®] V5.70 de GE Fanuc[®].

- Poner el bloque de función PID en modo manual y establecer el comando manual a valores diferentes para chequear si la variable de control (CV) puede ser movida desde la parte superior hasta la parte inferior (“*upper clamp*” y “*lower clamp*”). Luego, registrar un valor de la variable de proceso (PV) a un determinado punto CV y cargarlo al set point (SP).
- Establecer una pequeña ganancia en la constante proporcional (k_p), por ejemplo $100 \cdot CV \text{ máximo} / PV \text{ máximo}$, luego apagar el modo manual. Poner el *set point* en un valor del 2 al 10% del PV máximo y observar la respuesta del nivel del tanque (PV). Incrementar la constante proporcional (k_p) si el incremento del nivel (PV) es muy lento, o bien reducirla si el nivel rebasa el *set point* y oscila, sin alcanzar un valor estable.
- Una vez se ha encontrado el k_p , empezar a incrementar la constante integral (k_i) hasta obtener un valor que rebase el *set point* y se amortigüe en 2 o 3 oscilaciones. Esto puede requerir reducir k_p .
- Después de encontrar las constantes k_p y k_i adecuadas, intentar añadir la constante derivativa (k_d) para obtener una respuesta más rápida a los cambios de nivel, siempre y cuando no cause oscilaciones. A menudo k_d no es necesaria y no trabaja bien cuando existe ruido en la variable de proceso PV.
- Verificar las ganancias a diferentes puntos de operación SP y añadir banda muerta (“*dead band*”) si fuera necesario.

3.3.4. Ventajas

- Confiabilidad en el proceso
- Optimización en el retorno de condensado
- Reducción del sílice en el agua de alimentación de calderas debido a mayor retorno de condensado.
- La reducción de la pérdida de condensado contribuye a incrementar los ciclos de concentración.
- Menor consumo de agua suavizada
- Ahorro en el consumo de químicos
- A excepción de la válvula neumática, el sistema es libre de mantenimiento, debido a la carencia de partes móviles.
- Posibilidad de integrarlo al sistema de monitoreo *WOIS* de la planta

4. PROTECCIÓN DE CALDERAS DE RECUPERACIÓN POR BAJO NIVEL DE AGUA

Los accidentes por bajo nivel de agua en calderas son probablemente los más peligrosos, ya que pueden traducirse en fallas catastróficas con daños en infraestructura y muchas veces consecuencias fatales.

4.1. Antecedentes

Al operar una caldera en condiciones de bajo nivel de agua, las superficies de transferencia de calor ya no son refrigeradas y se sobrecalientan, produciéndose una pérdida en su resistencia mecánica y, por lo tanto, suelen deformarse, producto de la presión interna de la caldera.

Las calderas de recuperación de calor #1 y #2 descritas en la sección 1.2.3, aprovechan el calor de los gases de escape de los motores de combustión de las unidades # 3 y # 8, respectivamente. Actualmente, dichas calderas cuentan con un resumen de alarmas que se anuncia en la consola del cuarto de control. Este resumen puede ser alto o bajo nivel de agua que debe ser identificado y resuelto por el operador del edificio de generación.

Adicionalmente, a un punto más bajo que el nivel de alarma, debe existir una alarma de nivel de agua extremadamente bajo, que provoque el disparo de la unidad de generación correspondiente a la caldera de recuperación; es decir, caldera #1 dispara unidad #3 y caldera #2 dispara unidad #8.

Sin embargo, no existe tal coordinación ya que solamente se activa la alarma de nivel extremadamente bajo y no provoca el disparo de la unidad correspondiente, que es la fuente de calor de las calderas de recuperación.

4.2. Diseño actual

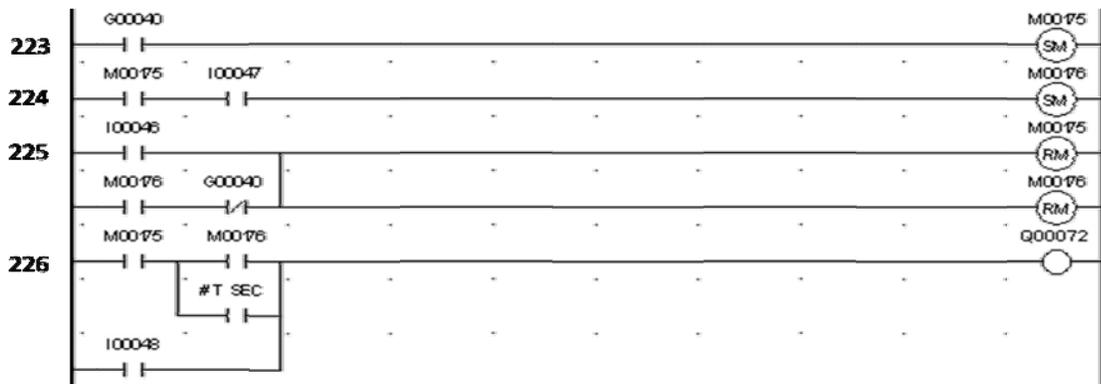
En las figuras 28 y 29, se muestran los diagramas de escalera del diseño actual. Como puede apreciarse, estos corresponden a una simple detección, reconocimiento y anuncio de alarma de nivel de agua extremadamente bajo en caldera #1. De forma análoga es el diagrama para la caldera #2.

Figura 28. **Diagrama de escalera de la detección de nivel extremadamente bajo en caldera #1, en el ABP**



Fuente: CATERPILLAR INC, Programa de PLC, *Project: CEE_ori, Target: ABP, Program block: genius, rung # 44.*

Figura 29. **Diagrama de escalera de detección, reconocimiento y anuncio de alarma de bajo nivel en caldera #1 en el AXP**



Fuente: CATERPILLAR INC, Programa de PLC, *Project: CEE_ori, Target: AXP, Program block: Main, rung # 223-226.*

Tabla X. **Significado de las variables utilizadas en las figuras 28 y 29**

| Variable | Significado |
|-----------------|---|
| I00044 | Nivel de agua extremadamente bajo en caldera de recuperación #1 (dato global) |
| I00046 | Reinicio del sistema |
| I00047 | Reconocimiento de alarma |
| I00048 | Prueba de lámparas |
| G00040 | Nivel de agua extremadamente bajo en caldera de recuperación #1 (dato global) |
| M00175 | Nivel de agua extremadamente bajo en caldera de recuperación #1 (detectado) |
| M00176 | Nivel de agua extremadamente bajo en caldera de recuperación #1 (reconocido) |
| Q00072 | Nivel de agua extremadamente bajo en caldera de recuperación #1 (lámpara) |
| # T sec | Contacto temporizador, oscila ON, OFF con un periodo de 1 segundo |

Fuente: elaboración propia.

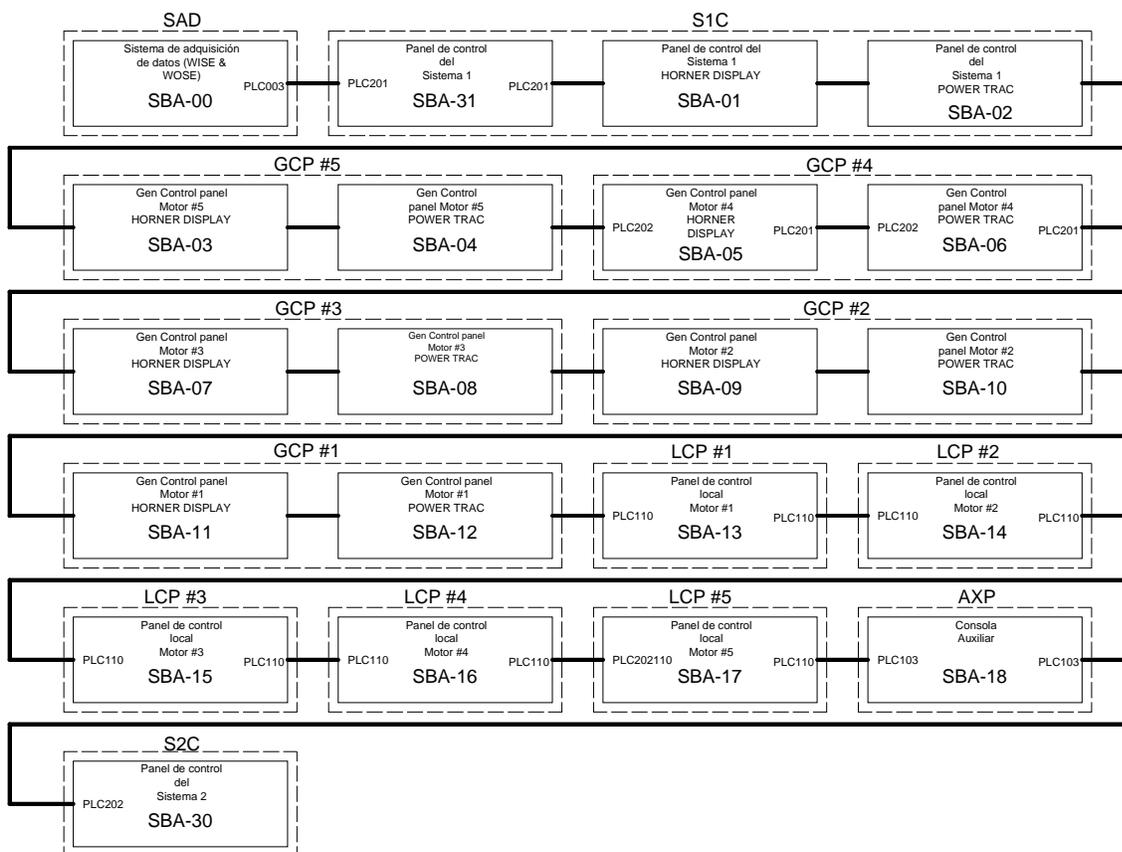
4.3. Diseño propuesto

Por las razones que se mencionaron al principio de este capítulo, es de suma importancia proteger las calderas por bajo nivel de agua, esto quiere decir, eliminar la fuente de calor de las calderas, o lo que es lo mismo, disparar el motor de combustión correspondiente cuando las calderas operan en estas condiciones. Para hacer esto se necesita llevar las señales discretas que dan la alarma de extremadamente bajo nivel, hasta los correspondientes paneles de control local (LCP3 y LCP8). Dichas señales son recibidas en el PLC del panel del edificio auxiliar (ABP). Este proceso se llevará a cabo a través de datos globales (%G) utilizados en la red *Genius* que comunica a los PLCs del sistema de control general de la planta.

4.3.1. Red *Genius* del sistema de control de la planta

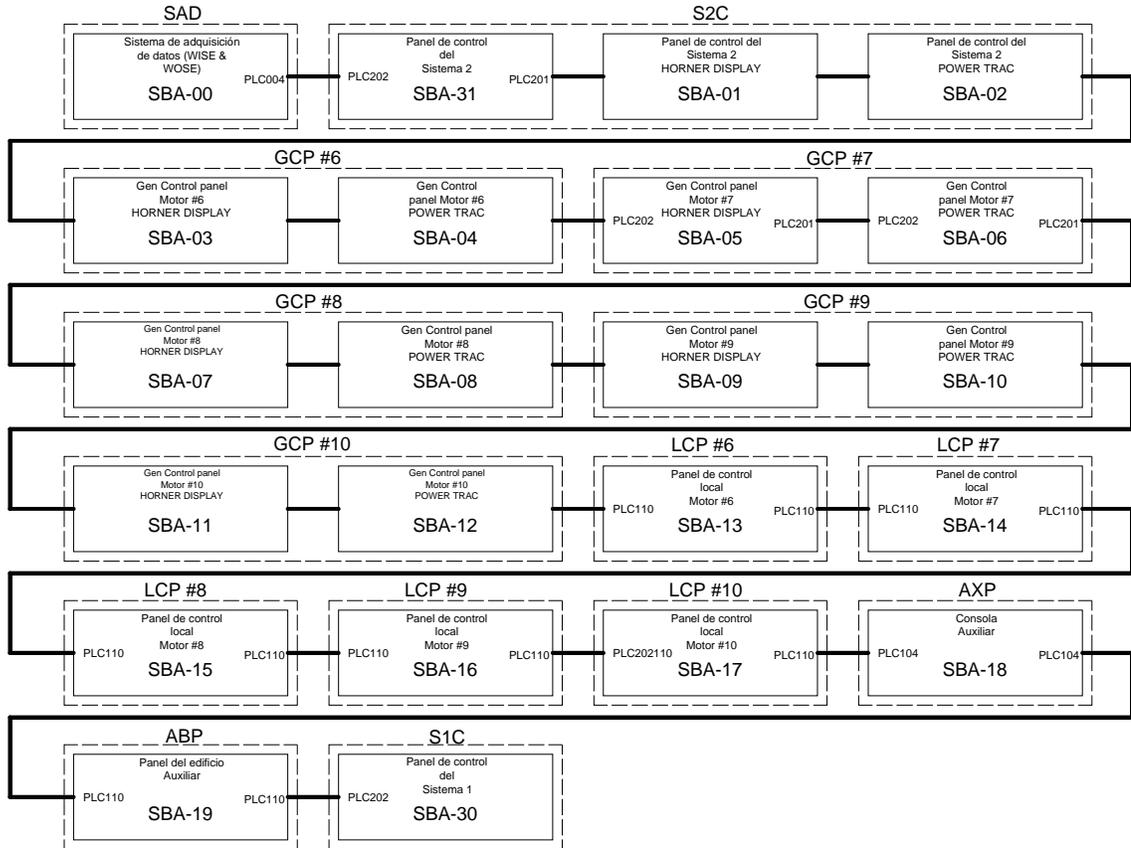
El sistema de control general de la planta está integrado por dos redes de comunicación *Genius* que se identifican como red #1 y red #2. Cada una de estas consta de distintos bloques identificados con un SBA (*serial bus address* por sus siglas en inglés); estos bloques pueden ser: PLC, interfaces con el operador, medidores de potencia en red o el sistema de adquisición de datos. Las redes *Genius* #1 y #2 se muestran en las figuras # 30 y 31, respectivamente.

Figura 30. Red *Genius* #1



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Red *Genius* #2



Fuente: elaboración propia.

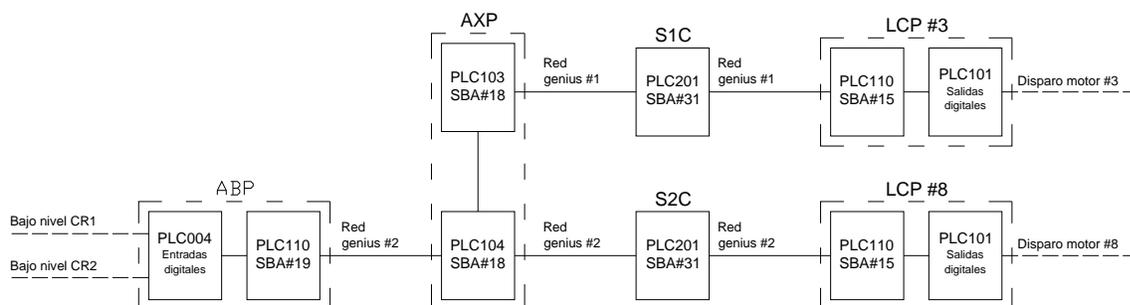
Como puede observarse en las figuras anteriores, el PLC del panel de la consola auxiliar (AXP) aparece tanto en la red *Genius* #1 como en la #2. Esto se debe a que en este panel se concentra la información de ambas redes.

Además, el AXP servirá como puente para trasladar información de la red #2 a la #1, ya que las señales que interesan se obtienen en un bloque de la red *Genius* #2.

Las señales se obtienen en el PLC del ABP, luego deben ser enviadas a la consola auxiliar (AXP) ya que es aquí donde se anuncian las alarmas de bajo nivel en calderas de recuperación. Luego aquí se dividen las señales; la de la caldera #1 se envía al panel de control de sistema 1 (S1C) en cuya lógica del programa existe un “disparo remoto del motor #3” que se utilizará para disparar dicho motor. De igual forma, desde el AXP se envía la señal correspondiente hacia el panel de control del sistema 2 (S2C) que dispara remotamente el motor #8.

En el diagrama de bloques de la figura 32, se resume lo anteriormente descrito.

Figura 32. **Diagrama de bloques del disparo de motores #3 y #8 por bajo nivel en calderas de recuperación #1 y #2**



Fuente: elaboración propia.

Ahora se definirán las direcciones de los datos globales (%G) utilizados en cada PLC de la red *genius*. Para empezar, es necesario saber que en cada bloque de la red se definen direcciones de salida hacia los demás bloques en general, y también direcciones de entrada desde cada uno de los demás bloques en particular. En las tablas XI y XII se hace un resumen de dichas definiciones para los bloques involucrados.

Tabla XI. **Definición de direcciones globales de entrada y salida para el disparo del motor #3**

| SBA # (desde) | SBA # (hacia) | Dirección de entrada 1 | Longitud | Dirección de salida | Longitud | Variable involucrada |
|---------------|---------------|------------------------|----------|---------------------|----------|----------------------|
| 19 | Red #2 | | | %G00001 | 48 | %G00040 |
| 19 | 18 | %G00001 | 48 | | | %G00040 |
| 18 | Red #1 | | | %G00121 | 16 | %G00126 |
| 18 | 31 | %G00593 | 16 | | | %G00098 |
| 31 | Red #1 | | | %G00001 | 32 | %G00005 |
| 31 | 15 | %G00105 | 32 | | | %G00109 |

Fuente: elaboración propia.

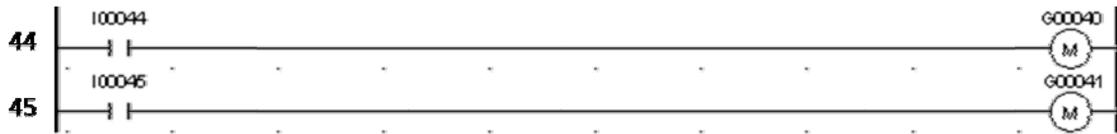
Tabla XII. **Definición de direcciones globales de entrada y salida para el disparo del motor #8**

| SBA # (desde) | SBA # (hacia) | Dirección de entrada | Longitud | Dirección de salida | Longitud | Variable involucrada |
|---------------|---------------|----------------------|----------|---------------------|----------|----------------------|
| 19 | Red #2 | | | %G00001 | 48 | %G00041 |
| 19 | 18 | %G00001 | 48 | | | %G00041 |
| 18 | Red #2 | | | %G00137 | 16 | %G00143 |
| 18 | 31 | %G00593 | 16 | | | %G00099 |
| 31 | Red #2 | | | %G00001 | 32 | %G00005 |
| 31 | 15 | %G00105 | 32 | | | %G00109 |

Fuente: elaboración propia.

Las señales se reciben en el panel del edificio auxiliar (ABP) y estas activan las direcciones globales %G00040 y %G00041, respectivamente, tal y como se muestra en la figura 33.

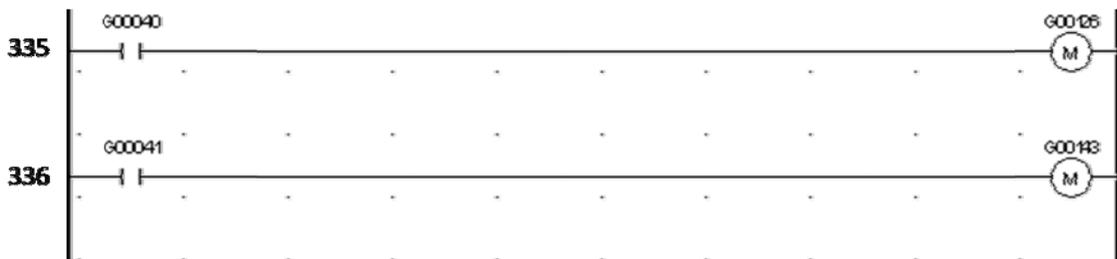
Figura 33. **Diagrama de escalera de la detección de nivel extremadamente bajo en calderas #1 y #2, en el ABP**



Fuente: elaboración propia.

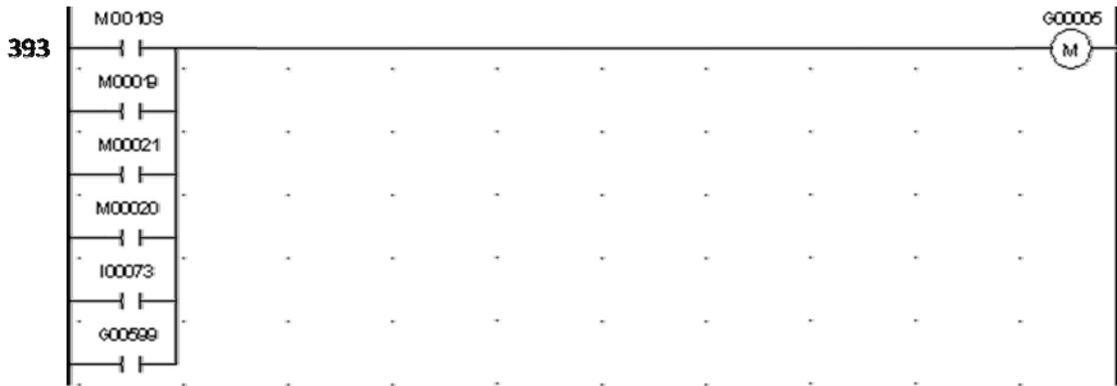
El SBA #19 (ABP) tiene el rango de datos globales de salida de %G00001 a %G00048, del que se utilizará el %G00040 y %G00041. Luego el PLC con SBA #18 (AXP) recibe del SBA #19 el mismo rango de variables, de %G00001 a %G00048; por lo tanto, las variables que interesan siguen siendo %G00040 y %G00041. Estas variables se utilizan en el AXP para anunciar las correspondientes alarmas en dicho panel tal y como se vio en la figura 29 de la sección 4.2. Además, se utilizan para generar los datos globales de salida que están definidos del %G00121 con una longitud de 16, es decir, hasta el %G00136 para la red *Genius* #1, y del %G00137 al %G00152 para la red #2, tal y como lo sugieren las tablas XI y XII. En la siguiente figura se muestra el diagrama de escalera.

Figura 34. **Diagrama de escalera para la generación de datos globales de salida en el PLC de la consola auxiliar (AXP)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Diagrama de escalera para la generación de datos globales de salida en el PLC del panel de control del sistema 2 (S2C)**



Fuente: elaboración propia.

Según las tablas XI y XII, el SBA #31 (en ambas redes) tiene una dirección de salida %G00001, con una longitud de 32, de la cual se utiliza la %G00005, es decir la quinta, como puede apreciarse en las dos figuras anteriores.

Por último, el SBA #15 (LCP3 y LCP8) recibe del SBA #31, los datos globales %G00105 con una longitud de 32 y como en el bloque anterior era el quinto dato, entonces aquí debe ser el quinto dato a partir del %G00105, es decir, %G00109. En la figura 37 se muestra el diagrama de escalera correspondiente, para el PLC de los paneles de control local #3 y8.

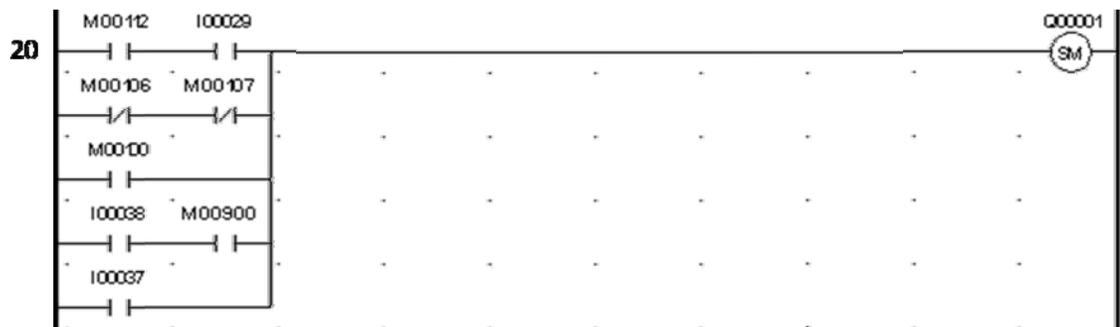
Figura 37. **Diagrama de escalera para la recepción de datos globales en el panel de control local desde el panel de control del sistema**



Fuente: elaboración propia.

Para completar el programa, la marca %M00900 es la encargada de activar la salida %Q00001, que a su vez activa el relé RFO de corte de combustible del motor de combustión y con esto se detiene el disparo inmediato que elimina la fuente de calor de la caldera de recuperación correspondiente, que era el objetivo. En la siguiente figura se muestra el diagrama.

Figura 38. **Diagrama de escalera para el disparo del motor correspondiente a la caldera que tiene nivel de agua extremadamente bajo**



Fuente: elaboración propia.

5. AMPLIACIÓN DEL SISTEMA DE CENTRIFUGACIÓN DE ACEITE LUBRICANTE DE MOTORES

La función de las centrífugas de aceite es remover el agua y otras impurezas del aceite de lubricación de motores bajo el principio de fuerza centrífuga.

5.1. Antecedentes

El diseño original de la planta incluye solamente tres centrífugas para limpiar el aceite lubricante de los diez motores de la planta, las cuales se distribuían de la siguiente manera: centrífuga #1 abarcaba los motores # 1, 2 y 3; centrífuga #2 los motores # 4, 5, 6 y 7; y la #3 los motores # 8, 9 y 10.

Cada centrífuga operaba con sus respectivos motores mediante valvuleos automáticos que consistían en abrir las válvulas de centrifugación de cada motor por separado, durante una hora, y al terminar con todos los motores asociados, empezar de nuevo con el primer motor.

Posteriormente, ante la necesidad de hacer la centrifugación más eficiente, se optó por adquirir dos centrífugas más, para hacer un total de cinco y así aumentar el tiempo de centrifugación de cada motor, ya que con esta configuración a cada centrífuga le corresponden solamente dos motores. Sin embargo, esta ampliación no tuvo efectos en la automatización de las válvulas que se encargan de alimentar el aceite desde el cárter del motor hacia la correspondiente centrífuga y luego retornarlo al cárter.

Este capítulo trata precisamente sobre la automatización de este proceso de valvuleos que tendrá varias ventajas, como por ejemplo: ahorro de tiempo, confiabilidad, reducción de probabilidad de error por parte del operador y el anuncio de alarmas de accionamientos anormales.

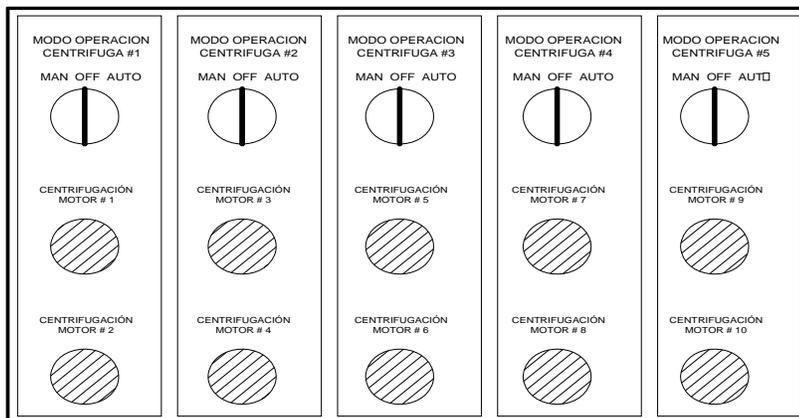
5.2. Diseño propuesto

El objetivo es cambiar la configuración de correspondencia entre centrífugas y motores de modo que a cada centrífuga trabaje con cada dos motores.

5.2.1. Modo de funcionamiento

Se debe modificar el tablero de control de centrifugado de aceite de motores, ubicado en el panel del edificio auxiliar (ABP), el cual ahora debe constar de cinco selectores de modo de centrifugación, manual y automático, y diez pulsadores luminosos de inicio y paro de centrifugación correspondientes a los diez motores, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 39. **Tablero de control de centrifugado de aceite de motores**



Fuente: elaboración propia.

En el modo de control manual, el operador selecciona mediante un pulso al botón del motor que desea poner a centrifugar y la válvula neumática de centrifugación se abrirá a través de una señal de aire de la válvula solenoide actuada por una señal desde el PLC. Esta válvula quedará abierta hasta que se seleccione el otro motor, o bien hasta que le dé otro pulso al mismo botón para cancelar su centrifugación.

En el modo de control automático, el operador selecciona el motor con el que iniciará el proceso de centrifugación, luego al terminar dicho proceso comenzará el ciclo para el otro motor.

En cualquier momento, el operador puede cancelar el proceso de centrifugación y ordenar cerrar las válvulas mediante un pulso al botón del motor cuyas válvulas estén abiertas.

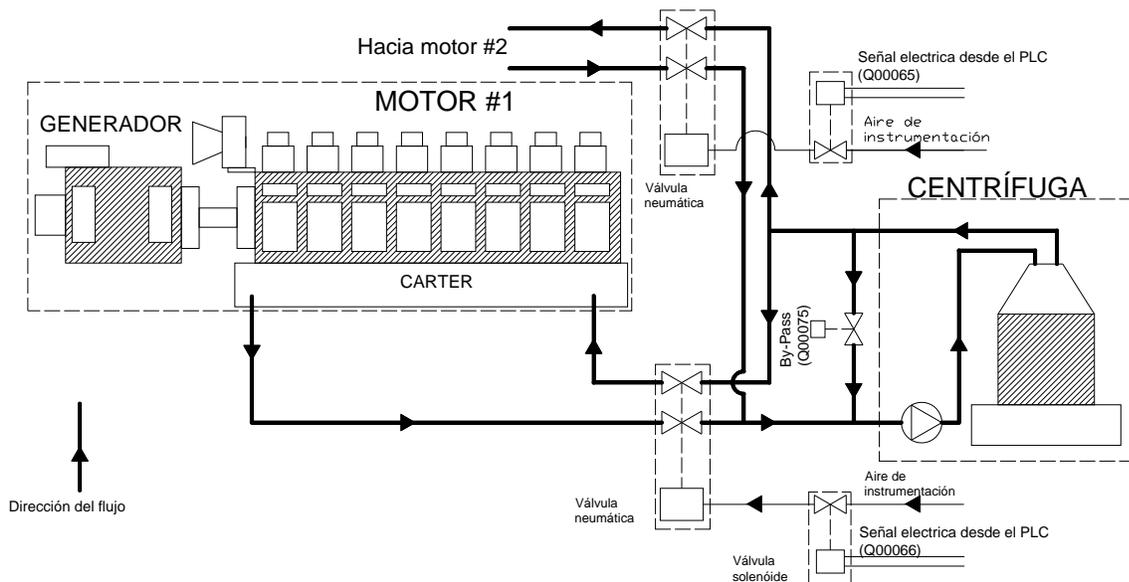
Cabe hacer notar que lo que se trata de automatizar es solamente la apertura y cierre de las válvulas de centrifugación; todo el proceso de centrifugación es propio de las centrífugas.

En ambos casos, manual o automático, la luz indicadora del botón luminoso queda destellando en el momento de ser pulsado y deja de destellar cuando el PLC detecta que la válvula está completamente abierta.

Esta luz indicadora también destella cuando hay en proceso una transición de un motor a otro y cuando existe alguna de las siguientes alarmas: válvulas de los dos motores están abiertas, hay señal de apertura y la válvula está cerrada, o no hay señal de apertura y la válvula está abierta.

También existe una electroválvula de *bypass* que debe abrirse siempre que exista cualquiera de las siguientes condiciones: las válvulas de los dos motores estén cerradas al mismo tiempo, durante el proceso de transición de un motor a otro y cuando existe una condición de alarma. En la figura 40 se muestra el diagrama de flujo de proceso del control de válvulas de centrifugación.

Figura 40. **Diagrama de flujo de proceso del sistema de control de válvulas de centrifugación**



Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Diagramas de alambrado hacia el controlador lógico programable

Las entradas y salidas digitales hacia el PLC se resumen en la siguiente tabla.

Tabla XIII. **Resumen de entradas y salidas digitales de PLC**

| Cantidad | Tipo | Aplicación |
|-----------------|--------------------|---|
| 10 | Entradas digitales | Señalización de estado de válvula (abierta-cerrada) |
| 10 | Entradas digitales | Pulsadores de apertura-cierre de válvulas de centrifugación |
| 10 | Entradas digitales | 5 Selectores manual-automático |
| 10 | Salidas digitales | Indicadores luminosos |
| 10 | Salidas digitales | Válvulas solenoides que activan las válvulas neumáticas de centrifugación |
| 5 | Salidas digitales | Válvulas solenoides de <i>bypass</i> |

Fuente: elaboración propia.

Los sensores que se utilizan para detectar el estado de las válvulas son del tipo inductivo y cada uno va conectado a las entradas de PLC.

Los diez pulsadores son del tipo luminoso, es decir, además los contactos del pulsador, también tienen acoplado un *socket* para señalar el estado de las válvulas de centrifugación.

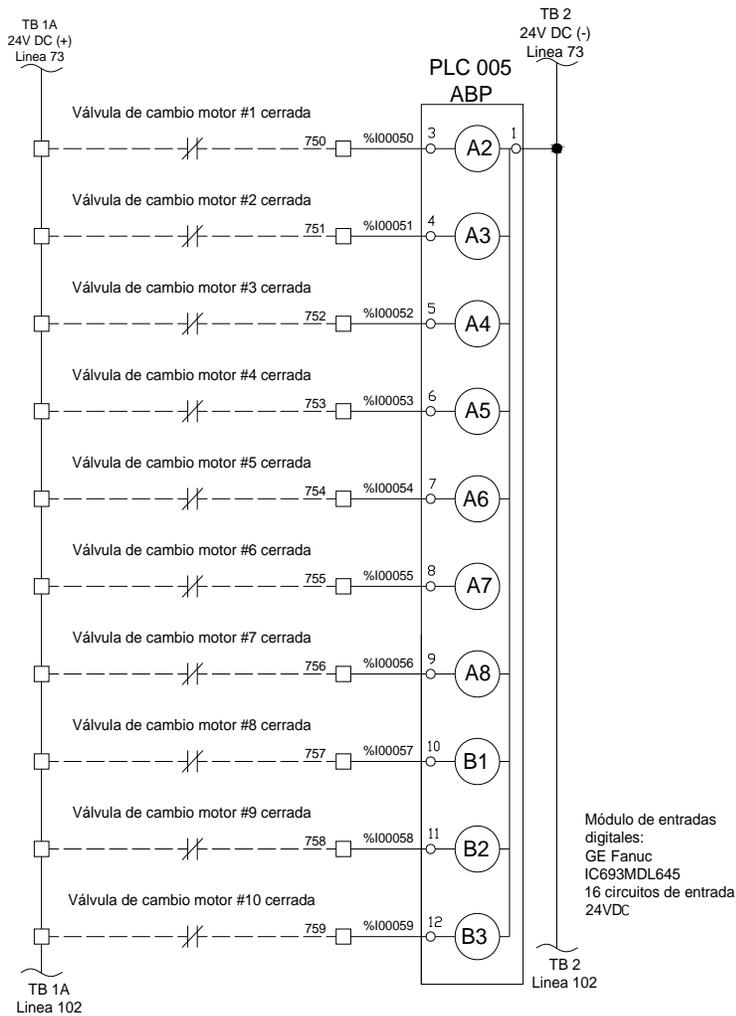
Los selectores manual automático son de tres posiciones sostenidas, a la izquierda está la posición manual y a la derecha el automático.

En los diagramas de alambrado a PLC que se presentan a continuación, se incluye detalladamente el número de tarjeta de PLC, borneras, direccionamiento de entradas y salidas, etc.

5.2.2.1. Señalización de estado de válvulas

Cada válvula de centrifugación cuenta con un sensor de proximidad que se activa cuando dicha válvula se encuentra totalmente abierta; se utiliza el contacto normalmente cerrado del sensor, es decir, su contacto está cerrado cuando la válvula está cerrada y se abre cuando detecta que está totalmente abierta. El diagrama de alambrado se muestra en la figura 41.

Figura 41. Diagrama de entradas de sensores de estado de válvula

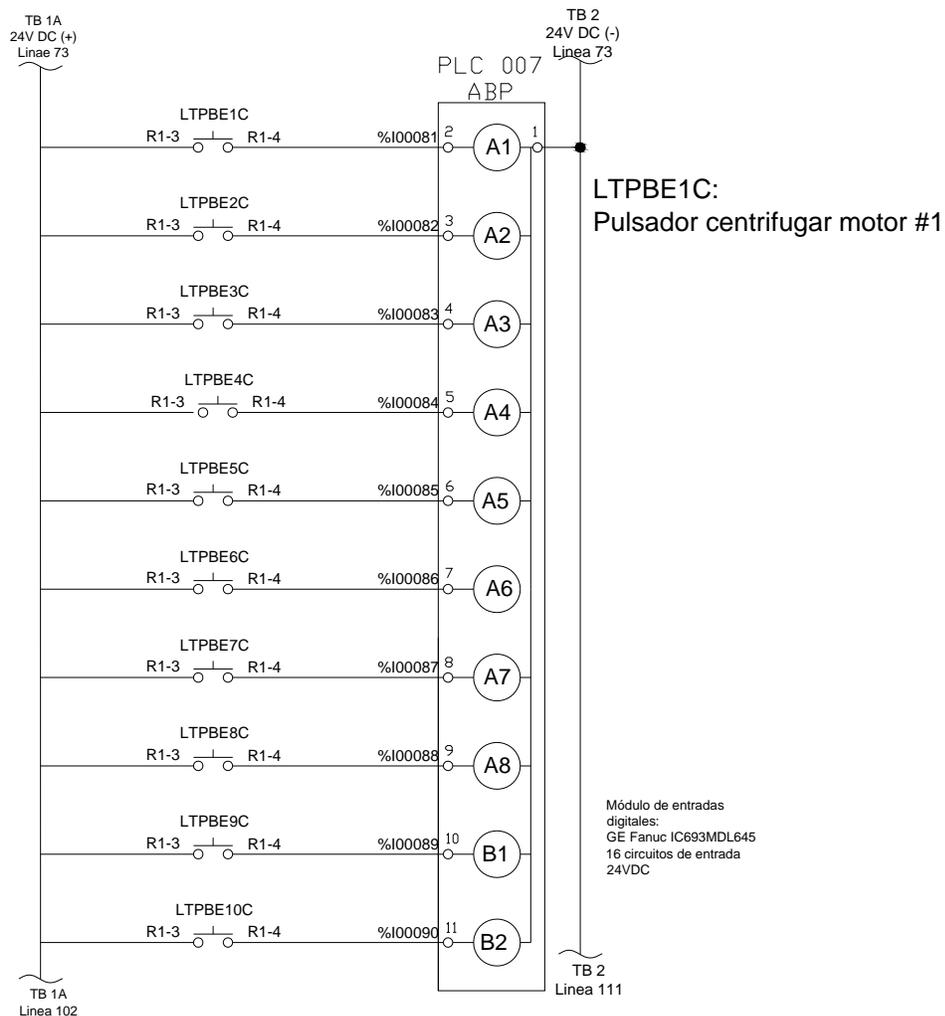


Fuente: elaboración propia.

5.2.2.2. Entradas de pulsadores

Como se mencionó, existen diez pulsadores en el tablero de control, cada uno correspondiente a cada motor; estos se utilizan para iniciar y parar el proceso de apertura y cierre de las válvulas de centrifugación, ya sea en modo manual o automático. En la siguiente figura se muestra el diagrama de alambrado de PLC.

Figura 42. Diagrama de entradas de pulsadores

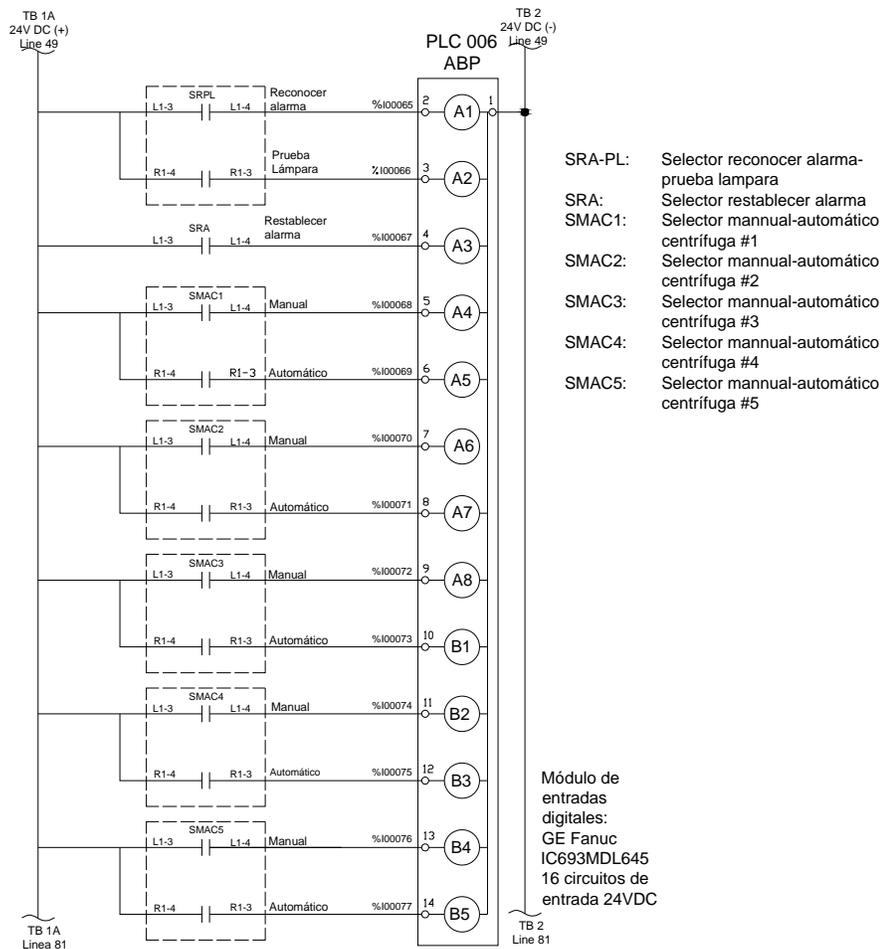


Fuente: elaboración propia.

5.2.2.3. Entradas de selectores manual-automático

Ya que existen cinco centrifugas y a cada una le corresponden dos motores, entonces, hay cinco selectores manual-automático correspondientes a cada par de motores. El diagrama de alambrado al PLC se muestra en figura 43. También se muestran las entradas de selectores de prueba de lámpara, se reconoce y restablece la alarma que también se utilizan en el resto del programa.

Figura 43. Diagrama de entradas de selectores manual-automático

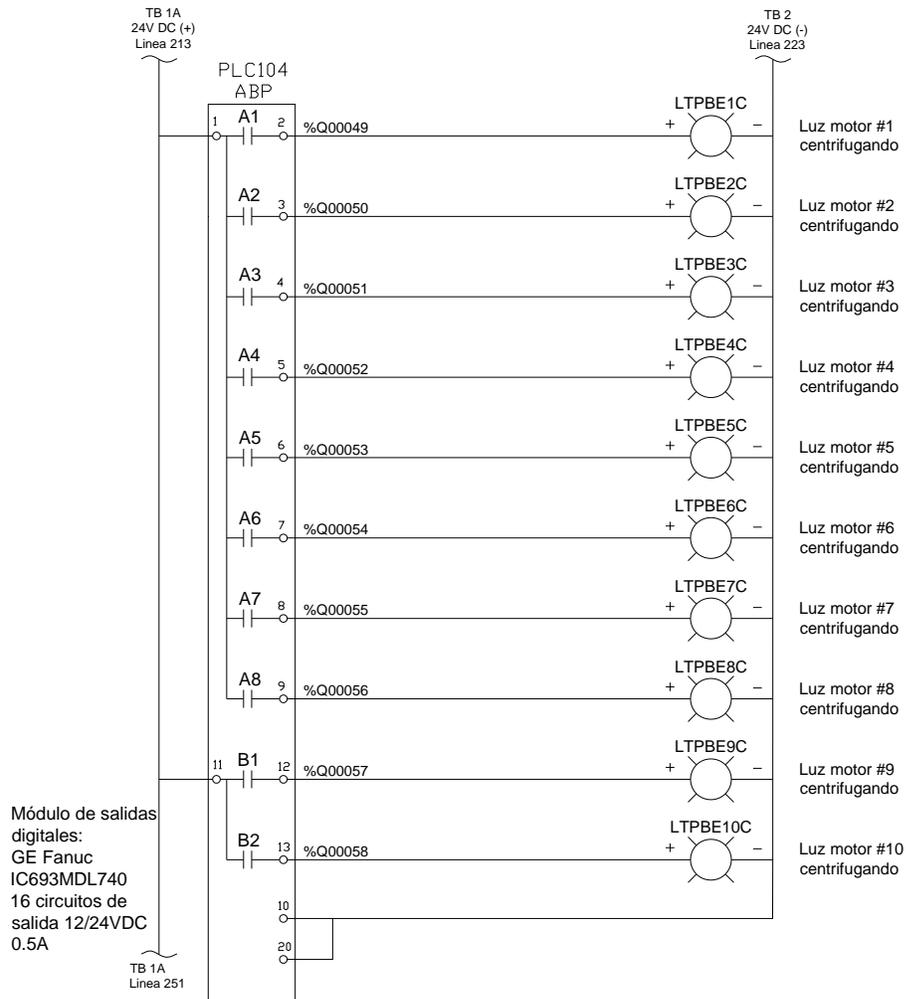


Fuente: elaboración propia.

5.2.2.4. Salida de luces indicadoras

Hay una luz indicadora para cada válvula de centrifugación; estas luces se encienden fijamente cuando su correspondiente válvula está abierta; además, quedan destellando cuando hay una transición de apertura-cierre de válvulas o cuando existe una alarma de las que se mencionaron en la sección 5.2.1. A continuación se muestra el diagrama de alambrado de PLC.

Figura 44. Diagrama de salidas de luces indicadoras



Fuente: elaboración propia.

5.2.2.5. Salidas de válvulas solenoides

Hay una válvula solenoide para cada válvula de centrifugación y una solenoide de *bypass* para cada centrífuga. El diagrama de salidas digitales se muestra a continuación.

Figura 45. Diagrama de salidas de válvulas solenoides



Fuente: elaboración propia.

5.2.3. Diagramas de escalera en el programa del controlador lógico programable

En esta sección se diseñará el programa de PLC con base en diagramas de escaleras referente a la automatización de las válvulas de centrifugación. El diseño será una ampliación en el programa instalado en el PLC de panel del edificio auxiliar (ABP), ya que dicho PLC contiene todo lo referente a los equipos auxiliares.

Por simplicidad se elaborará el diseño solo para un par de motores, motores #1 y 2, para los otros cuatro pares será de manera similar pero con sus respectivas variables. Para empezar, en la siguiente tabla se muestra la declaración de variables junto con su correspondiente significado en el programa.

Tabla XIV. Declaración de variables para el programa de PLC

| Variable | Significado |
|----------|--|
| #T_SEC | Variable interna: (intermitente ½ segundo ON y ½ segundo OFF) |
| I00050 | Motor #1 válvula de centrifugación cerrada |
| I00051 | Motor #2 válvula de centrifugación cerrada |
| I00065 | Entrada <i>switch</i> , reconocer alarma |
| I00066 | Prueba de lámparas |
| I00067 | Entrada <i>switch</i> , restablecer sistema |
| I00068 | Centrífuga de aceite #1, <i>switch</i> de control en manual |
| I00069 | Centrífuga de aceite #1, <i>switch</i> de control en automático |
| I00081 | Motor #1, botón de inicio-paro de centrifugación |
| I00082 | Motor #2, botón de inicio-paro de centrifugación |
| M00058 | Centrífuga #1, resumen de alarmas reconocido |
| M00095 | Motor #1, alarma en válvula de centrifugación |
| M00096 | Motor #2, alarma en válvula de centrifugación |
| M00240 | Alarma, válvula motor 2 abierta cuando está abierta la del motor 1 |
| M00241 | Alarma, válvula motor 1 abierta cuando está abierta la del motor 2 |
| M00250 | Señal de apertura a válvula motor 1 y la válvula no abre en 5 seg. |
| M00251 | Señal de apertura a válvula motor 2 y la válvula no abre en 5 seg. |
| M00260 | Motor #1, selección para iniciar centrifugación |

Continuación de la tabla XIV

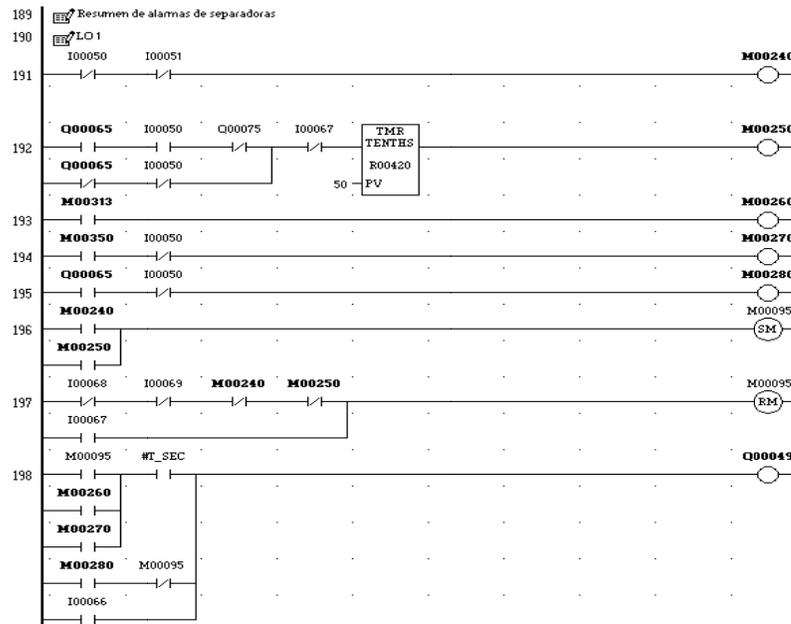
| Variable | Significado |
|-----------------|---|
| M00261 | Motor #2, selección para centrifugar |
| M00270 | Motor #1, selección para cancelar centrifugación |
| M00271 | Motor #2, selección para cancelar centrifugación |
| M00280 | Motor #1, centrifugando |
| M00281 | Motor #2, centrifugando |
| M00290 | Selector #1 manual-auto: transición a manual |
| M00291 | Selector #1 manual-auto: transición a OFF |
| M00292 | Selector #1 manual-auto: transición a automático |
| M00304 | Selector #1 manual-auto: resumen de transiciones |
| M00310 | Motores #1 y 2: resumen de alarmas de centrifugación |
| M00313 | Motor #1: selección para iniciar centrifugación |
| M00314 | Motor #2: selección para iniciar centrifugación |
| M00323 | Motor #1: abrir válvula de centrifugación |
| M00324 | Motor #2: abrir válvula de centrifugación |
| M00343 | Bypass de centrífuga #1: orden para cerrar |
| M00346 | Motores #1 y 2: selección y desección |
| M00350 | Motor #1: selección para cancelar centrifugación |
| M00351 | Motor #2: selección para cancelar centrifugación |
| M00360 | Motor #1 o 2: iniciada la centrifugación en automático |
| M00363 | Motor #1: iniciada la centrifugación en automático |
| M00364 | Motor #2: iniciada la centrifugación en automático |
| M00393 | Motor #1: centrifugado durante 30 minutos |
| M00394 | Motor #2: centrifugado durante 30 minutos |
| M00403 | Motor #1: orden de inicio de centrifugación en automático |
| M00404 | Motor #2: orden de inicio de centrifugación en automático |
| M00413 | Motor #1: centrifugación automático, pulso momentáneo |
| M00414 | Motor #2: centrifugación automático, pulso momentáneo |
| M00435 | Centrífuga #1: <i>bypass</i> abierto durante 5 segundos |
| Q00049 | Motor #1: luz indicadora de centrifugación |
| Q00050 | Motor #2: luz indicadora de centrifugación |
| Q00065 | Motor #1: salida a válvula solenoide de centrifugación |
| Q00066 | Motor #2: salida a válvula solenoide de centrifugación |
| Q00075 | Centrífuga #1: salida a válvula solenoide de <i>bypass</i> |
| R00200 | # de motor que le toca centrifugación |
| R00301 | Temporizador: 5 seg. después de una transición del selector man-auto |
| R00316 | Temporizador: 5 segundos abierta la válvula de <i>bypass</i> de centrífuga #1 |
| R00330 | Motor #1: contador de tiempo de centrifugado |
| R00333 | Motor #2: contador de tiempo de centrifugado |
| R00420 | Motor #1: temporizador de verificación alarma no centrifugación |
| R00423 | Motor #2: temporizador de verificación alarma no centrifugación |

Fuente: elaboración propia.

5.2.3.1. Resumen de alarmas en válvulas de centrifugación de motores

El resumen de alarmas de válvulas de centrifugación de cada motor consiste básicamente en tres alarmas diferentes: la primera se da cuando el PLC tiene activada la salida para abrir la válvula y no recibe señal de que esta abrió durante los siguientes cinco segundos; la segunda, cuando el PLC no tiene activada la salida para abrir la válvula y, sin embargo, detecta que esta está abierta; por último, cuando el PLC detecta que están abiertas las válvulas de ambos motores pertenecientes a la misma centrífuga. Las primeras dos alarmas se reflejan en la línea 192 de la figura 46, la tercera en la línea 191 y se resumen en la 196 con la marca M00095.

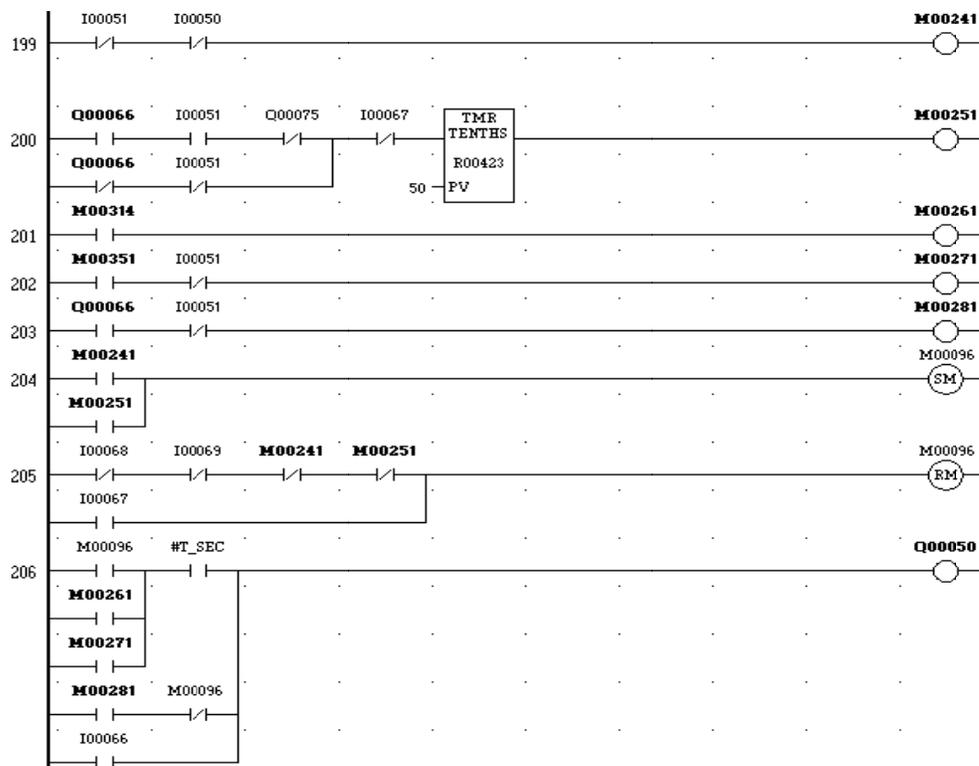
Figura 46. Diagrama de escalera para el resumen de alarmas de válvulas de motor #1



Fuente: elaboración propia.

En la línea 198 de la figura anterior puede apreciarse que la luz indicadora de centrifugación Q00049 queda destellando bajo cualquiera de las tres circunstancias: existe una alarma, el motor fue seleccionado para centrifugar pero todavía no está abierta la válvula (M00260) o el motor fue seleccionado para cancelar la centrifugación pero la válvula continúa abierta (M00270). Dicha luz indicadora se queda encendida cuando se hace prueba de lámparas (I00066) y también cuando existe señal de salida de apertura de válvula y a la vez el PLC detecta que esta está abierta, siempre y cuando no haya ninguna alarma (M00280 y M00095). En la siguiente figura se muestra el diagrama de escalera similar para el motor #2.

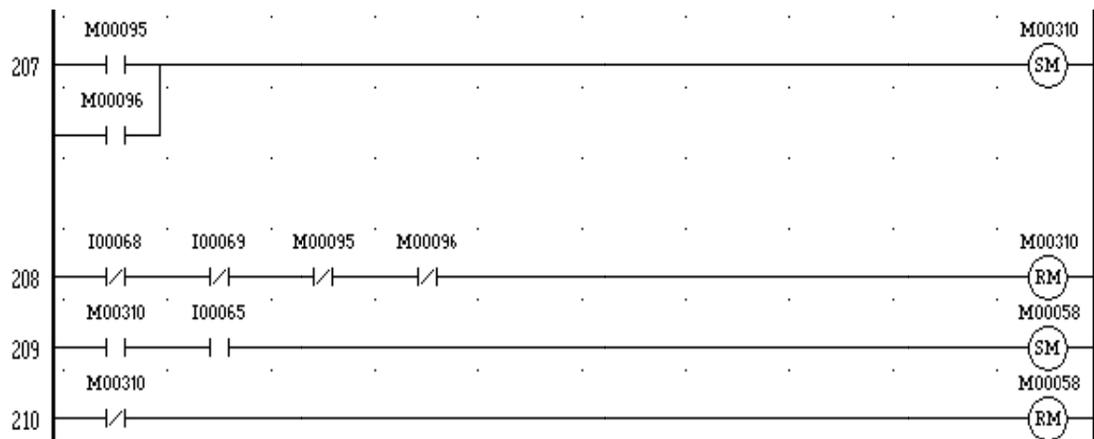
Figura 47. **Diagrama de escalera para el resumen de alarmas de válvulas de motor #2**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 48 se realizó el resumen de alarmas para ambos motores (M00310), su restablecimiento, y el reconocimiento por parte del operador a través de I00065.

Figura 48. **Resumen de alarmas de centrifugación de motores #1 y 2**



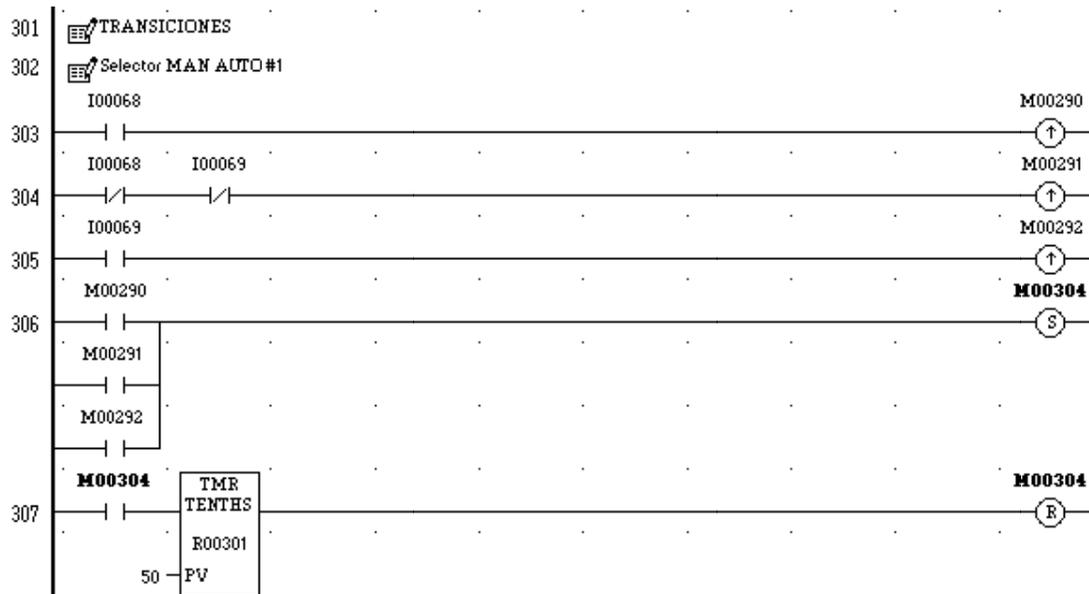
Fuente: elaboración propia.

5.2.3.2. Centrifugación en modo automático

Para empezar se diseña un diagrama que detecte cualquier transición realizada por los selectores, es decir, de OFF a manual, de OFF a automático y viceversa; y que a su vez dé un lapso de cinco segundos antes que se pueda realizar otra acción.

Esto se utilizará más adelante para restablecer cualquier proceso iniciado y también para activar la válvula de *bypass* y así evitar cualquier contrapresión originada por los cambios de estado de válvulas. El diagrama se muestra en la figura 49.

Figura 49. Diagrama de escalera para detectar transiciones de selectores manual-automático



Fuente: elaboración propia.

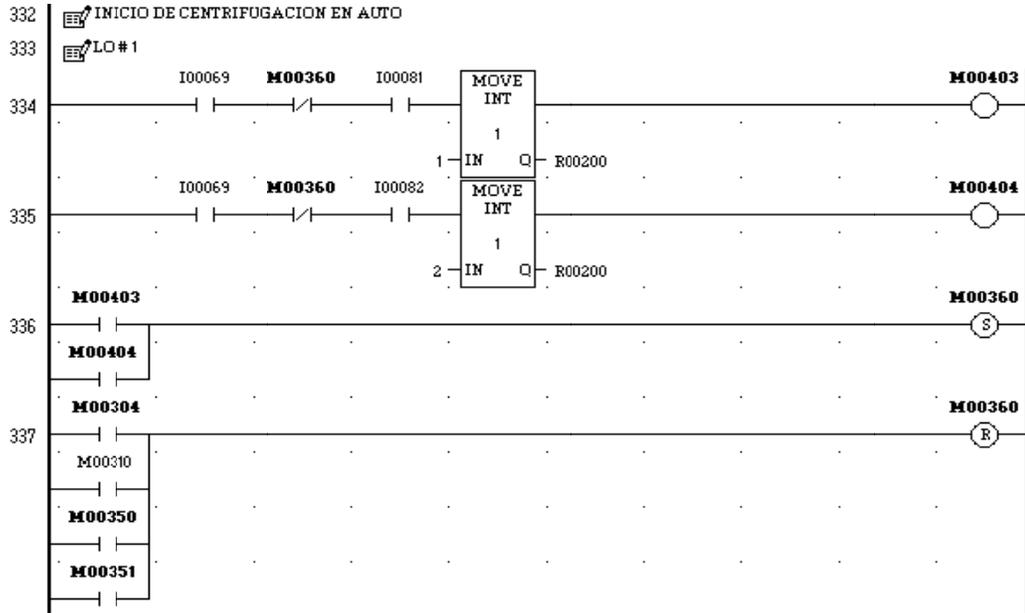
Se usará el registro R00200 para almacenar el número de motor que sigue para centrifugar.

En primer lugar el selector debe estar en automático (I00069) y elegir el motor a centrifugar mediante el botón correspondiente (I00081 o I00082), como puede apreciarse en las líneas 334 y 335 de la figura 50.

En la línea 336 se resume en una sola marca (M00360) el inicio de centrifugación de cualquiera de ambos motores y en la línea 337 su restablecimiento.

El objetivo de detectar las transiciones en los selectores es el de reducir el efecto de pivoteo que producen sus contactos cuando cambian de estado.

Figura 50. Inicio de centrifugación de motores #1 y 2 en automático

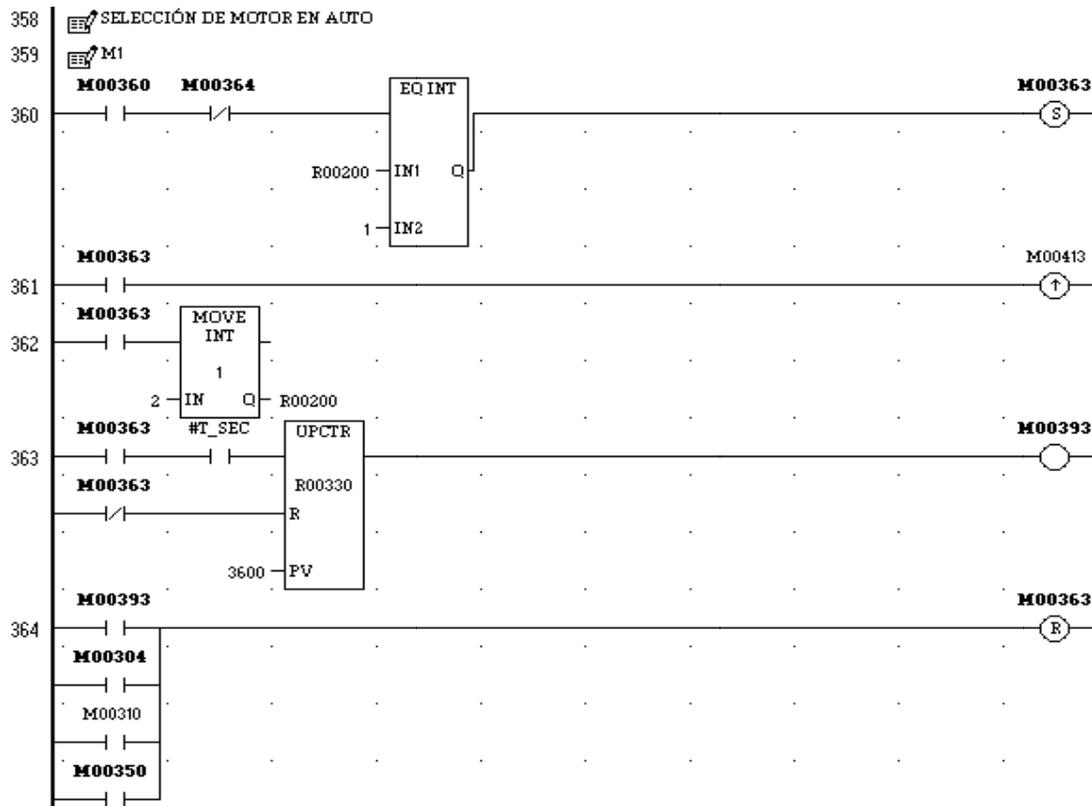


Fuente: elaboración propia.

Después de iniciar la centrifugación con cualquiera de los dos motores, este debe hacerlo durante 30 minutos, luego cancelar su centrifugación e iniciar la centrifugación del otro motor durante el mismo tiempo y mantener este ciclo hasta que la centrifugación sea cancelada mediante un pulso al botón que se esté centrifugando o bien pasando el selector manual-automático a la posición OFF.

Luego de haber seleccionado el motor a centrifugar, se activa la marca M00363 o bien la M00364 a través de un bloque que compara el valor del registro R00200, tal y como puede verse en la figura 51 para el motor #1 o en la figura 52 para el motor #2. Inmediatamente después se activa el contador R00330 o bien el R00333, según corresponda, que incrementa su valor cada segundo a través del contacto temporizador de un segundo (#T_SEC), hasta llegar a 1800 que equivale a 30 minutos.

Figura 51. Diagrama de escalera de la centrifugación en automático del motor #1

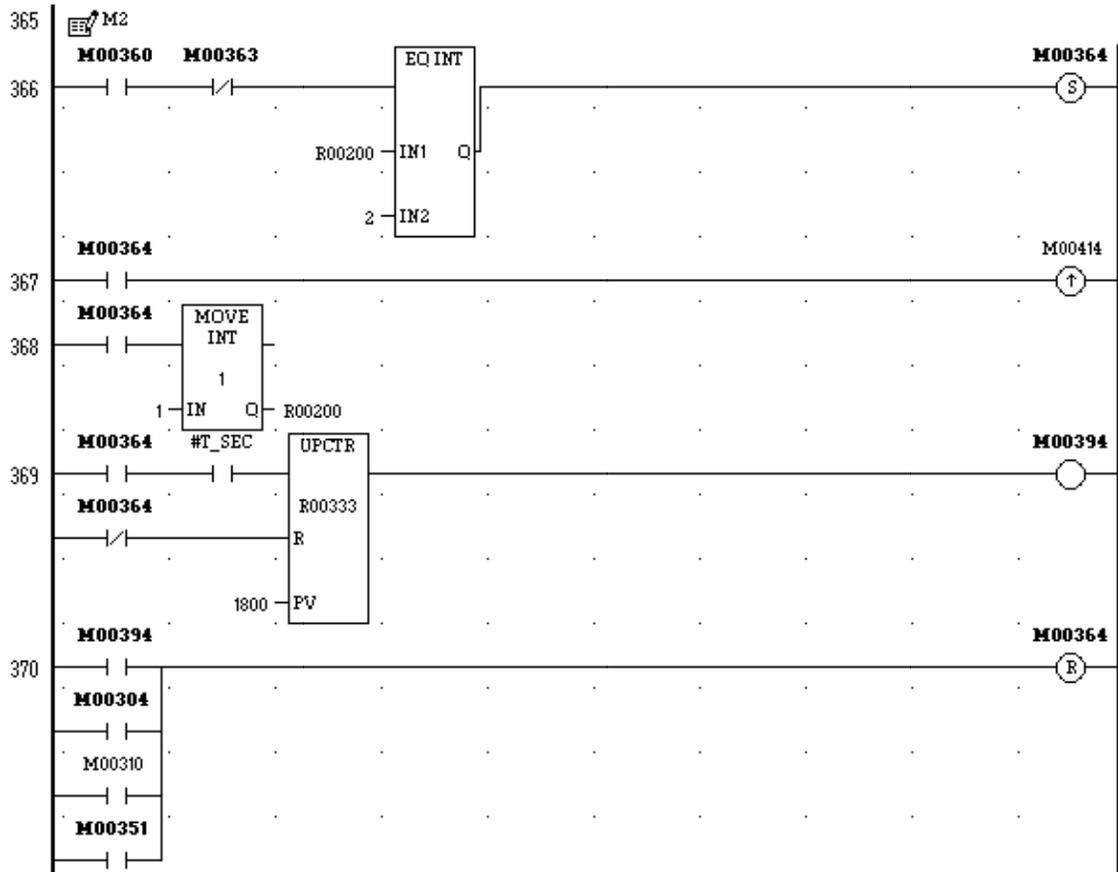


Fuente: elaboración propia.

Para hacer el cambio automático puede observarse la línea 362, en el momento de iniciarse el conteo de los 30 minutos; la marca M00363 también activa el bloque “MOVE INT” que cambia el valor del registro R00200 al valor almacenado en la entrada “IN”, en este caso es “2”, con lo que deja listo para que se active la marca M00364 en la línea 366 de la figura 52, en el momento que se restablezca la marca M00363 después de los 30 minutos y el registro R00200 volverá a ser “1”.

Este ciclo se repite indefinidamente hasta que se cancele la centrifugación.

Figura 52. Diagrama de escalera de la centrifugación en automático del motor #2



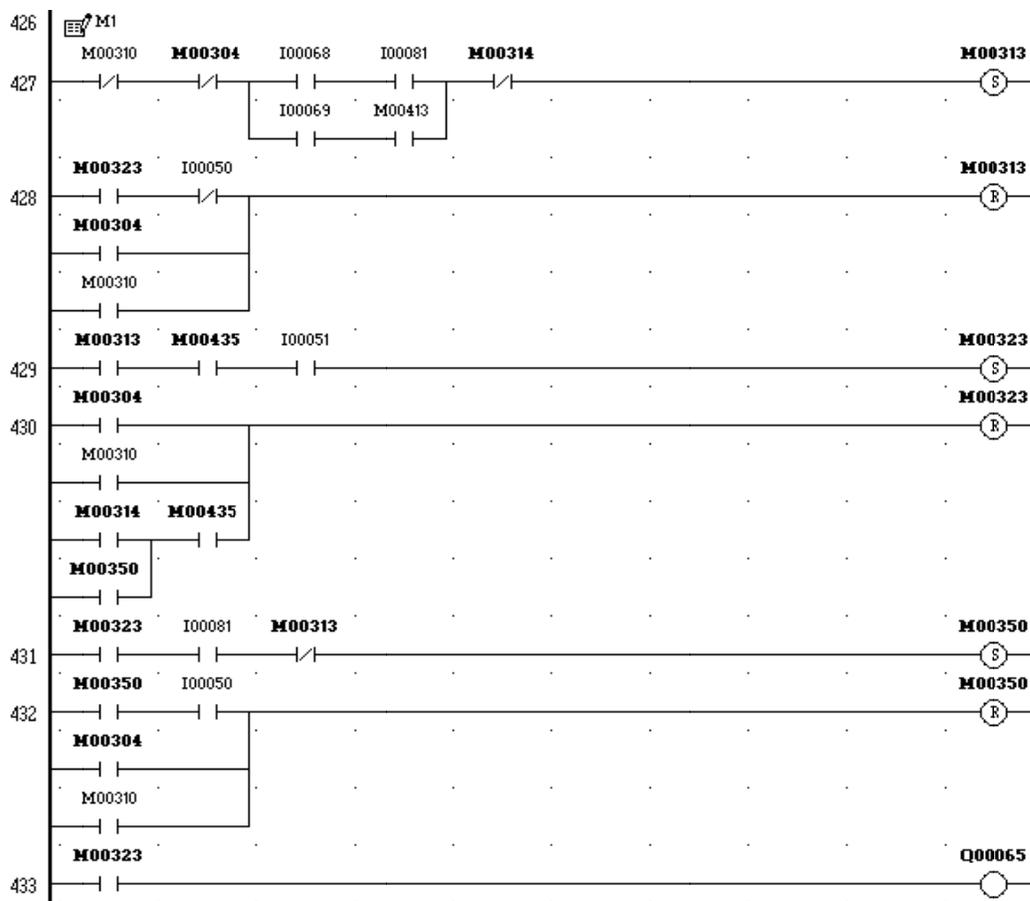
Fuente: elaboración propia.

5.2.3.3. Centrifugación en modo manual

La centrifugación en modo manual va de la mano de la automática, de modo que en cualquiera de las dos formas, se active la misma marca en el programa, como puede apreciarse en la línea 427 del diagrama de la figura 53, en la que I00068 corresponde a la entrada de selector en modo manual y la entrada I00081 es el botón pulsador para seleccionar el motor #1.

De igual forma, en el segundo ramal de dicha línea, I00069, corresponde a la entrada de selector en modo automático y M00413 cuya procedencia se estudió en la sección anterior, proporciona un pulso corto para el modo automático.

Figura 53. Diagrama de escalera de la centrifugación en manual del motor #1

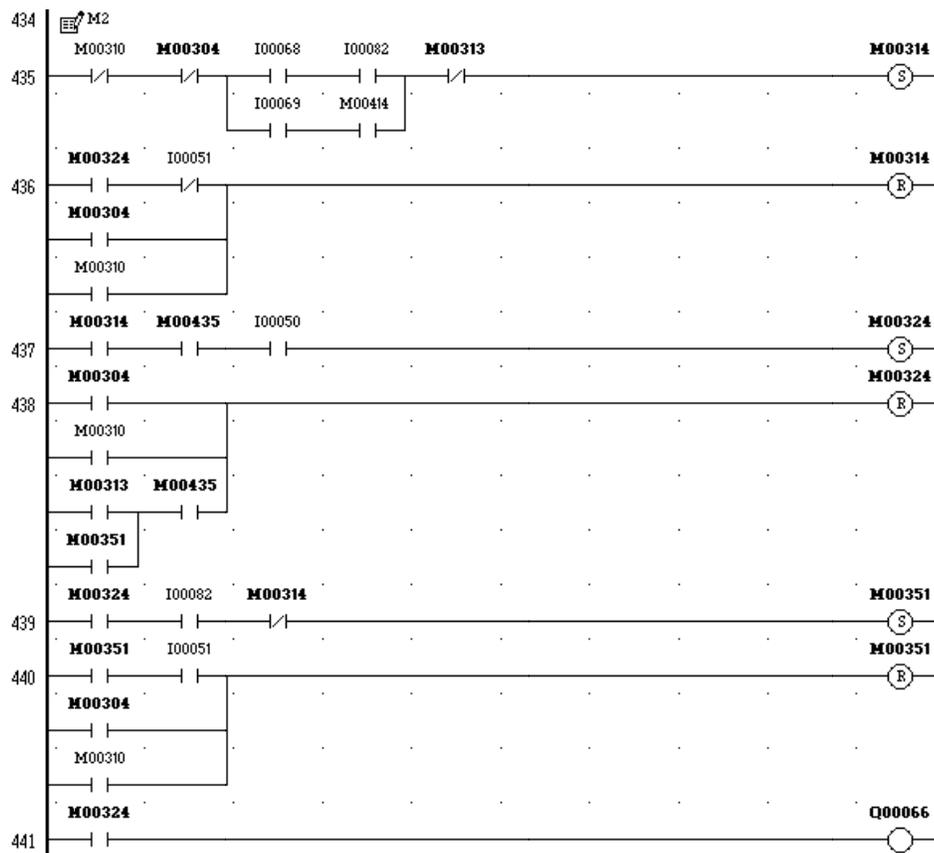


Fuente: elaboración propia.

Luego, quien activa la salida digital Q00065 hacia la válvula solenoide es la marca M00323, como puede notarse en la línea 433 de la figura 53.

M00323 a la vez es activada en la línea 429 bajo tres condiciones: que haya sido seleccionada en manual o automático (M00313), que la válvula de de *bypass* haya estado abierta durante cinco segundos, que requiere un cambio válvula (M00435) como se estudiará en la siguiente sección, y que la válvula esté cerrada (I00051). Además, en la línea 431 se muestra la forma de activar la marca M00350 que se encarga de cancelar la centrifugación mediante un pulso al botón pulsador correspondiente, cuyas condiciones son: que la válvula esté seleccionada (M00323) y que no esté en proceso de selección (M00313). En la figura 54 se muestra el análogo de la figura 53 para el motor #2

Figura 54. Diagrama de escalera de la centrifugación en manual del motor #2



Fuente: elaboración propia.

5.2.3.4. Activación de válvula de *bypass*

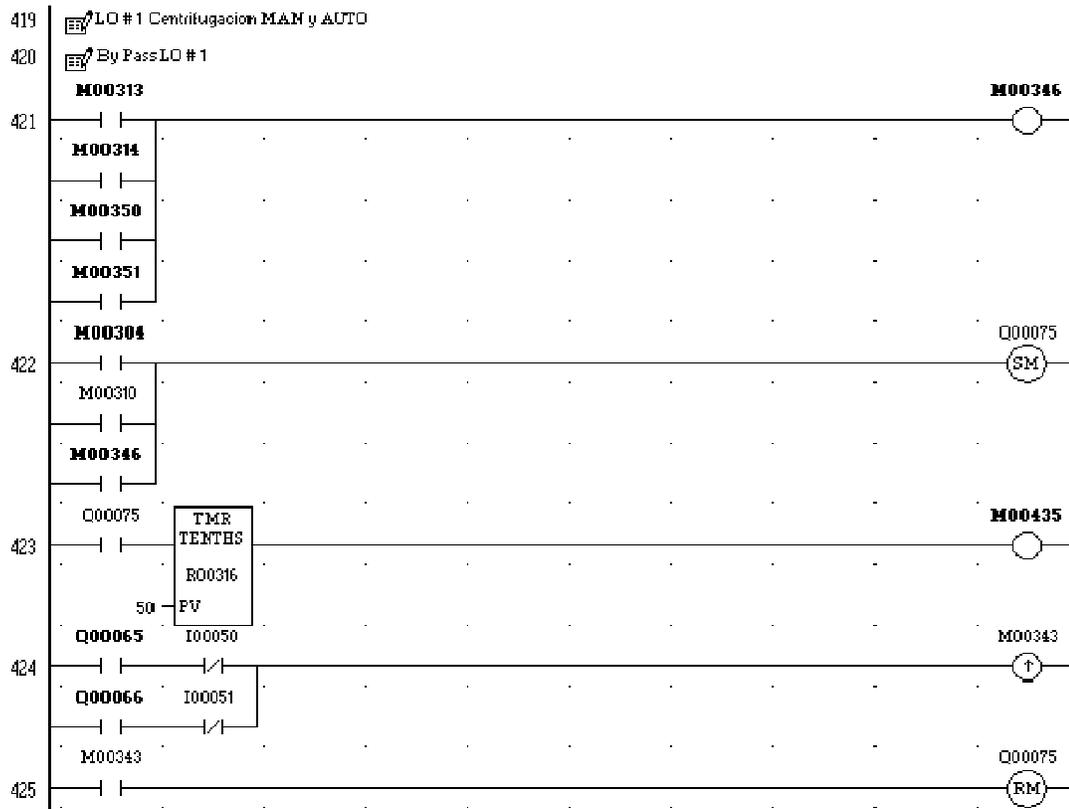
Cada centrífuga cuenta con una válvula solenoide de *bypass* que comunica la salida y la entrada de aceite lubricante. La función de esta válvula es abrir cuando las válvulas de centrifugación de ambos motores se encuentran cerradas y así evitar cualquier contrapresión que se pudiera formar.

La válvula solenoide de *bypass* debe permanecer abierta en cualquiera de las siguientes condiciones:

- En el momento de seleccionar la centrifugación de cualquiera de los dos motores asociados a la centrífuga, pero se debe cerrar cuando se detecte que la válvula de centrifugación esté abierta, esta función la cumplen las marcas M00313 y M00314 ya que se restablecen bajo estas condiciones, tal y como puede verse en los diagramas de las dos figuras de la sección anterior.
- En el momento de cancelar la centrifugación de cualquiera de los dos motores a través de M00350 y M00351.
- Cuando existe un resumen de alarmas de centrifugación (M00310) como el descrito en la sección 5.2.3.1.
- Cuando existe una transición en la posición del selector manual-automático (M00304).

Las primeras dos condiciones para la apertura de la válvula de *bypass* se resumen en la marca M00346 del diagrama de la figura 55, y junto a esta, las otras dos condiciones activan la salida hacia el *bypass* Q00075.

Figura 55. Diagrama de escalera para la activación de la válvula solenoide de *bypass*



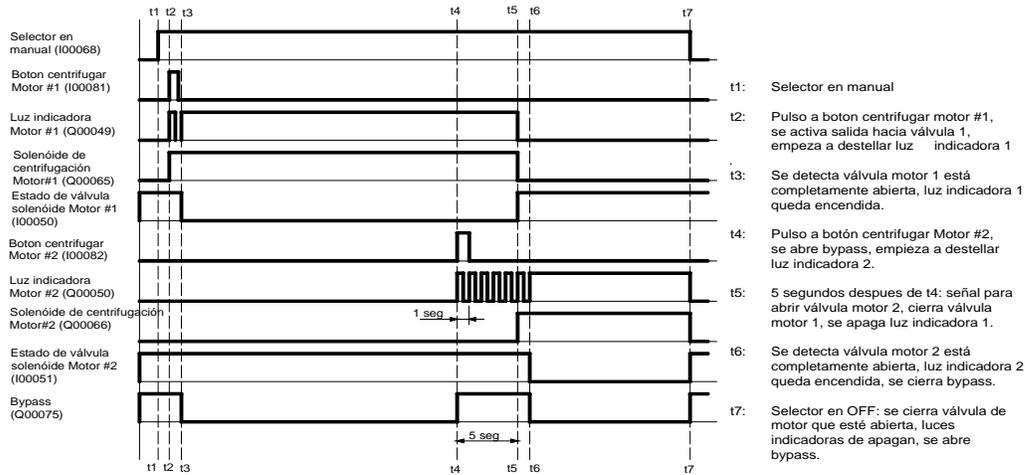
Fuente: elaboración propia.

En la línea 423 de la figura anterior se activa la marca M00435 cinco segundos después de activarse el *bypass*. Esta marca se utilizó en la sección anterior para retardar la apertura de las válvulas de centrifugación, con el objetivo de tener abierto el *bypass* durante cinco segundos, desde que se selecciona la centrifugación hasta que la válvula está abierta.

Por último, la válvula solenoide de *bypass* se debe cerrar hasta que exista una señal de salida para cualquiera de las dos válvulas de centrifugación y se detecte que la correspondiente válvula está abierta, como puede notarse en las líneas 424 y 425 de la figura 55.

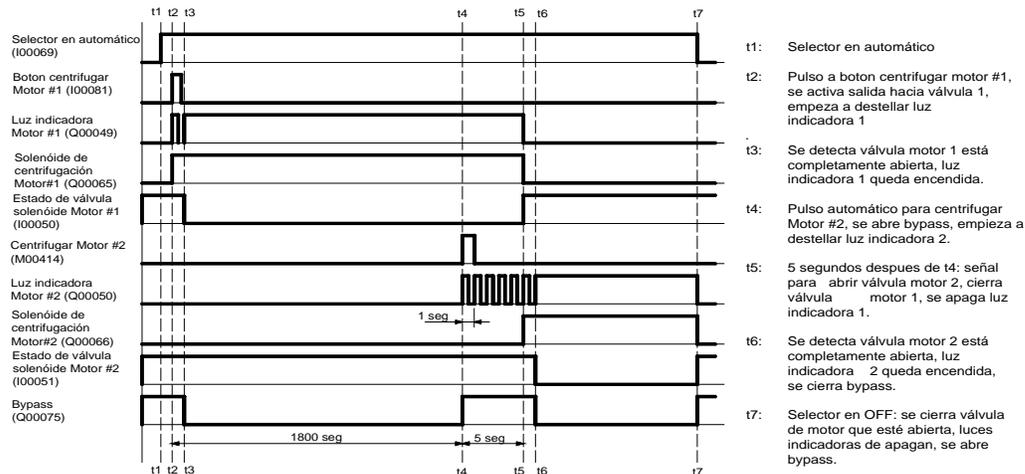
Las figuras 56 y 57 muestran las gráficas de tiempos de accionamiento de entradas y salidas en modo manual y automático respectivamente.

Figura 56. Gráfica de tiempos de accionamiento de entradas y salidas en modo manual



Fuente: elaboración propia.

Figura 57. Gráfica de tiempos de accionamiento de entradas y salidas en modo automático



Fuente: elaboración propia.

6. AMPLIACIONES Y CORRECCIONES VARIAS EN LOS PROGRAMAS DE PLC

Las ampliaciones y correcciones en los programas de PLC que se proponen a continuación se presentan en un solo capítulo debido a que su solución es sencilla y no requiere cambios complicados en el *hardware*.

6.1. Antecedentes

A lo largo de la operación de la planta se han ido identificado algunos errores en los programas de los PLC que componen el sistema de control de la planta; los mismos van desde errores de configuración hasta errores en la lógica del programa, así como la necesidad de ciertas ampliaciones en el programa.

Errores en la medición de temperaturas de puertos de escape de los motores, falla de detección y señalización de algunas alarmas, errores en la detección de fallo de sensor, así como la necesidad de incorporar nuevas mediciones analógicas, son algunos ejemplos de tales errores y ampliaciones necesarias.

En el presente capítulo se buscarán las mejores soluciones para corregir los errores mencionados y se propondrán algunas ampliaciones que se consideran necesarias para mejorar la automatización y monitoreo, y así evitar inconvenientes que pueden tener repercusiones en la operación de la planta a causa de falta de información o bien información errónea para el operador.

6.2. Corrección en la configuración de tarjetas de entradas de termocoplas en los paneles de control local

Las tarjetas de entradas de termocoplas que se utilizan son un tipo de entrada de PLC a las que se les puede configurar el tipo de termocopla a utilizar.

6.2.1. Descripción del problema

Se han observado incongruencias en las mediciones de temperatura de puertos de escape de los motores de combustión, como por ejemplo la unidad #7 ha presentado promedios de temperatura de hasta 80°C más bajas que las de otros motores, teniendo la misma carga. Además, comprobando dichas mediciones con las tomadas con un termómetro infrarrojo alternativo, se llega a la conclusión que las mediciones registradas eléctricamente por medio del PLC son erróneas.

En las unidades #9 y 10 se han notado también estas incongruencias, solo que en estos casos sucede solamente en algunos cilindros.

6.2.2. Solución del problema

Revisando la configuración de *Hardware*, se encontró que las tarjetas de entradas de termocoplas de las unidades #6, 7, 8, 9 y 10 están configuradas para trabajar con termocoplas tipo “J”; sin embargo, las utilizadas en los motores son tipo “K”. Este parámetro puede ser modificado en el *Byte 5* de la pestaña *settings* de la ventana de configuración de las respectivas tarjetas por medio del *software* de programación *Proficy Machie Edition*.

En este *Byte* el “0” representa termocopla tipo “J” y el “1” a la tipo “K”. En la figura 58 se muestra la ventana de configuración de la tarjeta de entrada de termocoplas 004 (*rack 0* y *slot 4*). Las tarjetas 005 y 006 que son también de este tipo, se deben configurar de la misma manera.

Figura 58. **Ventana de configuración de tarjetas de entrada de termocoplas**

| Parameters | Values |
|-------------------------|---------|
| Module ID: | 3 |
| Reference Address: | %I00001 |
| Reference Length: | 0 |
| Reference Address: | %Q00001 |
| Reference Length: | 0 |
| Reference Address: | %AI0001 |
| Reference Length: | 8 |
| Reference Address: | %AQ0001 |
| Reference Length: | 0 |
| Reference Address: | %R00001 |
| Reference Length (in): | 0 |
| Reference Address: | %R00001 |
| Reference Length (out): | 0 |
| Byte 1: | 1 |
| Byte 2: | 3 |
| Byte 3: | 0 |
| Byte 4: | 0 |
| Byte 5: | 1 |
| Byte 6: | 0 |
| Byte 7: | 0 |
| Byte 8: | 0 |
| Byte 9: | 0 |
| Byte 10: | 0 |
| Byte 11: | 0 |
| Byte 12: | 0 |
| Byte 13: | 0 |

Fuente: CATERPILLAR INC, Configuración de *hardware* PLC, *Project*: CEE_ori, *Target*: LCP06, *Rack*: main, *slot*: 4.

Sin embargo, en algunas tarjetas de termocoplas, a pesar de tener el *Byte* 5 en “0”, no presentaba problemas en la medición de temperatura, ya que precisamente estas tarjetas son de una versión más antigua en la que esta configuración se hace mediante un *dip switch* que se encuentra físicamente en la tarjeta.

Ahora bien, dejando configuradas las tarjetas mediante *software* como lo ilustrado en la figura 58, no es necesario hacerlo mediante el *dip switch*, ya que tiene prioridad la configuración hecha mediante *software*.

6.3. Corrección en la detección de algunas alarmas del ABP

En el panel del edificio auxiliar (ABP) se recolectan todas las señales de estado y condiciones anormales de todos los equipos auxiliares de la planta para luego ser enviados vía red *genius* hacia la consola del cuarto de control.

6.3.1. Descripción del problema

Existen cuatro alarmas que deberían anunciarse en la consola auxiliar (AXP) del cuarto de control y cuyas señales debidamente cableadas se obtienen en el panel del edificio auxiliar (ABP), pero que no se activan cuando existe una señal en las respectivas entradas del PLC. Las alarmas que presentan este problema son las siguientes:

- Resumen de alarmas en el separador agua-aceite
- Resumen de alarmas en la estación de tratamiento químico
- Resumen de alarmas en el tanque de condensado/desaerador
- Resumen de alarmas en el suavizador de agua

6.3.2. Solución del problema

Revisando la lógica del programa del PLC, se observó que las variables de entrada que corresponden a estas alarmas no existen en tal programa; sin embargo, los cables sí se encuentran físicamente conectados a las respectivas tarjetas de entrada.

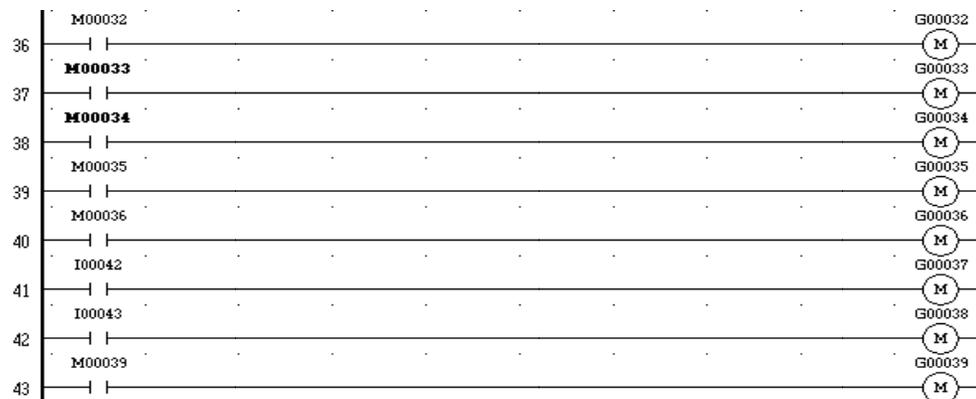
En la figura 59 se muestra el diagrama de escalera que se utiliza para enviar estas señales desde el panel de edificio auxiliar hacia la consola auxiliar a través de las marcas globales (G0000); en la siguiente tabla, se muestra la declaración de variables que se utilizan para estas alarmas.

Tabla XV. **Declaración de variables utilizadas en la detección alarmas del ABP**

| | |
|--------|--|
| I00037 | Resumen de alarmas en separador agua-aceite, (entrada) |
| I00040 | Resumen de alarmas en estación de tratamiento químico, (entrada) |
| I00041 | Resumen de alarmas en tanque de condensado/desaerador, (entrada) |
| I00046 | Resumen de alarmas en suavizador de agua, (entrada) |
| G00032 | Resumen de alarmas en separador agua-aceite, (hacia AXP) |
| G00035 | Resumen de alarmas en estación de tratamiento químico, (hacia AXP) |
| G00036 | Resumen de alarmas en tanque de condensado/desaerador, (hacia AXP) |
| G00039 | Resumen de alarmas en suavizador de agua, (hacia AXP) |

Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Diagrama de escalera actual para la detección de alarmas del ABP**

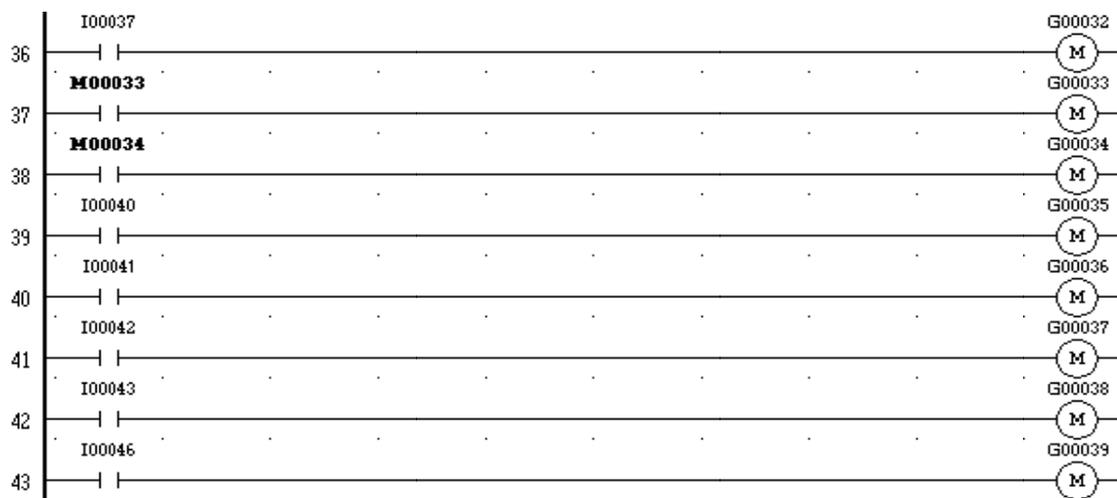


Fuente: CATERPILLAR INC, Programa de PLC, *Project. CEE_ori, Target. ABP, Program block: genius, Rung # 36-43.*

En las líneas 36, 39, 40 y 43 de la figura 59, se encuentran las variables en estudio y se notó que las marcas que activan las marcas globales que envían la señal de alarma hacia la consola auxiliar, no tienen ninguna bobina asociada.

Para solucionar este problema solamente es necesario cambiar estas marcas por las respectivas variables de entrada tal y como se ilustra en el diagrama de la figura 60.

Figura 60. **Diagrama de escalera corregido para la detección de alarmas en estudio**



Fuente: elaboración propia.

Debido a que estas alarmas se anuncian solamente en un panel remoto, es decir, en la consola auxiliar, no es necesario que los datos de entrada se utilicen en otro lugar más que en las marcas globales que envían la señal vía red de comunicación *genius* hacia la consola mencionada.

6.4. Corrección de luz indicadora de alarma de parada de emergencia

Para cada unidad de generación existen dos puntos de accionamiento de la parada de emergencia, uno el panel de control local y otro en el panel de control del generador, asimismo, en cada uno de estos paneles existe una luz indicadora que alerta al operador que ésta ha sido accionada.

6.4.1. Descripción del problema

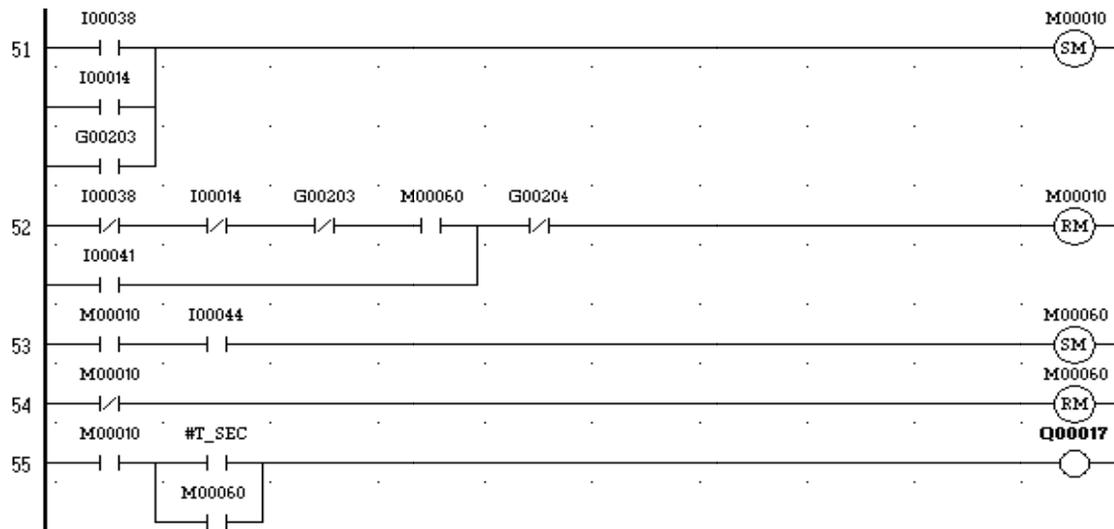
En el momento activarse la parada de emergencia de la unidad #7 desde cualquiera de sus puntos de activación, la respectiva luz indicadora en el panel de control del generador (GCP7) no se activa en ningún momento. Sin embargo, esto solo sucede cuando se realizan pruebas con el motor parado.

6.4.2. Solución del problema

El programa que controla las luces indicadoras del panel de control de generador #7 está cargado al PLC del panel de control del sistema #2 (S2C), ya que los paneles de control de generadores (GCP) carecen de PLC.

El diagrama de escalera actual para la activación de esta luz indicadora se muestra en la figura 61 y la correspondiente declaración de variables en la tabla XVI; puede notarse que en la línea 52, que corresponde al restablecimiento de la alarma, la entrada de selector I00041 (apagado/restituir) mantiene restablecida la alarma cuando el motor no está operando (G00204 cerrado) y no deja que se active cuando cualquiera de las tres condiciones en la línea 51 está activada.

Figura 61. **Diagrama de escalera actual para la detección y anuncio de parada de emergencia de motor #7**



Fuente: CATERPILLAR INC, Programa de PLC, *Project. CEE_ori, Target. S2C, Program block: Main, Rung #51-55.*

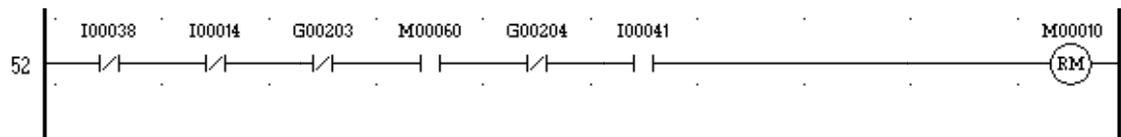
Tabla XVI. **Declaración de las variables utilizadas en el diagrama de la figura 61**

| Variable | Significado |
|----------|---|
| I00014 | Parada de emergencia desde el panel del sistema 2 (entrada) |
| I00038 | Parada de emergencia desde el panel del generador 7 |
| I00041 | Selector "apagado/restituir" en panel del generador 7 |
| I00044 | Reconocimiento de alarma en el panel de generador 7 |
| G00203 | Parada de emergencia desde el panel de control local 7 |
| G00204 | Motor #7 operando desde el panel de control local 7 |
| M00010 | Parada de emergencia de motor #7 |
| M00060 | Parada de emergencia de motor #7, alarma reconocida |
| Q00017 | Luz de parada de emergencia de motor #7 |

Fuente: elaboración propia.

Este problema se soluciona poniendo el contacto de la entrada I00041 en serie con los demás contactos de la línea 52, de manera que el restablecimiento de la alarma mediante el selector “apagado/restituir” sea solamente cuando la alarma ya no exista y así se pueda establecer la alarma en la línea 51. En la figura 62 se muestra la línea 52 ya corregida del diagrama de la figura 61, el resto del diagrama debe permanecer sin cambios.

Figura 62. **Diagrama corregido para el restablecimiento de la parada de emergencia del motor #7**



Fuente: elaboración propia.

6.5. Lubricación de motores después de apagados

La bomba de prelubricación de cada unidad de generación actualmente está programada para operar desde el momento que se pone a prelubricar hasta que la unidad de generación arranca, o bien, diez minutos después de la orden de prelubricación, si la unidad no arranca.

6.5.1. Descripción del problema

Debido a las altas velocidades de rotación de los turbocargadores de los motores hasta 30 000 rpm y a la inercia que estos tienen, después de apagados los motores, incluso cuando el motor está completamente parado, los turbocargadores continúan girando a cierta velocidad durante varios minutos y, debido a que el motor ya está parado, la bomba de lubricación principal también lo está, ya que esta está acoplada al eje cigüeñal del motor.

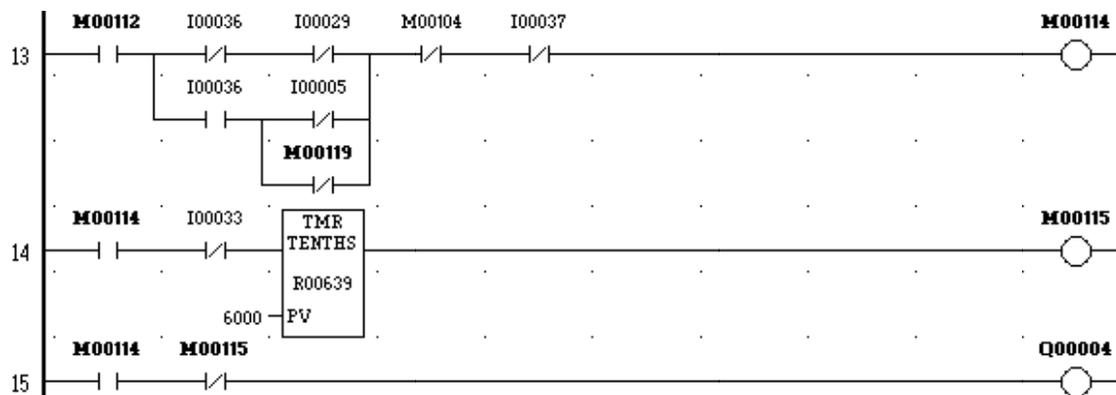
Por consiguiente el turbocargador continúa girando únicamente con el lubricante residual en el cojinete, provocando arrastres en el eje de los turbocargadores que pueden acabar con la vida útil de los mismos.

6.5.2. Solución del problema

Lo que se pretende es incorporar una postlubricación del motor, es decir, que la bomba de prelubricación, accionada mediante motor eléctrico, arranque en el momento que el motor pasa de “operando” a “no operando” y esta quede encendida durante el tiempo que los turbocargadores continúan girando a una velocidad considerable.

Para empezar, se presenta en la figura 63 la lógica del programa actual para arrancar la bomba de prelubricación a través de Q00004.

Figura 63. Diagrama de escalera actual para el arranque de la bomba de prelubricación



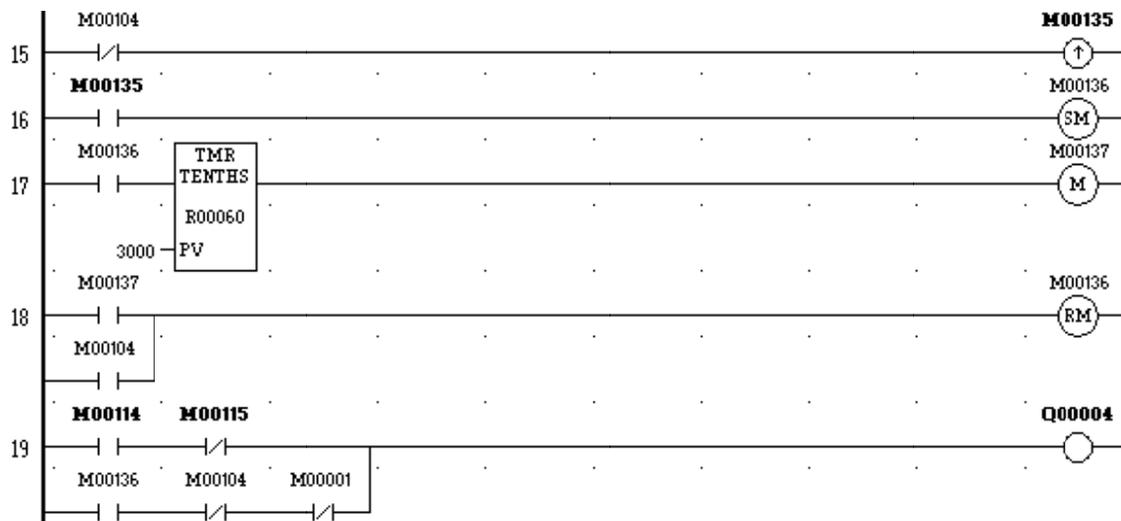
Fuente: CATERPILLAR INC, Programa de PLC, *Project:* CEE_ori, *Target:* LCP01, *Program block:* control, *Rung #* 13-15.

En el diagrama de la figura #63 puede notarse como es lógico que el arranque de dicha bomba es puramente previo al arranque del motor y esta para; ya sea en el momento en que el motor arranca, a través del contacto cerrado M00104 en la línea 13, o bien, diez minutos después que la bomba haya estado operando, a través de la marca M00115, activada por el temporizador R00639 y ajustado a 6000 décimas de segundo.

Ahora bien, para implementar la postlubricación se incorporará otro ramal que active la salida Q00004 en la línea 15 y cuya lógica previa se incorporará entre las líneas 14 y la 15.

El diagrama propuesto se ilustra en la figura 64 y su correspondiente declaración de variables en la tabla XVII. Se puede observar que la salida Q00004 ahora está en la línea 19.

Figura 64. **Diagrama de escalera propuesto para la postlubricación de motores**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Declaración de variables para el diagrama de la figura 64**

| Variable | Significado |
|-----------------|--|
| M00001 | Parada de emergencia detectada |
| M00104 | Motor operando |
| M00114 | Solicitud de prelubricación |
| M00115 | Parar prelubricación |
| M00135 | Transición de "operando" a "no operando" |
| M00136 | Activación de postlubricación |
| M00137 | Parar postlubricación |
| Q00004 | Relé de prelubricación |
| R00060 | Tiempo de postlubricación |

Fuente: elaboración propia.

El diagrama de la figura anterior pertenece y debe ser cargado al panel de control local (LCP) de cada motor. En la línea 15 de se creó la marca M00135, que es una marca de transición positiva, que convierte a un pulso instantáneo sus variables booleanas asociadas cada vez que por la bobina existe una transición de “0” a “1”; esto garantiza que la marca de activación de postlubricación (M00136) en la línea 16 se establezca únicamente cuando el motor pasa de “operando” a “no operando”.

Luego, la marca de activación de postlubricación, activa el temporizador R00060 que define el tiempo de postlubricación ya que este restablece la marca M00136 a través de la marca M00137 que es activada por el temporizador. Para garantizar que la bomba pare en el momento de un eventual arranque del motor principal antes de que transcurra el tiempo de postlubricación, se agrega en paralelo un contacto de M00104 (motor operando) para restablecer M00136 en la línea 18.

Con base en el experimento, se considera suficiente cinco minutos el tiempo de postlubricación, ya que después de transcurrido ese tiempo la velocidad de los turbocargadores ha llegado a un valor cero. Luego, se agrega un ramal a la línea 19 que activa la salida hacia el relé de prelubricación, este ramal incluye un contacto abierto de M00137 y uno cerrado de M00104 que garantiza que la bomba se apague cuando el motor arranca, esto con el objetivo de evitar contrapresiones elevadas en la bomba de prelubricación, provocadas por la bomba principal del motor.

Por último, se agregará un contacto normalmente cerrado de la parada de emergencia (M00001) para tener la opción de cancelar la postlubricación en caso la parada del motor sea por emergencia de alguna fuga de aceite lubricante y así evitar que continúe la fuga.

6.6. Corrección de la falsa alarma de fallo de sensor de transductores de presión de aceite

Los transductores de presión que se utilizan en el panel de control local son del tipo pasivos, es decir, solo utilizan dos hilos y necesitan de una alimentación externa, que, en este caso la da el propio PLC, y el transductor regula la cantidad de corriente dependiendo de la señal de presión que perciba.

6.6.1. Descripción del problema

Los transductores con salida de 4 a 20 mA utilizados para realizar mediciones de proceso en los motores de combustión, tienen un sistema de detección de fallo de sensor que consiste en la detección en el PLC de un miliamperaje fuera de rango, en este caso, ya sea menor que 2,5 mA o mayor 20,1 mA.

Sin embargo, los transductores de presión de aceite presentan el inconveniente de tener muy limitado su rango de entrada; este se encuentra de 0 a 600 kPa y aunque en condiciones normales de operación, la presión de aceite oscila alrededor de los 500 kPa, cuando el aceite se encuentra muy frío, como sucede en el arranque del motor su viscosidad es muy elevada y esto produce presiones muy elevadas, por encima de los 600 kPa. Como consecuencia, el transductor de presión dará una señal al PLC mayor de 20,1 mA, interpretándolo como “fallo de sensor”. A esto se le añade que el PLC desactiva el disparo del motor por baja presión de aceite cuando detecta un fallo en su respectivo sensor.

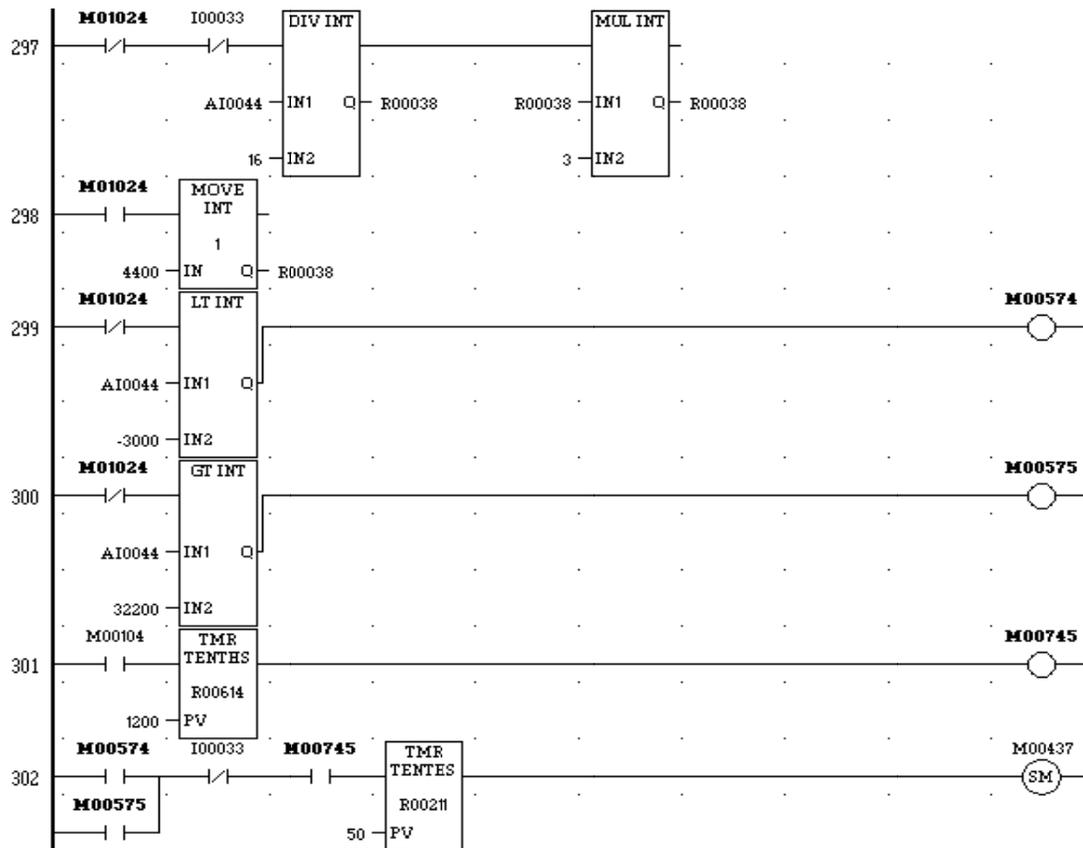
En la figura 65 se muestra el diagrama de escalera para la medición de presión de aceite hacia el motor y en la tabla XVIII su respectiva declaración de variables. El diagrama para la medición de presión de aceite hacia los filtros es similar.

Tabla XVIII. **Declaración de variables para el diagrama de la figura 65**

| Variable | Significado |
|-----------------|---|
| I00033 | Botón de restablecimiento |
| M01024 | Siempre apagado |
| M00104 | Motor operando |
| M00437 | Fallo de sensor de presión de aceite hacia motor |
| M00574 | Fallo de sensor de presión de aceite hacia motor (señal baja) |
| M00575 | Fallo de sensor de presión de aceite hacia motor (señal alta) |
| M00745 | Temporizador de retardo para fallo de sensor |
| AI0044 | Entrada analógica: presión de aceite hacia motor |
| AI0047 | Entrada analógica: presión de aceite hacia filtros |
| R00038 | Presión de aceite hacia motor |
| R00041 | Presión de aceite hacia filtros |
| R00614 | Temporizador de retardo para fallo de sensor |
| R00211 | Temporizador de retardo para fallo de sensor |

Fuente: elaboración propia.

Figura 65. Diagrama de escalera para la medición de presión de aceite hacia el motor

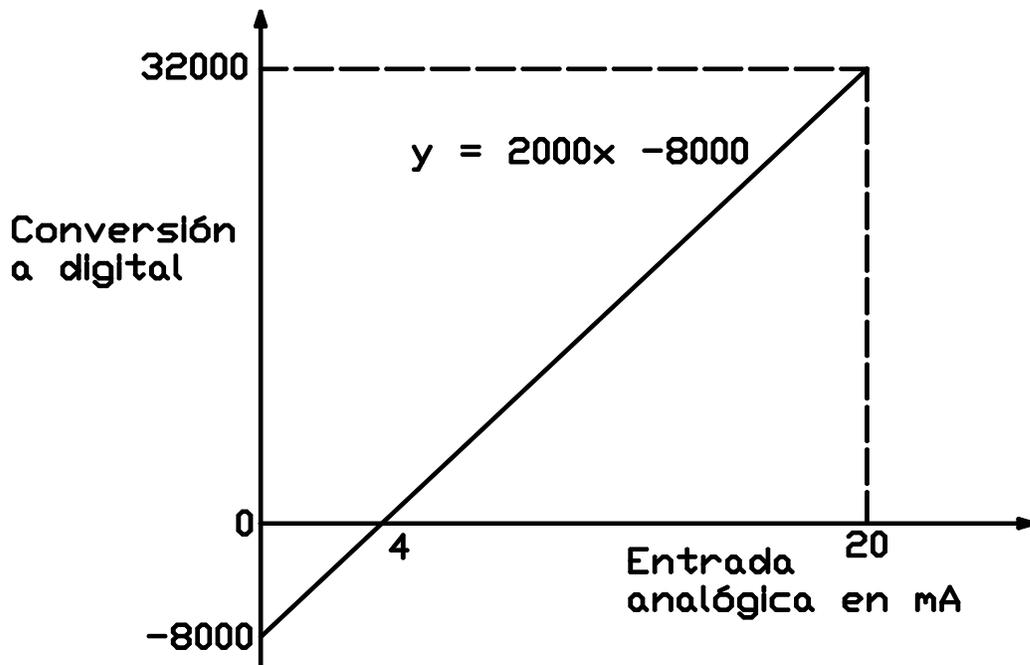


Fuente: CATERPILLAR INC, Programa de PLC, *Project: CEE_ori, Target: LCP01, Program block: signals, Rung # 297-302.*

Como puede notarse en la línea 297 de la figura #65, la entrada analógica AI0044 es dividida entre 16 y multiplicada por 3. Este factor se puede deducir con los valores de escala completa, es decir, 600 kPa equivalen a 20 mA y esto a 32 000 unidades; pero en el programa se trabajan las unidades en décimas de kilopascal, por lo tanto, 6000 décimas de kilopascal equivalen a 32 000 unidades y el factor para convertir la señal de entrada AI0044 a décimas de kilopascal es $6000/32\ 000 = 3/16$, es decir, dividir entre 16 y multiplicar por 3, que es lo que se hace en la línea 297.

En la línea 299 se detecta el fallo de sensor por bajo miliamperaje; el comparador “menor que” activa la marca M00574 cuando la entrada AI0044 es menor que -3000 que equivale a 2,5 mA. Para entender mejor esta conversión, en la figura 66 se vuelve a ilustrar la gráfica presentada en el capítulo 3, que relaciona la entrada en miliamperios con su conversión a digital por el PLC.

Figura 66. **Gráfica del comportamiento de la conversión a digital de la entrada de 4 a 20 mA**



Fuente: elaboración propia.

De igual forma, en la línea 300 de la figura 65 con un comparador “mayor que” se detecta el fallo de sensor por alto miliamperaje; en la línea 301 se pone un temporizador y en la 302 se unen los fallos de sensor por alto y bajo miliamperaje para dar una sola alarma a través de M00437.

6.6.2. Solución del problema

Una solución rápida podría ser aumentar el tiempo de retardo del temporizador R00614 de la línea 301 de la figura 65, con el objetivo de esperar que la temperatura del aceite se eleve lo suficiente para disminuir su viscosidad y así obtener presiones de aceite abajo de la escala completa.

Sin embargo, se demostró experimentalmente que diez minutos no son suficientes para que se dé este fenómeno y darle más tiempo no tendría sentido, ya que se perdería la función de la alarma de “fallo de sensor”.

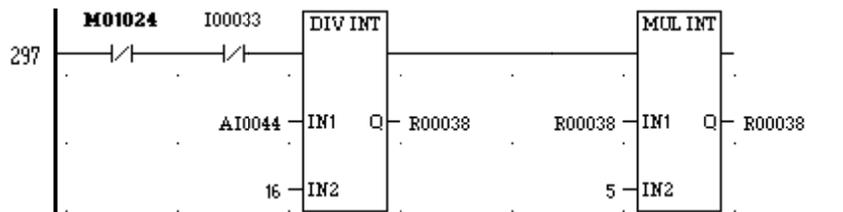
Además, cuando los filtros de aceite empiezan a saturarse, por naturaleza la presión de entrada hacia ellos se empieza a elevar sin importar la temperatura del aceite, llegando a valores superiores de la escala completa del transductor y dando por resultado una alarma innecesaria de “fallo de sensor”.

Por lo anterior, se considera como solución el cambio de los transductores de presión de aceite (antes y después de los filtros) por unos de mayor rango, en este caso serían de 0 a 1000 kPa.

Para implementar esto se debe cambiar el factor de conversión de digital a décimas de kilopascal que se usa en la línea 297 del diagrama de la figura 65.

Como la nueva escala completa sería, en este caso, de 10 000, el factor sería de $10\ 000/32\ 000 = 5/16$, de tal manera que la línea 297 quedaría como la ilustrada en la figura 67.

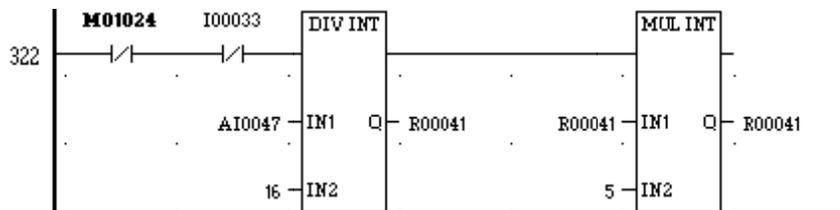
Figura 67. **Conversión de digital a décimas de kilopascal de la presión de aceite de entrada al motor (salida de los filtros)**



Fuente: elaboración propia.

El correspondiente diagrama para la presión de aceite de entrada a los filtros se encuentra en la línea 322 y se ilustra ya corregido en la figura 68.

Figura 68. **Conversión de digital a décimas de kilopascal de la presión de aceite de entrada a los filtros**

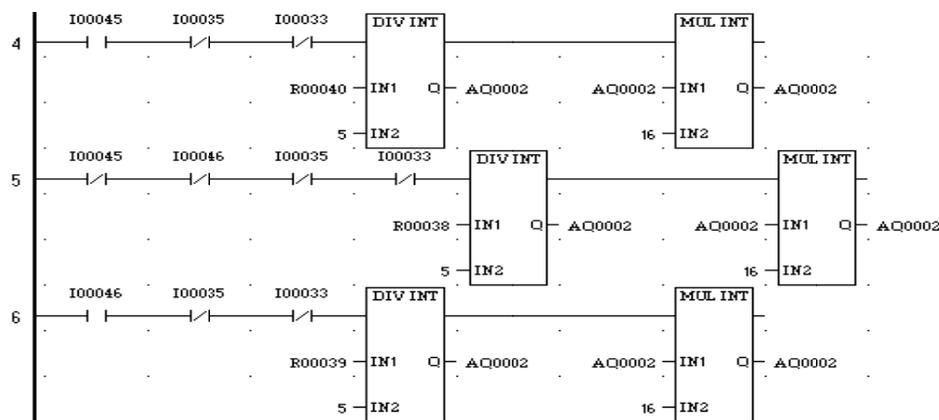


Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, también existe un indicador analógico de presión de aceite hacia el motor (después de los filtros) en el panel de control local, por lo que se tienen que modificar las correspondientes salidas analógicas, en este caso, el factor de conversión es el recíproco del de entrada, es decir, $16/5$. El diagrama de escalera ya corregido se muestra en la figura 69. En esta figura existen tres opciones de salida, ya que el mismo indicador analógico se utiliza para medir tres variables diferentes, de las cuales se puede elegir solo una a la vez mediante las entradas de selector I00045 e I00046.

Para el caso de presión de aceite, este corresponden al selector en la posición central, es decir, ambos contactos en su posición normal, que corresponde a la línea 5. La entrada I00035 Se refiere a la “prueba de lámpara” y la I00033, a “restablecimiento del sistema”.

Figura 69. **Diagrama de escalera de las salida analógica para la presión de aceite**



Fuente: elaboración propia.

6.7. Incorporación de nuevas mediciones analógicas

Las mediciones analógicas mantienen informado al operador sobre el estado del proceso, de modo que pueda ser monitoreado en tiempo real y se puedan tomar acciones antes que lleguen a niveles de alarma.

6.7.1. Descripción del problema

Existen tres mediciones analógicas de suma importancia que deberían ser monitoreadas desde el cuarto de control, pero que no están incluidas en el sistema de adquisición de datos de la planta, las cuales se describen a continuación:

- Nivel de tanque de lodos
- Presión de aire de arranque
- Voltaje en la barra de 22 kV

Debido a que la planta pasa largos períodos de tiempo fuera de línea a la espera de cualquier solicitud de generación por parte del Administrador del Mercado Mayorista, es de suma importancia mantener en un nivel óptimo la presión de aire de arranque y no tener que incurrir en indisponibilidades forzadas por esta causa; para esto es necesario monitorear esta magnitud desde el cuarto de control.

El nivel de tanque de lodos es otra lectura que debe ser monitoreada desde el cuarto de control y así disminuir la posibilidad de un derrame en dicho tanque.

Por último, cuando se realizan maniobras de energización y desenergización no existe forma de saber si en la planta se tiene tensión de entrada en la barra de 22 kV, si no, es hasta que se cierra el interruptor que alimenta el transformador de 22/13,8 kV y obtener mediciones en la barra de 13,8 kV.

6.7.2. Solución del problema

Se procederá a realizar los diagramas de escalera necesarios para implementar las tres entradas analógicas y el programa quede preparado para que estos datos puedan ser procesados por el sistema de adquisición de datos del cuarto de control.

La línea 511 de la figura anterior se utiliza para poner en cero cualquier señal recibida que corresponda a un valor menor que cero; esto a través del comparador “menor que” y el bloque “mover enteros”.

Tabla XIX. **Declaración de variables de los diagramas de escalera para medición del nivel de tanque de lodos**

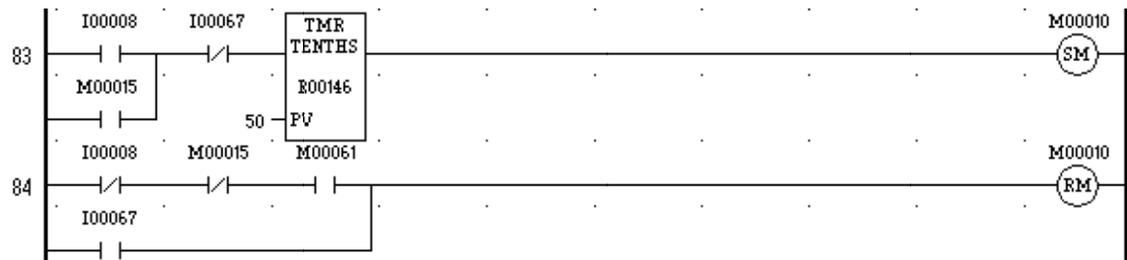
| Variable | Significado |
|-----------------|---|
| #ALW_OFF | Siempre apagado |
| I00008 | Entrada: alto nivel de tanque de lodos |
| I00067 | Restablecer sistema |
| M00010 | Alto nivel de tanque de lodos (alarma detectada) |
| M00015 | Alto nivel de tanque de lodos (detectada en el transductor) |
| M00061 | Alto nivel de tanque de lodos (alarma reconocida) |
| R00056 | Nivel de tanque de lodos |
| AI0010 | Nivel de tanque de lodos |

Fuente: elaboración propia.

En las líneas 512 y 513 se establece y se restablece la marca M00015 que se utiliza para activar la alarma de “alto nivel de tanque de lodos”, como puede verse en estas líneas, la marca se activa cuando el nivel es mayor que 3500 mm a través del comparador “mayor que” y se restablece cuando el nivel es menor que 3000 mm a través del comparador “menor que”.

Debido a que ya existe un *switch* de nivel que se utiliza para dar alarma de alto nivel en tanque de lodos, esta parte se utilizará solo como respaldo de la alarma original y se pondrá un contacto en paralelo de M00015, para activar la marca correspondiente, y un contacto normalmente cerrado en serie, para restablecerla. El diagrama se muestra en la figura 71.

Figura 71. **Diagrama de escalera modificado para la detección de la alarma de “alto nivel de tanque de lodos”**



Fuente: elaboración propia.

6.7.2.2. Presión de aire de arranque

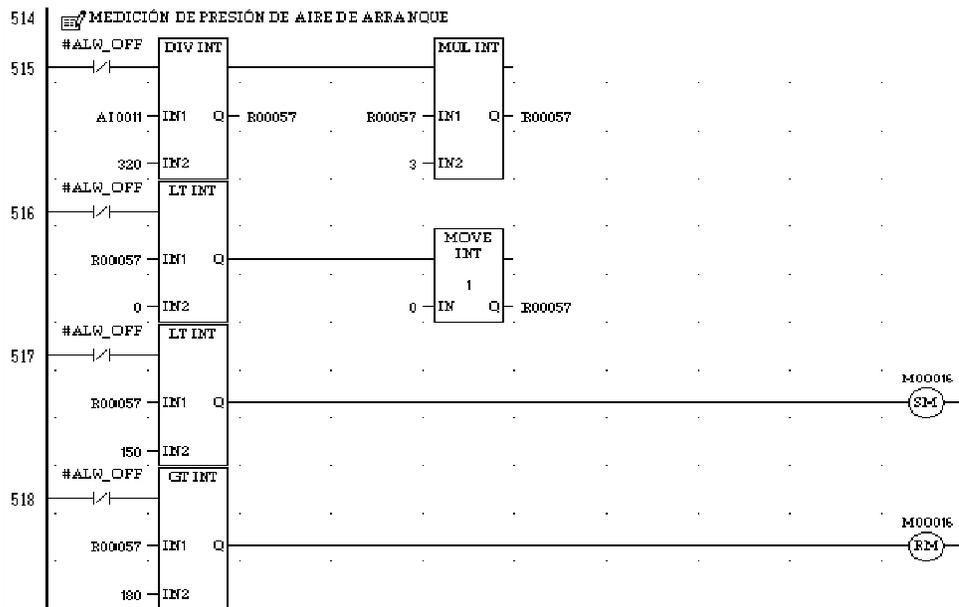
La máxima presión de aire de arranque a la que están calibrados los *switch* de presión de arranque y paro de los compresores es de 250 psi, por lo que se recomienda utilizar un transductor de presión de 0-300 psi/4-20 mA. Utilizando un transductor de este rango, el factor de multiplicación sería de $300/32\ 000 = 3/320$; así como se muestra en la línea 515 del diagrama de la figura 72 y su correspondiente declaración de variables en la tabla XX.

Tabla XX. **Declaración de variables de los diagramas escalera de medición de presión de aire de arranque**

| Variable | Significado |
|----------|--|
| #ALW_OFF | Siempre apagado |
| I00001 | Entrada: baja presión de aire de arranque |
| I00067 | Restablecer sistema |
| M00001 | Baja presión de aire de arranque(alarma detectada) |
| M00016 | Baja presión de aire de arranque (detectada en el transductor) |
| M00071 | Baja presión de aire de arranque (alarma reconocida) |
| R00057 | Baja presión de aire de arranque |
| AI0011 | Baja presión de aire de arranque |

Fuente: elaboración propia.

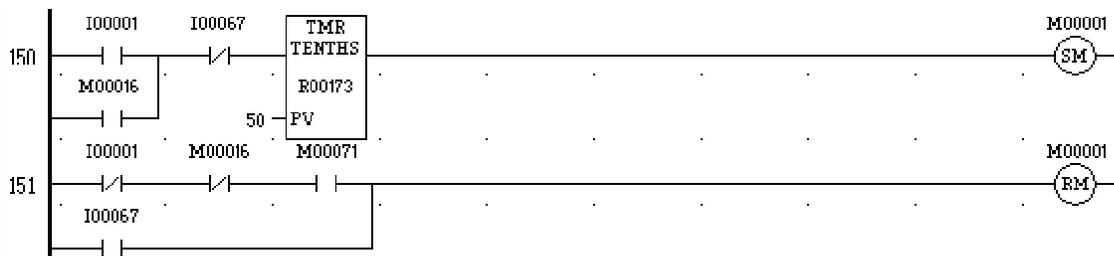
Figura 72. Diagrama de escalera de entrada analógica para la medición presión de aire de arranque



Fuente: elaboración propia.

De la misma forma como se hizo en la sección anterior, se creará un respaldo para la alarma de “baja presión de aire de arranque”, cuyo diagrama se muestra en la figura 73 y en las líneas 517 y 518 de la figura 72. Estos diagramas pertenecen al PLC de panel del edificio auxiliar (ABP).

Figura 73. Diagrama de escalera modificado para la detección de la alarma de “baja presión de aire de arranque”



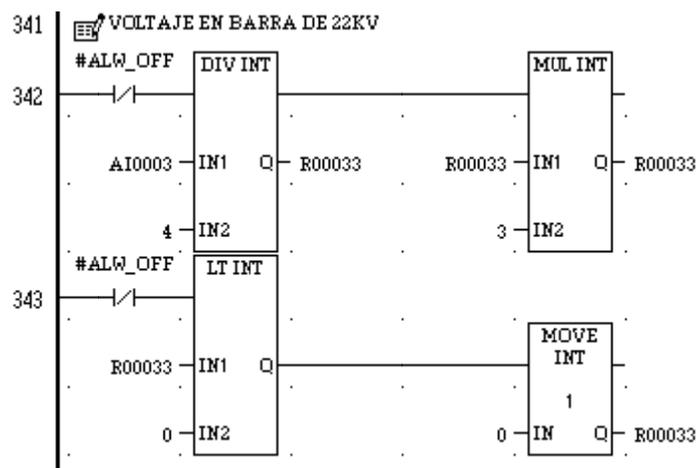
Fuente: elaboración propia.

6.7.2.3. Medición de voltaje en la barra de 22 kV

A diferencia de los diagramas de las dos secciones anteriores, en este caso los diagramas que se diseñarán pertenecen al PLC de la consola auxiliar (AXP), ya que es el más cercano a la medición que se desea realizar.

Para implementar esta medición se utilizarán los transformadores de potencial (PT) instalados en la barra de 22 kV de la subestación del Centro de Energía Escuintla, cuya relación de transformación es de 24 000:120 conectados en delta abierta. Además, se necesita un transductor de voltaje a corriente de 0-120 V/4-20 mA. Con estos datos se obtiene que 24 000 V equivalen a 20 mA y a 32 000 unidades en la conversión analógico-digital que hace el PLC; por lo que el factor de conversión sería de $24\ 000/32000 = 3/4$, es decir, la entrada analógica dividirla entre 4 y multiplicarla por 3. El diagrama de escalera se muestra en la figura 74.

Figura 74. Diagrama de escalera de entrada analógica para la medición voltaje en la barra de 22 kV

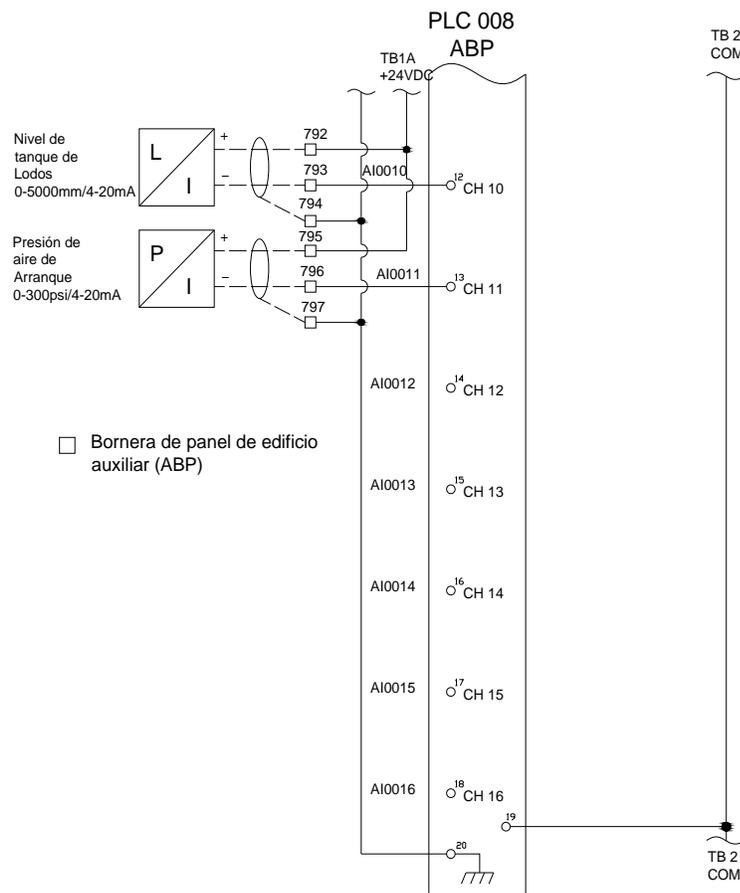


Fuente: elaboración propia.

6.7.3. Diagramas de cableado hacia el controlador lógico programable

Para el caso de la medición de nivel de tanque de lodos y presión de aire de arranque que pertenecen al panel del edificio auxiliar (ABP) el diagrama de cableado hacia el PLC se muestra en la figura 75. En esta figura se representa el PLC mediante un corte en la parte superior, ya que los canales anteriores al #10 ya están siendo utilizados pero no se representan en la figura.

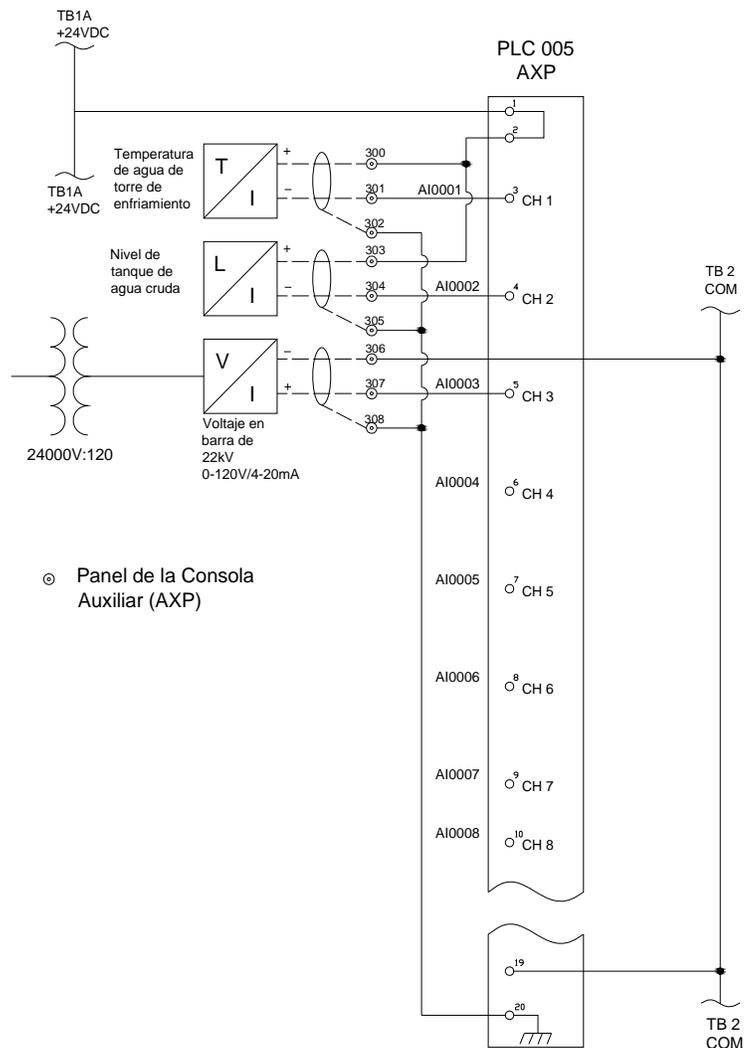
Figura 75. Diagrama propuesto de cableado de entradas analógicas hacia el PLC del panel del edificio auxiliar



Fuente: elaboración propia.

Para el caso de la medición de voltaje en la barra de 22 kV cuyo programa pertenece al panel de la consola auxiliar (AXP) del cuarto de control, el diagrama de alambrado se representa en la figura 76. En los canales # 1 y 2 están representadas las dos entradas ya existentes, la parte propuesta está en el canal #3.

Figura 76. **Diagrama propuesto de cableado de entradas analógicas hacia el PLC de la consola auxiliar (AXP)**



Fuente: elaboración propia.

7. AGREGADOS EN LOS PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN

Debido a los cambios en la operación de los sistemas, que implican la implementación de las propuestas hechas en este trabajo, se procederá a continuación a describir, donde aplique, los procedimientos de operación modificados correspondientes a cada cambio realizado en la automatización de la planta.

7.1. Automatización del sistema de lubricación de cojinetes de generador

El arranque de las bombas de lubricación de cojinetes de generador es parte del procedimiento de arranque de las unidades de generación, por lo que el único cambio sería: poner el selector “manual-automático” ubicado en el panel de control de cojinetes de generador (PCG) en la posición “automático”, o bien ponerlo en la posición “manual” cuando se necesite arrancar las bombas, a efecto de realizar alguna prueba, y la unidad motor-generador no requiera ser arrancada.

7.1.1. Procedimiento para reconocer y restablecer una alarma de “fallo de lubricación de cojinetes de generador”

- En el momento de detectarse una alarma de “fallo de lubricación de cojinetes de generador”; la alarma se anunciará en el (LCP) mediante una luz indicadora, plenamente identificada, que quedará destellando, la alarma también se anuncia en el sistema *scada* del cuarto de control.

- La alarma debe ser reconocida por el operador del edificio de generación mediante un pulso al selector de reconocimiento de alarma identificado como “ack” en el panel de control local (LCP), y por el operador de cuarto de control mediante un pulso al botón “ack” de la pantalla de alarmas del sistema scada. La luz indicadora dejará de destellar en el panel de control local y se quedará encendida fijamente.
- El operador del edificio de generación se debe dirigir hacia el panel del control de cojinetes de generador (PCG) e identificar cuál de las tres posibles alarmas está expuesta mediante una luz indicadora plenamente identificada que se encuentra destellando, y reconocerla mediante un pulso al botón de “reconocer alarma” debidamente identificado. La luz o luces indicadoras dejarán de destellar y quedarán encendidas fijamente.
- El operador del edificio de generación debe informarle al operador de cuarto de control sobre la alarma expuesta, realizar las acciones necesarias para corregir el problema e informar nuevamente al cuarto de control. Una vez corregido el problema, la luz o luces indicadoras expuestas en el panel de control de cojinetes de generador (PCG) se apagarán al igual que la luz indicadora “fallo de lubricación de cojinetes de generador” del panel de control local (LCP). La alarma quedará restablecida.
- El operador del edificio de generación puede realizar en cualquier momento “prueba de lámparas” en el panel de control de cojinetes de generador, mediante el selector debidamente identificado, y así corroborar el estado de los bombillos y cambiarlos si fuera necesario.

7.2. Sistema de control de nivel de los tanques de condensado

El sistema de control de nivel de los tanques de condensado es completamente automático, por lo que el operador solamente debe monitorear constantemente su buen funcionamiento, revisando que ambos tanques de condensado se encuentren dentro de sus límites de operación. En caso de mal funcionamiento del sistema automático, puede existir cualquiera de los dos inconvenientes que se describen a continuación:

- Si el tanque de condensado principal se encuentra con nivel bajo, se debe revisar si existe condensado en el tanque exterior y trasegarlo mediante la bomba en control manual. Si no existe condensado, está la opción de nivelarlo con agua suavizada de reemplazo, mediante la válvula manual de *bypass* que está en paralelo con la válvula automática.
- Si el tanque de condensado exterior se encuentra con nivel alto, se puede deber a dos posibles causas: el nivel del tanque principal está alto y no exista permiso para trasegar; entonces, se debe dar aviso al instrumentista para que revise el sistema ya que la válvula automática está inyectando demasiada agua suavizada o bien la válvula de *bypass* puede no estar sellando bien. La otra posible causa es que esté fallando el control de la bomba del tanque exterior, o bien, que exista algún problema mecánico en esta.

7.3. Protección de calderas de recuperación por bajo nivel de agua

- En el momento de detectarse la alarma de nivel extremadamente bajo en cualquiera de las dos calderas de recuperación, la alarma se anunciará en la consola auxiliar del cuarto de control mediante el destello de una luz indicadora, debidamente identificada, y se quedará encendida fijamente cuando el operador de cuarto de control reconozca la alarma mediante el selector “ack”.
- El motor que corresponde a la caldera de recuperación con bajo nivel, se disparará inmediatamente para evitar daños en la tubería de la caldera.
- El operador de cuarto de control debe dar aviso vía radio al operador del edificio de generación y su auxiliar, sobre el evento.
- El auxiliar de operación debe revisar el nivel de la caldera de recuperación y agregarle agua mediante la válvula de *bypass* de la válvula automática, hasta llegar al nivel de operación, es decir, cuando el nivel está a la mitad del visor. En caso no se incremente el nivel, es probable que existan problemas con la bomba alimentadora de agua de calderas; se debe poner en servicio la que está en reserva.
- El operador del edificio de generación debe hacer los preparativos para arrancar nuevamente el motor.
- Seguir los procedimientos normales de arranque de motor.

- El operador de cuarto de control debe dar aviso a personal de mantenimiento sobre el mal funcionamiento del sistema de control para que revise y repare.

7.4. Centrifugación de aceite de motores

Cada una de las cinco centrífugas de aceite está destinada para trabajar con dos motores, de acuerdo con la tabla siguiente:

Tabla XXI. **Correspondencia entre centrífugas de aceite y motores**

| Centrífuga | Motores |
|-------------------|----------------|
| # | # |
| 1 | 1 y 2 |
| 2 | 3 y 4 |
| 3 | 5 y 6 |
| 4 | 7 y 8 |
| 5 | 9 y 10 |

Fuente: elaboración propia.

Después del arranque de motores, se debe proceder a arrancar las centrífugas de aceite de la siguiente manera:

- Verificar que las válvulas manuales de entrada y salida del cárter de los motores hacia las centrífuga estén abiertas
- Verificar que las válvulas manuales de entrada y salida de las centrífugas hacia los motores estén abiertas.

- En el panel de edificio auxiliar (ABP), el operador debe poner el selector de modo de operación de cada centrífuga en la posición “automático” si se van a centrifugar los dos motores, o en la posición “manual” si por alguna razón solo se va a centrifugar un motor.
- Abrir las válvulas automáticas: si se seleccionó el modo automático, se debe seleccionar el número de motor por el cual se desea que empiece la centrifugación mediante un pulso al botón correspondiente; treinta minutos después se hará automáticamente el cambio para el otro motor. Si se seleccionó el modo manual, se debe seleccionar el motor que se desea centrifugar de manera continua, mediante el botón que corresponde.
- Una vez abiertas las válvulas automáticas realizar el procedimiento normal de arranque de las centrífugas.
- Si se desea centrifugar los dos motores en modo manual, se puede seleccionar el siguiente motor en cualquier momento; las válvulas automáticas del actual motor se cerrarán y las del siguiente motor se abrirán.
- En el momento de seleccionar un motor, la luz indicadora del botón luminoso quedará destellando y se quedará encendida continuamente hasta que el PLC detecte que la válvula está completamente abierta. Si no se queda encendida, se debe revisar que la válvula esté físicamente abierta y dar aviso al instrumentista para que revise, ya sea que la válvula no se haya abierto o que el sensor no la haya detectado.

Después de parados los motores se debe parar el proceso de centrifugación:

- Realizar el procedimiento normal de paro de las centrífugas de aceite.
- Cerrar las válvulas automáticas: ya sea mediante un pulso al botón del motor que se esté centrifugando, o bien, pasando el selector de modo de centrifugación a la posición "OFF". Inmediatamente las válvulas automáticas se cerrarán.
- Por ningún motivo cerrar las válvulas automáticas antes de haber concluido el proceso de paro de las centrífugas, ya que podrían formarse contrapresiones elevadas en la bomba alimentadora de la centrífuga.
- Las válvulas manuales de entrada y salida del cárter y de las centrífugas pueden quedar abiertas, listas para el próximo proceso de centrifugación.

CONCLUSIONES

1. Implementando la automatización del sistema de lubricación de cojinetes de generador y un sistema de detección y anuncio de las condiciones anormales en las variables de proceso, se obtiene un sistema más confiable, en el que se reducen los errores de operación y las indisponibilidades por fallas en los cojinetes.
2. Al utilizar equipos de instrumentación electrónicos en el sistema de recuperación de condensado y agua de reemplazo, se puede coordinar el llenado del tanque de condensado principal, dándole prioridad al condensado procedente de tanque exterior y posteriormente al agua de reemplazo; de esa manera se obtienen ahorros, principalmente en el consumo de químicos y agua suavizada de reemplazo y además se evitan vertimientos de condensado en los tanques principal y exterior.
3. Habiendo implementado la protección por nivel extremadamente bajo de agua en las calderas de recuperación y disparando los motores de combustión correspondientes, se evitarán fallas catastróficas con daños en la infraestructura y hasta consecuencias fatales que pudieran ocasionar la operación de las calderas en estas circunstancias.
4. La corrección de las alarmas que tienen problemas en su detección y anuncio, permite que el operador se informe adecuadamente sobre las condiciones anormales en los sistemas auxiliares, ayudando así a la operación óptima de la planta.

5. Al realizar las modificaciones y ampliaciones necesarias en el programa de PLC que controla la apertura y cierre de las válvulas automáticas de centrifugación de lubricante de motores, de modo que se adapte a la nueva configuración de correspondencia entre centrífugas y motores, se obtuvo un sistema más confiable y eficaz donde el error humano se minimizó, pudiendo así evitar derrames y mezclas de aceite lubricante entre motores.
6. La corrección en la configuración de las tarjetas de entrada de termocoplas, correspondiente a los puertos de escape de motores, ha dado como resultado lecturas reales de estas temperaturas, que permiten retroalimentar al personal de mantenimiento y operaciones, sobre el estado real de los cilindros del motor de combustión.
7. La lubricación de los motores durante cinco minutos (mediante la bomba de prelubricación) después de que estos hayan parado, minimiza la probabilidad de falla en los rodamientos de los turbocargadores, ya que por su inercia, estos continúan girando después que la unidad ha parado completamente y el motor deja de accionar la bomba de aceite principal.
8. La falsa alarma de fallo de sensor en transductores de presión de aceite, provoca que el motor esté desprotegido contra una baja presión de aceite, ya que el disparo del motor por esta causa se bloquea cuando existe “fallo de sensor” en su correspondiente transductor. La corrección de esta falsa alarma, instalando un transductor adecuado, evita que se dé este inconveniente que pone en riesgo la integridad del motor.

9. La incorporación de nuevas mediciones de proceso al sistema de control general de la planta, facilita el monitoreo de las variables involucradas, haciendo más seguras las maniobras de interruptores, el control de nivel del tanque de lodos y la presión de aire de arranque.

10. Los beneficios que se obtienen a raíz de la implementación de las propuestas hechas en este trabajo de graduación, son del tipo de confiabilidad y seguridad en la operación de la planta y aunque no tienen relación directa con la producción de energía, sí representan ahorro de algunos insumos y minimizan la probabilidad de falla de piezas importantes en los equipos de la planta; por lo que la inversión necesaria no es representativa en comparación con sus beneficios.

RECOMENDACIONES

1. Las propuestas hechas en los capítulos 4 y 5 y en las secciones 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 no requieren inversión alguna para su implementación, simplemente se proponen cambios y ampliaciones en la lógica de los programas de PLC, por lo que no hay ningún inconveniente en ponerlos en marcha inmediatamente. Las modificaciones hechas en el programa quedaron guardadas en un archivo llamado "CEE_mod", en la misma carpeta del archivo original.
2. En el resumen de alarmas de falla de lubricación de cojinetes de generador, es preferible utilizar *switch* de flujo ya que el *switch* de presión presenta el inconveniente de no accionar la alarma en el caso de obstrucción de tubería de lubricación.
3. En el control de nivel del tanque de condensado, la utilización de transmisores de nivel electrónicos en vez de los neumáticos, facilita la coordinación y la prioridad que se le debe dar al retorno de condensado contra el agua suavizada.
4. La implementación de las nuevas lecturas analógicas, así como el cambio de rango en la lectura de presión de aceite, que implica el cambio de rango en el transductor, requiere la correspondiente ampliación en el programa del sistema *scada*; sin embargo, debido a la carencia de licencia de este *software*, es necesaria la contratación de la empresa que realiza este trabajo.

5. La implementación parcial o total de las propuestas hechas en este trabajo de graduación, requiere el entrenamiento sobre los cambios que implica en los procedimientos de operación.

BIBLIOGRAFÍA

1. CATERPILLAR. *Electrical Controls Parts Manual*. Vol. 1 y 2. USA: Caterpillar, 1995. 387 p.
2. CENTRO DE ENERGÍA ESCUINTLA. *Manual de adiestramiento*. Vol. 1 y 2. México: General PHYSICS Corporation, 1995. 412 p.
3. GE FANUC AUTOMATION. *CIMPLICITY® Machine Edition*. México: GE FANUC AUTOMATION, 2002. 148 p.
4. _____. *Logic Developer PLC Software para programación de PLCs*. México: GE FANUC AUTOMATION, 2002. 109 p.
5. _____. *PLC Series 90-30 Especificaciones del módulo de E/S*. México: GE FANUC AUTOMATION, 2002. 449 p.
6. _____. *PLC Series 90™-30 Manual de instalación y hardware*. México: GE FANUC AUTOMATION, 2002. 461 p.
7. YORK-SHIPLEY. *Service and Parts Manual Boiler section*. New York City: York Shipley, 1995. 87 p.

APÉNDICES

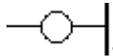
Apéndice 1. Descripción de los elementos de un diagrama eléctrico



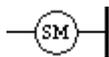
En un diagrama de escalera: contacto normalmente cerrado, deja pasar la señal cuando la variable booleana asociada está desactivada (falso, 0)



En un diagrama de escalera: contacto normalmente abierto, deja pasar la señal cuando la variable booleana asociada esta activada (verdadero, 1)



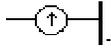
En un diagrama de escalera: bobina, cuando recibe una señal, la variable booleana asociada es activada (1). Cuando no recibe señal, la variable booleana asociada es desactivada (0).



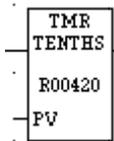
En un diagrama de escalera: bobina de activación, cuando recibe una señal, la variable booleana asociada es activada (1), cuando la señal desaparece, se mantiene activada; para desactivarla debe recibir una señal la bobina de desactivación (RM).



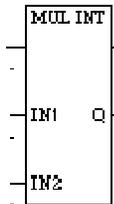
En un diagrama de escalera: bobina de desactivación, cuando recibe una señal, la variable booleana asociada es desactivada (0), cuando la señal desaparece se mantiene desactivada; para activarla se debe usar la bobina de activación (SM).



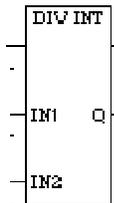
En un diagrama de escalera: bobina de transición positiva, cuando la señal que recibe pasa de “0” a “1” (transición positiva), activa la variable booleana asociada a “1” durante un escaneo del programa.



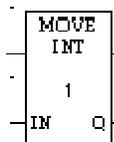
En un diagrama de escalera: temporizador, cuando recibe una señal, incrementa su valor cada décima de segundo y se restablece su valor cuando deja de recibir la señal. El temporizador deja pasar la señal después que su valor llega al valor preestablecido en “PV”.



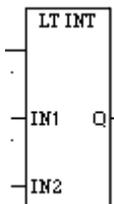
En un diagrama de escalera: multiplica un número entero almacenado en la entrada “IN1” por otro almacenado en la entrada “IN2” y el producto lo almacena en la variable de salida asignada en “Q”. “IN1” e “IN2”; pueden ser variables o constantes.



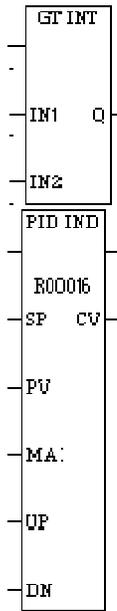
En un diagrama de escalera: divide el número entero almacenado en la entrada “IN1” entre el número entero almacenado en “IN2” y el cociente; lo almacena en la variable de salida asignada en “Q”. “IN1” e “IN2” pueden ser variables o constantes.



En un diagrama de escalera: cuando recibe una señal, la variable asignada a la salida “Q” toma el valor de la constante o variable asignada en “IN”.



En un diagrama de escalera: compara dos números enteros y energiza la salida “Q” si el número almacenado en “IN1” es menor que el almacenado en “IN2”.



En un diagrama de escalera: compara dos números enteros y energiza la salida “Q” si el número almacenado en “IN1” es mayor que el almacenado en “IN2”.

En un diagrama de escalera: control automático de lazo cerrado PID (Proporcional, integral, derivativo).

SP: *set point* o punto de ajuste.

CV: variable de control de salida.

PV: variable de proceso.

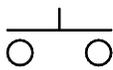
MA: cuando recibe una señal, la función PID está en modo manual.

UP: cuando recibe una señal y está en modo manual, la variable de control CV incrementa su valor una vez por cada barrido.

DN: cuando recibe una señal y está en modo manual, la variable de control CV decrementa su valor una vez por cada barrido.



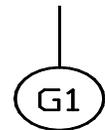
Bomba de fluidos



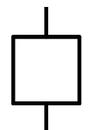
Botón pulsador



Conexión a tierra



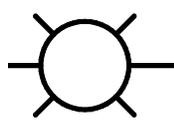
Generador eléctrico



Interruptor de alta tensión



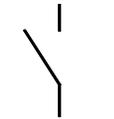
Interruptor termomagnético de baja tensión



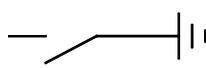
Luz indicadora



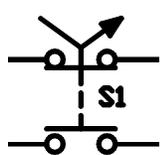
Relé de control de cuatro polos



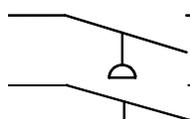
Seccionador de alta tensión



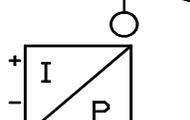
Seccionador de puesta a tierra



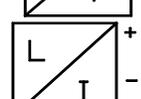
Selector de dos posiciones, un contacto normalmente abierto y el otro normalmente cerrado



Switch de flujo



Switch de nivel



Transductor de corriente a presión



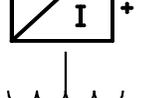
Transductor de nivel



Transductor de presión



Transductor de temperatura



Transductor de voltaje



Transformador



Válvula actuada por aire

Apéndice 2. **Material y accesorios a utilizar para la automatización de lubricación de cojinetes de generador**

| Can-tidad | Unidad | Descripción | Costo* (quetzales) |
|--|---------------|---|-------------------------------|
| 1 | Unidad | Gabinete metálico NEMA 4 300X300X210mm | 964,75 |
| 2 | Unidad | Mini Contactor 8A un contacto auxilia NO, bobina 120VAC | 340,00 |
| 2 | Unidad | Guardamotor 4-6A 1NO, 1NC | 850,00 |
| 1 | Unidad | Luz indicadora blanca 120V* 22mm | 150,00 |
| 2 | Unidad | Luz indicadora ámbar 24V 22mm | 300,00 |
| 1 | Unidad | Luz indicadora roja 24V 22mm | 150,00 |
| 1 | Unidad | Selector de dos posiciones sostenidas 22mm con dos contactos NO | 135,00 |
| 2 | Unidad | Botón pulsador rasante 22mm negro 1NO c/u | 100,00 |
| 40 | Unidad | Bornera para cable AWG # 16 | 340,00 |
| 6 | Unidad | Bornera para cable AWG # 12 | 90,00 |
| 2 | Unidad | Switch de Flujo | 3 136,00 |
| 28 | Metro | Cable de control 12X AWG # 16 | 1 624,00 |
| 3 | Unidad | Conector para cable TSJ 12X AWG # 16 | 105,00 |
| 10 | Metro | Cable TSJ 3X AWG#12 | 117,50 |
| 5 | Unidad | Conector para cable TSJ 3X AWG#12 | 130,00 |
| 18 | Metro | Cable de control 2X AWG#16 | 85,50 |
| 10 | Unidad | Conector para cable 2X AWG#16 | 300,00 |
| 1 | Unidad | Rele 24VDC 3PDT con su base | 126,00 |
| 1 | Metro | Riel DIN perforado | 35,00 |
| 1 | Metro | Riel UNICANAL liso | 125,00 |
| 6 | Unidad | Tuerca UNICANAL 3/8" con tornillo | 27,00 |
| 1 | Metro | Canaleta para alambrado interno | 30,00 |
| 20 | Unidad | Sujetador de cables para alambrado interno de gabinetes | 50,00 |
| 1 | Unidad | Identificador de cable | 120,00 |
| TOTAL | | | Q 9 304,75 |
| *Costos según cotizaciones realizadas en enero de 2011 | | | |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Tabla comparativa de cotizaciones y características de transmisores de nivel para el sistema de control de nivel de tanques de condensado**

| Marca | Tipo | Características | Precio (Q) |
|--|---------------------------|--|------------|
| Modulevel Magnetrol | Montaje superior de flote | E3A-BG3A-H21 - <i>Electronic</i> Modulevel, montaje superior, Transmisor de nivel de flote Carcasa: Aluminio fundido, (2) 3/4" NPT elec. Tipo 4X (IP66) Entradas/salidas: 11-36 VDC / 4-20 mA (<i>HART</i>) Material de la cámara: Acero al carbón Conexión al proceso: 3" ANSI RF 150# ANSI (Acero al carbón) Localización de conexión: Superior Rango de nivel (mm): 14,00" (356) X032-3110-001 - CABLE ASSY ADJ. X = 10 pies de cable | 36 449,00 |
| Modulevel Magnetrol | Montaje superior de flote | E3A-KG3A-H41 - <i>Electronic</i> Modulevel montaje superior, Transmisor de nivel de flote Carcasa: aluminio fundido, (2) 3/4" NPT elec. Tipo 4X (IP66) Entradas/salidas: 11-36 VDC / 4-20 mA(<i>HART</i>) Material de la cámara: Acero al carbón Conexión al proceso: 3" ANSI RF 150# ANSI (Acero al carbón) Localización de conexión: superior Rango de nivel (mm): 14,00" (356) X032-3110-001 - CABLE ASSY ADJ. X = 10 pies de cable Se puede instalar la electrónica remotamente: 1 037-3226-025 -Cable de conexión remota, Longitud=25 pies (8 m) | 37 178,80 |
| KROHNE Serie OPTI FLEX 1300C | Radar de onda guiada | Sensor de nivel tipo radar de onda guiada Sonda rígida de acero inoxidable 316 Largo de la sonda: 24 pulgadas Conexión al proceso: 3/4" Rango de temperatura: de -20 a 300 °C Carcasa de aluminio anonizado Alimentación: de 20 a 30 VDC Salida 4-20 mA dos hilos Protocolo: <i>hart</i> Certificación FM | 22 408,00 |

Continuación de apéndice 3.

| | | | |
|--|----------------------|---|-----------|
| Endress & Houser Tipo Levelflex FMP40 | Radar de onda guiada | Modelo básico: Levelflex M FMP40 aprobación: áreas no peligrosas Sonda: barra 6mm Longitud de la sonda: 36 pulgadas, barra 6 mm, 316L Material de sellos: vitón; -30 a 150°C/-22 a 302°F Conexión al proceso: ANSI NPT3/4, 316L Salida: 2-hilos 4-20 mA <i>SIL HART</i> Tipo de sonda: compacta, versión básica | 17 965,00 |
|--|----------------------|---|-----------|

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Tabla comparativa de cotizaciones y características de transductores de corriente a presión (IP) para el sistema de control de nivel de tanques de condensado**

| Marca | Características | Precio Q |
|-------------|--|----------|
| Control Air | Entrada: 4-20mA Salida: 3-15 psi Incluye filtro regulador Incluye dos manómetros: uno para aire de alimentación y otro para salida de control | 5 315,00 |
| Dwyer | Modelo: IP-42 Entrada: 4-20 mA Salida: 3-15 psi | 3 808,00 |
| Endress | Entrada: 4-20mA Salida: 0-15 psi | 7 265,00 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Tabla comparativa de cotizaciones y características de *switch* de nivel para el sistema de control de nivel de tanques de condensado**

| Marca | Tipo | Características | Precio (Q) |
|--|------------------|--|-------------------|
| Mercoïd | Flote | Modelo:123-153 Especial para control de nivel de calderas, tanques condensados, desaereadores Tiene un mecanismo que elimina la operación frecuente debido a cambios súbitos en el nivel de agua Cuerpo: hierro fundido Flote: 304 acero inoxidable Presión límite: 150 psi Temperatura límite: 185°C Mínimo S.G.: 0.88 | 5 292,00 |
| W.E. Anderson | Vertical, flote | Modelo: F7-ST713123-153 Montaje vertical Aplicación: aceites, agua, químicos Material: 316 Acero inoxidable Temperatura límite: 149°C Presión límite: 750 psi Mínimo S.G.: 0.8 | 3 808,00 |
| Mercoïd | Inserción, flote | Modelo: 500T-WT-7810-C-55-12 Material del cuerpo: hierro fundido Flote: 316 acero inoxidable Banda muerta ajustable entre 0.5 a 3" Temperatura límite: 218°C Presión límite: 400 psi | 11 200,00 |
| Endress & Hauser Tipo Liquiphant | Vibración | Modelo básico: Liquiphant M FTL50 Aprobaciones: áreas no peligrosas Conexión al proceso: ANSI NPT 3/4, 316L Salida: FEL54;SIL relé DPDT 19-253 VAC/19-55 VDC <i>Housing</i> ; Cable de entrada: F16 Polyester NEMA 4X; NPT1/2 | 2 400,00 |

Fuente: elaboración propia.