

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica



Diseño del sistema de control automático de arranque, acople a la red y detención de la planta hidroeléctrica La Rebeca de la Marina

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

José Ricardo Solís González

Cartago, Noviembre de 2015

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

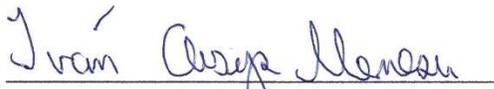
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Iván Araya Meneses

Profesor lector



Ing. Keiner Arias Esquivel

Profesor lector



Ing. Ana Lucía Morera Barquero

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Cartago, 13 de Noviembre del 2015

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 13 de Noviembre del 2015



Firma del autor

José Ricardo Solís González

Céd: 207040249

Resumen

La micro central hidroeléctrica La Rebeca de La Marina II, la cual tiene una producción de 35kW, no posee ningún sistema automático de control de las variables de generación, por lo que la eficiencia en el acople y puesta en marcha se ve reducida, así mismo en caso de presentarse una falla, la planta puede sufrir daños ya que no es capaz de detenerse automáticamente.

Se diseña un sistema de control automático de velocidad de la turbina y otro de control automático de la tensión generada por parte del generador; ambos sistemas son completamente automáticos, conformados por sensores y actuadores controlados por reguladores obtenidos a partir del análisis del modelo matemático teórico, obteniendo un compensador de adelanto para el control de velocidad y un PID para la regulación de tensión.

Además, se implementa un módulo encargado del monitoreo y detención de la central en caso de fallas mecánicas o eléctricas, mediante la automatización de la válvula principal tipo compuerta y la instalación de sensores.

Para el sistema de acople automático a la red, se propone el uso de un sincronizador digital automático, que es capaz de monitorear las variables eléctricas para ejecutar el acople.

Palabras claves

Monitoreo, Micro central hidroeléctrica, Control automático de velocidad, Control automático de tensión, Modelado matemático, Turbina francis, Generador con excitación independiente, AVR.

Abstract

The micro hydroelectric plant La Rebeca de La Marina, which it has a power generation of 35kW, does not have any automatic control about the variables of generation, because of that, the efficiency in the synchronization and the startup is reduced. Also, in case of fault, the plant could suffer a serious damage because it is unable to stop automatically.

It is designed an automatic control system of turbine velocity and another related with the automatic control of the generated voltage by the generator, both of those systems are completely automatic, and are constituted with sensors and actuators controlled by regulators obtained from the analysis of the theoretical mathematic model, obtaining a derivative compensator for the velocity control and a PID for the regulation of the voltage.

Also, it is implemented a module in charge of the monitoring and detention of the hydroelectric plant in case of mechanical or electrical faults, through the automation of the main valve type gate and the installation of sensors.

For the system of automatic synchronization, it is proposed the use of an automatic digital synchroscope, able to monitoring the electrical variables to execute the coupling.

Keywords

Monitoring, Micro hydroelectric plant, Automatic velocity control, Automatic voltage control, Mathematic model, Francis turbine, Generator with independent excitation, AVR.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres Petronila González y Eduardo Solís quienes me han apoyado incondicionalmente a lo largo de mis estudios.

Agradecimiento

Agradezco a los ingenieros Franklin Esquivel y Marco Ugalde por el apoyo y aprendizaje brindado en conjunto con todo el personal de O&M Eléctrica Matamoros. Además, a los gerentes de la micro central hidroeléctrica La Rebeca de La Marina por las facilidades manifestadas para el desarrollo y culminación del proyecto.

Tabla de contenido

Resumen	3
Palabras claves	3
Abstract	4
Keywords	4
Dedicatoria	5
Agradecimiento	6
Índice de figuras	9
Índice de figuras de anexos	12
Índice de tablas	13
Introducción	15
1.1. Descripción general del proyecto	15
1.2. Planteamiento del problema	19
1.2.1. Contexto y situación problemática	19
1.2.2. Síntesis del problema	21
1.3. Enfoque de la solución	23
1.4. Objetivo general	25
1.5. Objetivos específicos	25
2. Marco teórico	26
2.1. Elementos de una planta hidroeléctrica con turbina tipo Francis	26
2.2. Partes de la turbina francis	28
2.3. Modelo matemático de la turbina francis	29
2.4. Modelo matemático del generador con excitatriz independiente	35
3. Desarrollo metodológico	39
3.1. Automatización del sistema de detención	39
3.1.1. Pruebas de funcionamiento	39
3.1.1. Conversión de válvula principal	40
3.1.2. Selección de nuevos sensores	42
3.1.3. Selección de pantalla de monitoreo de RPM	48
3.1.4. Diseño del sistema de alimentación y respaldo de energía	49
3.1.5. Entradas del PLC	52

3.1.6.	PLC y programación.....	55
3.1.7.	Salidas del PLC.....	59
3.1.8.	Protecciones	61
3.1.9.	Aterrizaje de dispositivos	63
3.1.10.	Distribución de equipos en el panel eléctrico	63
3.1.11.	Módulo de envío de informe	65
3.2.	Diseño del regulador teórico para el control automático de frecuencia.....	67
3.3.	Automatización del sistema de control de frecuencia.....	70
3.3.1.	Selección de actuador lineal.....	71
3.3.2.	Selección de sensor de posición.....	73
3.3.3.	Diseño del sistema oleohidráulico.....	75
3.3.1.	Modificaciones del PLC	78
3.4.	Diseño del regulador teórico para el control automático de tensión.....	79
3.5.	Automatización del sistema de control de tensión.....	84
3.6.	Automatización del sistema de acople automático a la red	89
4.	Análisis de resultados	92
5.	Conclusiones.....	103
6.	Recomendaciones	105
A.	Apéndices	106
A.1.	Planos del sistema de detención automático	106
A.2.	Programación del PLC	118
A.3.	Protocolo de pruebas del sistema de detención automático	147
A.3.1.	Verificación de energía de respaldo	147
A.3.2.	Encendido del sistema	147
A.3.3.	Estado del sistema “Modo manual”.....	147
A.3.4.	Estado del sistema “modo automático/no acoplado”	149
A.3.5.	Estado del sistema “modo automático/acoplado”	151
A.3.6.	Estado del sistema “modo secuencia de detención”	152
A.3.7.	Estado del sistema “modo de falla”.....	152
A.3.8.	Alimentación de respaldo	152
A.3.9.	Desconexión inmediata del panel y reanudación	152

A.3.10.	Descripción de las luces del panel	153
A.4.	Manual de funcionamiento del sistema de detención automático	154
A.4.4.	Modo manual	154
A.4.5.	Modo automático, planta desacoplada	156
A.4.6.	Modo automático, planta acoplada	156
A.4.7.	Modo secuencia de detención	157
A.4.8.	Modo de falla	157
A.4.9.	Informe remoto de falla	158
A.4.10.	Protocolo de acople de la planta.	159
A.5.	Cálculo del compensador de adelanto del control automático de frecuencia.	161
A.6.	Cálculo del regulador PID para el control automático de tensión.	162
A.6.1.	Compensador de atraso	162
A.6.2.	Compensador de adelanto	162
A.7.	Información sobre la empresa	163
A.7.1.	Descripción de la empresa	163
A.7.2.	Misión	163
A.7.3.	Visión	163
A.7.4.	Antecedentes prácticos	164
B.	Anexos	165
B.1.	Plano original del panel de potencia	165
7.	Referencias bibliográficas	167

Índice de figuras

Figura 1.	Micro central hidroeléctrica La Rebeca de La Marina previo a la intervención (Fuente: Fotografía en la micro central).	15
Figura 2.	Panel de potencia de la micro central hidroeléctrica La Rebeca de La Marina (Fuente: Fotografía en la micro central).	16
Figura 3.	Comunicación de velocidad entre el gobernador y el eje de la turbina mediante una faja (Fuente: Fotografía en la micro central).	17
Figura 4.	Pistón interno en el gobernador (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).	18
Figura 5.	Sistema tipo biela para el cierre o apertura de los álabes por parte del gobernador (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).	18

Figura 6. Diagrama causa-efecto del proyecto (Fuente: Diseño propio en Microsoft Visio).	22
Figura 7. Esquema general de una central hidroeléctrica (Fuente: Diseño propio AutoCAD, Referencia: Bin Ng, Walker, & Sargison, 2004).	26
Figura 8. Tipos de turbinas según el método de empuje y acción del agua (Fuente: Fernández Díez, 2014).	27
Figura 9. Tipos de turbinas hidráulicas según el sentido de flujo de la entrada respecto a la salida del agua (Fuente: Fernández Díez, 2014).	28
Figura 10. Modelo de una turbina francis (Fuente: HACKER).	29
Figura 11. Curva de eficiencia de la turbina francis (Fuente: Wasserkraft Volk AG).	35
Figura 12. Diagrama eléctrico del generador con excitación independiente (Fuente: Diseño propio AutoCAD Electrical).	36
Figura 13. Diseño del sistema electromecánico previo (Fuente: Fotografía en la micro central).	40
Figura 14. Diseño propuesto de la actualización del accionamiento electromecánico de la válvula principal (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).	41
Figura 15. Contacto entre el sensor límite y la extensión del collarín (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).	42
Figura 16. Vista general del diseño propuesto de la actualización del accionamiento electromecánico de la válvula principal (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).	42
Figura 17. Presostato instalado, modelo XML-F010D2026 (Fuente Schneider Electric).	43
Figura 18. Tipo de programación de los umbrales de alarma (Fuente: Diseño propio en Paint).	43
Figura 19. Manómetro de la bomba hidráulica instalado previo a la automatización (Fuente: Fotografía en la micro central).	44
Figura 20. Procedimiento de programación del presostato XML-F010D2026 (Fuente: Schneider Electric).	45
Figura 21. Sensor inductivo instalado, modelo E2A-M12KS04-M1-B1 (Fuente: OMRON).	46
Figura 22. Sistema de monitoreo de velocidad utilizando un sensor inductivo (Fuente: Diseño propio en Paint).	46
Figura 23. Estructura propuesta para el montaje del sensor inductivo (Fuente: Fotografía en la micro central).	47
Figura 24. Sensor límite para el monitoreo de posición de la válvula principal modelo ZCT21G11 (Fuente: Schneider Electric).	48
Figura 25. Medidor de revoluciones por minuto LR5N-B (Fuente: Autonics).	48
Figura 26. Descripción de la aplicación de la pantalla LR5N-B (Fuente: Autonics).	48
Figura 27. Fuente Zelio 24V DC, 70W, modelo ABL8RPS24030 (Fuente: Schneider Electric).	49
Figura 28. Cargador automático de batería SS3512 (Fuente: PROSEMI, S.A.).	52
Figura 29. Ejemplo de la conexión tipo "Sink Input" (Fuente: Schneider Electric).	52

Figura 30. Esquema simplificado de la interfaz 120V AC-24V DC tipo relé (Fuente: Diseño propio en Paint).....	54
Figura 31. Relé modelo RXM2AB2F7 (Fuente: Schneider Electric).....	55
Figura 32. Graficet del sistema de detención automático (Fuente: Diseño propio en Microsoft Visio).....	58
Figura 33. Control de giro antihorario del motor por medio de relés/contactores (Diseño propio en Paint).....	59
Figura 34. Control de giro horario del motor por medio de relés/contactores (Diseño propio en Paint).....	59
Figura 35. Contactor modelo LC1D25BD (Fuente: Schneider Electric).....	60
Figura 36. Relé modelo RXM4AB2BD (Fuente: Schneider Electric).....	60
Figura 37. Interruptor termomagnético modelo A9F74232 y A9F74204 (Fuente: Schneider Electric).....	62
Figura 38. Contactor modelo LC1D38G7 (Fuente: Schneider Electric).....	62
Figura 39. Rectificador modelo NTE5342 (Fuente: NTE Electronics).....	63
Figura 40. Propuesta de distribución de los equipos dentro del panel de control (Fuente: Diseño propio en SolidWorks con modelos de Schneider Electric).....	64
Figura 41. Propuesta de la parte frontal del panel (Fuente: Fotografía en la micro central).....	64
Figura 42. Relé de estado sólido modelo SSM1D26BD (Fuente: Schneider Electric).....	66
Figura 43. Relé de tipo bloque modelo C383RL24D (Fuente: EATON).....	67
Figura 44. Respuesta ante un escalón del sistema de control de frecuencia respecto a la apertura del distribuidor sin regulador (Fuente: Diseño propio en Matlab).....	69
Figura 45. Respuesta ante un escalón del sistema de control de frecuencia respecto a la apertura del distribuidor con regulador de adelanto (Fuente: Diseño propio en Matlab).....	70
Figura 46. Propuesta de sustitución del gobernador por un actuador lineal (Fuente: Diseño propio en SolidWorks, Fuente de cilindro: Parker).....	71
Figura 47. Propuesta de montaje del cilindro modelo 20TCHEBU4M60 (Fuente del diseño: Diseño propio en Solidworks, Fuente del cilindro: Parker).....	73
Figura 48. Propuesta de sensor ultrasónico para monitoreo de posición de la carrera de un cilindro hidráulico (Fuente: Diseño propio en Paint).....	74
Figura 49. Propuesta de montaje del transductor de posición modelo MPA1/100SB01 (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).....	75
Figura 50. Sonda de temperatura PT100 (Fuente: Ocean Controls).....	76
Figura 51. Características de flujo de una válvula proporcional (Fuente: Max Machinery).....	77
Figura 52. Propuesta del sistema de potencia hidráulica para el cilindro modelo (Fuente: Diseño en Festo Hidraulic).....	77
Figura 53. Comportamiento de la válvula según la señal de control (Fuente: Rodavigo S.A.).....	78
Figura 54. Módulo de entradas y salidas analógicas modelo TWDAMM6HT (Fuente: Schneider Electric).....	79

Figura 55. Dispositivo MCE MAX utilizado para diversas pruebas eléctricas en generadores (Fuente: MCE MAX).	81
Figura 56. Respuesta al escalón de la función de transferencia de la tensión en el inductor, respecto a la tensión en el inducido, sin regulador (Fuente: Diseño propio en Matlab).	82
Figura 57. Respuesta al escalón de la función de transferencia de la tensión en el inductor, respecto a la tensión en el inducido, con regulador de atraso (Fuente: Diseño propio en Matlab).	83
Figura 58. Respuesta al escalón de la función de transferencia de la tensión en el inductor, respecto a la tensión en el inducido, con regulador de atraso y adelanto (Fuente: Diseño propio en Matlab).	84
Figura 59. Regulador automático de tensión (Fuente: Governor Control Systems, Inc.). ...	85
Figura 60. Regulador automático de tensión modelo SX460 (Fuente: SainSmart).	86
Figura 61. Diagrama del circuito de excitatriz del generador (Fuente: Diseño propio AutoCAD Electrical).	86
Figura 62. Generador con excitación independiente controlada mediante el AVR (Fuente: Diseño propio en Paint).	87
Figura 63. Diagrama de conexión del AVR SX460 autoexcitado (Fuente: SainSmart).	88
Figura 64. Sincronoscopio digital modelo DKG-117 (Fuente: DATAKOM).	90
Figura 65. Conexión del sincronoscopio automático DKG-117 (Fuente: DATAKOM).	91
Figura 66. Distribución final de los equipos en el panel (Fuente: Fotografía en la micro central).	92
Figura 67. Automatización de la válvula principal (Fuente: Fotografía en la micro central).	93
Figura 68. Conexión del sistema de monitoreo de presión en la bomba hidráulica (Fuente: Fotografía en la micro central).	94
Figura 69. Instalación de sensor inductivo (Fuente: Fotografía en la micro central).	94
Figura 70. Respuesta al escalón del sistema de regulación de velocidad sin controlador, relacionadas con el aumento del tiempo de respuesta de la cabeza del agua (Fuente: Diseño propio en Matlab).	96
Figura 71. Respuesta al escalón del sistema de regulación de velocidad sin controlador, relacionadas con el aumento en la inercia rotacional del sistema (Fuente: Diseño propio en Matlab).	97

Índice de figuras de anexos

Figura A. 1. Establecimiento del selector en modo manual (Fuente: Diseño propio en Paint).	154
Figura A. 2. Apertura del distribuidor (Fuente: Diseño propio en Paint).	154
Figura A. 3. Apertura de válvula de principal (Fuente: Diseño de ingeniería).	155
Figura A. 4. Cierre de válvula principal (Fuente: Diseño propio en Paint).	155

Figura A. 5. Apertura memorizada de válvula principal (Fuente: Diseño propio en Paint).	155
Figura A. 6. Cierre memorizado de válvula principal (Fuente: Diseño propio en Paint).	155
Figura A. 7. Paro de emergencia (Diseño propio en Paint).	156
Figura A. 8. Establecimiento del selector en modo automático (Fuente: Diseño propio en Paint).	156
Figura A. 9. Botón de acople a la red (Fuente: Diseño propio en Paint).	157
Figura A. 10. Botón de reseteo (Fuente: Diseño propio en Paint).	158
Figura A. 11. Interfaz de acceso a la página web (Fuente: Carriots).	158
Figura A. 12. Interfaz de acceso al historial (Fuente: Carriots).	159
Figura A. 13. Historial de eventos (Fuente: Carriots).	159
Figura A. 14. Resumen gráfico del funcionamiento del sistema de detención automático (Fuente: Diseño de ingeniería).	160

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de las características de la micro central hidroeléctrica La Rebeca II (Fuente: Indicadores).	19
Tabla 2. Resumen de las características del generador de excitatriz independiente (Fuente: Placa de datos).	19
Tabla 3. Pruebas de consumo de energía de los actuadores controlados (Fuente: Pruebas en la planta).	39
Tabla 4. Parámetros para el criterio de selección del presostato (Fuente: Diseño de ingeniería).	43
Tabla 5. Selección de los parámetros programados al presostato (Fuente: Diseño de ingeniería).	44
Tabla 6. Parámetros para el criterio de selección del sensor inductivo (Diseño de ingeniería).	46
Tabla 7. Parámetros para el criterio de selección de los sensores límite (Fuente: Diseño de ingeniería).	47
Tabla 8. Detalle de consumo de potencia de los dispositivos alimentados por la fuente de 24V DC (Fuente: Pruebas en la planta).	49
Tabla 9. Descripción de las variables que se deben manejar en el diseño del sistema de detención (Fuente: Diseño de ingeniería).	54
Tabla 10. Descripción de los tipos de fallas de la central hidroeléctrica (Fuente: Diseño de ingeniería).	57
Tabla 11. Detalle del porcentaje del PWM de la salida Q0.0 del PLC respecto al tipo de evento presentado (Fuente: Diseño de ingeniería).	65
Tabla 12. Detalle del tiempo en alto de la salida digital del PLC en relación al tipo de evento presentado (Fuente: Diseño de ingeniería).	66

Tabla 13. Resumen de los requerimientos del actuador lineal (Fuente: Diseño de ingeniería).	72
Tabla 14. Características del cilindro modelo 20TCHEBU4M60 (Fuente: Parker).	73
Tabla 15. Parámetros de selección del sensor de posición de la carrera del pistón (Fuente: Diseño de ingeniería).	74
Tabla 16. Valores de la inductancia promedio de dos excitatrices similares a la Rebeca de La Marina (Fuente: Mediciones mediante MCE MAX).	80
Tabla 17. Detalle de inversión para la implementación del sistema de detención automático (Fuente: O&M Eléctrica Matamoros).	100
Tabla 18. Detalle de costos debido a la falla por sobre velocidad de la turbina (Fuente: Encargados de la central).	101
Tabla 19. Detalle de los costos mensuales por un acople y puesta en marcha de forma manual (Fuente: Diseño de ingeniería).	102
Tabla 20. Detalle de la inversión para la implementación del sistema de acople y puesta en marcha automático (Fuente: Diseño de ingeniería).	102

Introducción

1.1. Descripción general del proyecto

El proyecto consiste en el diseño de un sistema automático que se encargue del proceso de arranque, acople a la red y la detención en caso de falla de la micro central hidroeléctrica La Rebeca II, ubicada en La Marina de San Carlos, la cual cuenta con una presión de columna de agua de 179,264 kPa y un sistema compuesto por una turbina tipo francis horizontal (Tabla 1) y un generador con excitatriz independiente (Tabla 2), con una potencia de generación de 35 kW.



Figura 1. Micro central hidroeléctrica La Rebeca de La Marina previo a la intervención (Fuente: Fotografía en la micro central).

Previamente se contaba con un panel encargado de desconectar de la red al generador en el momento en que se presentase algún tipo de falla, eléctrica o mecánica; contando con una serie de indicadores lumínicos para informar sobre la desconexión de la red y el tipo de falla ocurrida.



Figura 2. Panel de potencia de la micro central hidroeléctrica La Rebeca de La Marina (Fuente: Fotografía en la micro central).

En cuanto a el control de las variables de la energía generada, se cuenta con tres módulos, los cuales consisten en la válvula tipo compuerta (Válvula Principal) que controla el caudal de entrada a la turbina, el gobernador encargado de controlar la apertura o cierre del distribuidor para así controlar la velocidad de la turbina, y por ende la frecuencia de la energía generada; y finalmente el control de la corriente de excitatriz del generador por medio de un reóstato para regular la tensión generada antes del acople a la red. Una vez que la planta se sincroniza, la tensión y frecuencia de la energía es controlada por la misma red externa, otorgándole al gobernador la función de controlar la potencia activa, y al reóstato de control de la corriente de excitatriz la regulación del factor de potencia, comúnmente con magnitudes de 35 kW y 0.9 respectivamente.

La válvula tipo compuerta que regula el caudal de entrada de la turbina es manual, y se intentó mejorar el mecanismo instalando un motor de corriente continua con un sistema de piñones y cadenas para accionar electromecánicamente la válvula, sin embargo el diseño se detuvo al momento de intervenir con el nuevo módulo automático de detención de la planta, ya que corresponde a uno de los objetivos de este proyecto con el fin de ser rediseñado y mejorado.

Con respecto al control de frecuencia de la planta, se tiene un gobernador mecánico que monitorea la velocidad de la turbina mediante una faja que se encuentra acoplada al eje de la turbina y se comunica al gobernador mediante una polea (Figura 3).



Figura 3. Comunicación de velocidad entre el gobernador y el eje de la turbina mediante una faja (Fuente: Fotografía en la micro central).

El gobernador está configurado para que en modo automático pueda mantener una consigna de 1200 rpm, establecida mecánicamente por su sistema de muelles y pesas, ejecutando el proceso de apertura y cierre de los álabes de la turbina. También, el gobernador posee un funcionamiento manual que se encarga de ajustar la posición de los álabes de forma fina con una pequeña manivela en la parte inferior del gobernador, y de forma gruesa con una manivela más grande en la parte superior del mismo. Finalmente, el sistema cuenta con una palanca encargada de bloquear el flujo de aceite, lo que permite mantener los álabes en una posición específica sin importar la fuerza del fluido dentro de la turbina; de esta manera, al momento de que la turbina tienda a embalsarse, el gobernador cerrará el distribuidor por completo y luego se accionará esta palanca para mantener los álabes en dicha posición. El accionamiento de la palanca se realiza por medio de un motor de corriente continua controlado por un temporizador en el panel de potencia que inicia su retardo al momento de la desconexión de la red por motivo de falla y seguido de cuatro segundos activa dicho motor. Todas las funciones del gobernador descritas anteriormente, conducen al accionamiento de un cilindro hidráulico que se encuentra dentro del equipo (Figura 4), y por medio de un sistema tipo biela (Figura 5), transmite el movimiento rotacional al

conjunto de álabes dentro de la turbina para así generar el cierre o la apertura de los mismos.



Figura 4. Pistón interno en el gobernador (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).



Figura 5. Sistema tipo biela para el cierre o apertura de los álabes por parte del gobernador (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).

En cuanto al control de tensión, se tiene un reóstato ajustable de manera manual por medio de una manivela, que permite regular la resistencia en el circuito de excitatriz controlando finalmente la corriente de excitatriz en el generador.

Finalmente, el monitoreo de las fallas de la planta se realiza de forma remota vía internet mediante un sistema de cámaras de vigilancia que permite la visualización del estado de los indicadores lumínicos del panel eléctrico.

Tabla 1. Resumen de las características de la micro central hidroeléctrica La Rebeca II (Fuente: Indicadores).

Turbina	Francis horizontal
Velocidad nominal	1200 rpm
Potencia del generador	35 kW
Potencia de turbina	32.76 kW
Longitud de tubería forzada	100 m
Salto	18 m
Apertura en pu	1
Cierre en pu	0
Área de tubería	0.164 m ²
Caudal	0.385 m ³ /s
Diámetro de rodete	0.27444m

Tabla 2. Resumen de las características del generador de excitatriz independiente (Fuente: Placa de datos).

Descripción	Detalle	
V (Y)	230	
A	166	
Potencia	6 kVA	
cos(φ)	0.8	
Velocidad	1800+80% rpm	60 Hz
Excitación	65 V	20.6 A

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Contexto y situación problemática

Previamente, el sistema de generación se desconectaba de forma eficiente de la red, sin embargo, al contar con un control manual de las variables del sistema, el embalamiento de la turbina (Aumento desmedido de la velocidad angular al desconectar la carga eléctrica por parte del generador) en caso de desconexión de la red era inminente si no se encontraba un operario en el lugar que se encargara de la detención; de lo cual ya se tiene antecedentes; en el año 2011, provocó pérdidas económicas considerables por el daño del rodete, los cojinetes de tope y soporte de la turbina. Además, en el año 2015, un aumento en la presión

hidráulica del sistema de lubricación del cojinete de tope, causado por una sobre velocidad de la turbina al no actuar el sistema de cierre del distribuidor, causó una desconexión de una manguera provocando la necesidad de sustituir dicho cojinete.

Con respecto al gobernador; el problema es que al ser un sistema de regulación automático pero de forma mecánica, la descalibración es inminente; lo cual conlleva a que la consigna de velocidad a la que la planta debe mantenerse (1200 rpm) no siempre será la misma, provocando fluctuaciones en la frecuencia de la energía generada previo a la sincronización.

En cuanto a la regulación de tensión, la dificultad radica en que no es constante, de manera que al ajustar por primera vez la corriente de excitatriz y sincronizar la planta, no implica que al momento detenerse la planta y volver a iniciar el procedimiento de acople, ajustando la velocidad a 1200 rpm, no será necesario volver a ajustar la corriente de excitación. Lo anterior se debe a los siguientes factores:

- La inestabilidad de la tensión de la red externa por un aumento inesperado de carga eléctrica.
- Las diferencias en la tensión de la red eléctrica por horas pico.
- La inestabilidad en el caudal de entrada en la turbina.

Además, uno de los mayores problemas que relacionan el control de frecuencia y el de tensión por parte de un operador, es el fenómeno que se describirá a continuación. La velocidad de la turbina es directamente proporcional a la frecuencia y tensión; de manera que a menor velocidad, habrá una menor frecuencia y tensión. Además, la corriente de excitación es directamente proporcional a la tensión, sin embargo, inversamente proporcional a la velocidad de la turbina debido a que es vista por el generador como un freno eléctrico, fenómeno causado por las corrientes inducidas. De esta manera por ejemplo, si la frecuencia se encuentra en la magnitud debida, pero la tensión se encuentra por debajo del valor esperado, será necesario aumentar la corriente de excitación, y esto generará que se disminuya el valor de la frecuencia.

Finalmente, el acople a la red se realiza de manera manual; de forma que el operario debe presionar un botón al momento en que la frecuencia y la tensión del generador estén igual a

la frecuencia y tensión en la red, por lo que en muchas ocasiones esta operación implica mucho tiempo por parte del operador en espera del momento en que las variables ajustadas se igualen.

1.2.2. Síntesis del problema

No hay control automático de la planta hidroeléctrica, por lo que la eficiencia en el acople y puesta en marcha se ve reducida, además, en caso de falla, la planta puede sufrir graves daños al no detenerse automáticamente.

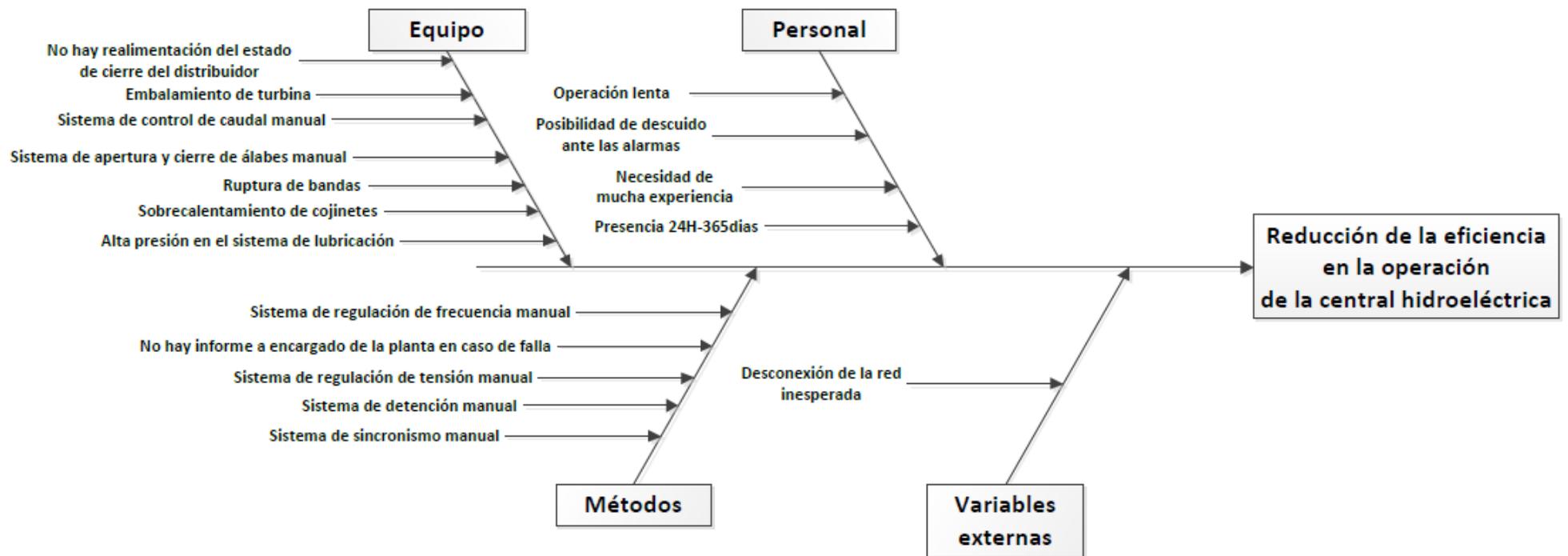


Figura 6. Diagrama causa-efecto del proyecto (Fuente: Diseño propio en Microsoft Visio).

1.3. Enfoque de la solución

La solución que se desarrollará consta de tres bloques; el primero y de mayor urgencia consiste en diseñar el sistema de detención automático de la planta, esto implica la selección de los sensores que sean necesarios para cubrir con los posibles fallos que aún no se toman en consideración por parte del módulo eléctrico existente; estos sensores consisten en un presostato que permita el monitoreo de la presión hidráulica del sistema de lubricación del cojinete de tope y un sensor de velocidad sobre el eje de la turbina. Además, es necesario seleccionar sensores tales como finales de carrera o decodificadores de posición angular, para retroalimentar al sistema de control sobre la posición de las válvulas manuales que se requieren automatizar.

Estos sensores, deben comunicarse con una central de procesamiento, en este caso será un PLC encargado de lectura de las variables que involucran una posible desconexión de la central por fallas mecánicas y/o eléctricas. Luego, programar en éste la lógica necesaria para que de forma óptima actúe sobre las variables que detienen el sistema.

Tal como se menciona anteriormente, es necesaria la automatización de la válvula manual del control de caudal (Válvula principal), por lo que se debe realizar un análisis mecánico de la solución. En este caso, el enfoque viene dado por el cierre mediante un motor de corriente continua y un sistema de piñón-cadena que permitan la transmisión del torque del motor hacia la válvula.

Este sistema de detención de la central hidroeléctrica deberá también contar con un control que permita manipular la planta de forma manual para situaciones de mantenimiento o pruebas.

Por otra parte, se debe diseñar un banco de baterías que aseguren la operación del sistema de detención por no menos de 30 minutos; esto en caso de falla de la red eléctrica.

Además, para el primer bloque del proyecto, se debe seleccionar un sistema que envíe un mensaje de falla por medio internet hacia el encargado de la planta, ya que el arranque y acople a la red se debe realizar de forma manual; además, dicho mensaje debe informar el tipo de falla que causó la detención, ya sea por un aumento sobre los 45°C en la temperatura del cojinete de tope o de soporte, falla por sobre/baja tensión, sobre/baja frecuencia, potencia inversa, sobrecorriente, por sobre velocidad en la turbina (Velocidad

mayor a 1380 rpm), y por una presión en el sistema hidráulico del cojinete de tope fuera del rango de 48,2633 kPa a 151,685 kPa.

La segunda parte del proyecto consiste en generar un diseño para que el control de la tensión y la frecuencia de la energía generada pasen de ser de forma manual a electromecánica. Para esto se debe automatizar el sistema que se encarga del control de posición de los álabes de la turbina que actualmente se regula mecánicamente por medio del gobernador, este sistema es el encargado de controlar la frecuencia de la energía generada; por otra parte, también se necesita la automatización del sistema que controla la corriente de la excitatriz quien regula la tensión de la energía generada. Debido a que el funcionamiento mecánico en ambos controles manuales es igual, se realiza mediante un sistema giratorio, la solución para ambos casos se enfoca en un motor para generar el movimiento rotacional, y un decodificador para tener una realimentación al sistema, además se requiere el diseño del sistema mecánico que se encargará de transmitir el torque del motor al sistema; sin embargo también está la posibilidad de que la solución consista en la instalación de nuevos actuadores como un pistón hidráulico controlado por una válvula proporcional accionada por el mismo PLC para el control de apertura del distribuidor, y para el control de la corriente de la excitatriz un sistema de tensión regulable de manera electrónica.

Finalmente, el tercer bloque consiste en integrar los diseños de automatización generados en el segundo bloque del proyecto, para obtener un sistema automático de arranque y acople de la central hidroeléctrica a la red eléctrica. En este caso se debe tomar en consideración el ajuste de las dos variables primordiales, la frecuencia y la tensión generada.

Para el caso de la frecuencia, esta es controlada mediante la regulación de la apertura y cierre de los álabes de la turbina, por lo que el control debe surgir a partir del análisis y el modelado matemático del sistema desde un punto en el que se encuentre automatizado y así obtener el controlador que más se ajuste a la regulación de la salida deseada.

Por otra parte, para la regulación de tensión de la energía generada, se debe controlar automáticamente la corriente de la excitatriz. De igual manera, al tener el sistema de forma que pueda ser accionado eléctricamente, el paso siguiente es encontrar un modelo

matemático que represente el sistema para luego diseñar un regulador que ajuste la salida del sistema de manera óptima.

También, será necesario realizar las pruebas de ambos controladores obtenidos por medio del software como Matlab, para permitir verificar el comportamiento de los reguladores ante las respectivas entradas de los sistemas y así prever el comportamiento real ante una implementación en la central hidroeléctrica.

Con estas variables ajustadas automáticamente, únicamente se necesita el proceso del sincronismo de la energía generada con la red eléctrica, para esto ya se cuenta con módulos que ejecutan dicha función, por lo que se debe seleccionar uno acorde a la central hidroeléctrica en análisis.

1.4. Objetivo general

Diseñar el control automático de arranque, acople a la red, y detención en caso de fallas de la Central Hidroeléctrica La Rebeca de la Marina mediante la modificación de los sistemas eléctricos, mecánicos y computacionales.

1.5. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de automatización de la válvula principal encargada del control de caudal de entrada a la turbina.
- Diseñar un panel de control que permita la detención automática y la operación manual de la central hidroeléctrica seleccionando los sensores adecuados para el monitoreo de la velocidad de la turbina y la presión en el sistema hidráulico del cojinete de tope, tomando en cuenta además el estado de los sensores actuales.
- Seleccionar un módulo electrónico que permita generar un informe de manera remota a los encargados de la central hidroeléctrica en caso de detención de la planta.
- Diseñar la automatización del sistema encargado del control de posición de los álabes de la turbina y el de regulación de la corriente excitatriz del generador.
- Diseñar un controlador respecto al modelo teórico del sistema de apertura y cierre de los álabes de la turbina para el control de la frecuencia de la energía generada, y del sistema de regulación de la corriente excitatriz del generador para el control automático de la tensión de salida.

- Seleccionar un dispositivo que se encargue del acople automático a la red de la central hidroeléctrica.

2. Marco teórico

2.1. Elementos de una planta hidroeléctrica con turbina tipo Francis

Las centrales hidroeléctricas están conformadas por una serie de elementos acorde al tipo de turbina y potencia de energía eléctrica a la que se encuentran dimensionadas, sin embargo dichos elementos se asemejan en la mayoría de las plantas variando solamente la dimensión de los componentes.

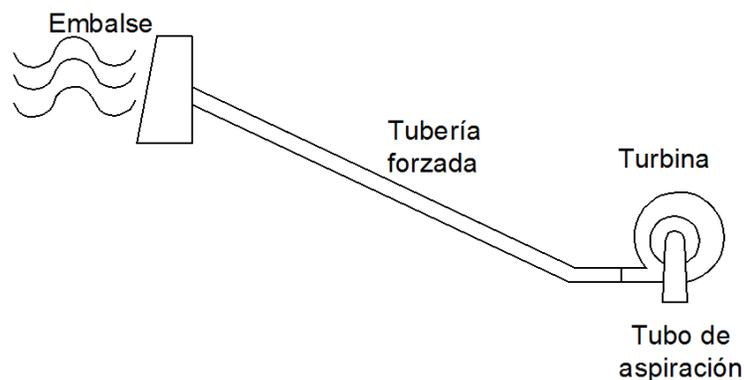


Figura 7. Esquema general de una central hidroeléctrica (Fuente: Diseño propio AutoCAD, Referencia: Bin Ng, Walker, & Sargison, 2004).

En primera instancia el inicio del sistema corresponde a la “toma”, la cual consiste en una construcción utilizada para suministrar el caudal necesario hacia el embalse, mediante compuertas que permiten o impiden el flujo del agua. En cuanto al embalse, consiste en un reservorio de agua que suministra el caudal necesario para que la turbina opere, cabe mencionar que en este punto se supone una velocidad del agua igual a cero, lo cual resulta útil para el cálculo de presiones y pérdidas por fricciones o accesorios en la tubería forzada. Esta última, se encarga de comunicar el embalse con la casa de máquinas, el lugar donde se encuentran instalados las turbinas, generadores y los sistemas de control y monitoreo. Es importante mencionar que la diferencia de alturas entre el inicio de la tubería, con respecto al final se le denomina “salto” o “caída”, y es directamente proporcional a la potencia con que el agua entra a la turbina. La ecuación que cuantifica teóricamente la relación entre

potencia hidroeléctrica respecto al caudal y el salto se muestra en la ecuación (2.1), haciendo la observación que esta ecuación no toma en consideración las pérdidas por fricción en la tubería forzada (Wildi, 2007).

$$P = 9.8 \cdot q \cdot h \quad (2.1)$$

Donde:

- P=Potencia hidráulica (kW).
- q=Caudal en tubería forzada (m³/s).
- h=Diferencial de altura (m).
- 9.8=Coefficiente para relacionar unidades.

Luego, está la válvula principal encargada de permitir el paso de caudal, y se encuentra instalada justamente previo a la turbina. En este punto, también se tiene la válvula by-pass, encargada de equilibrar las presiones previo al momento de apertura de la válvula principal, con el fin de eliminar el vacío generado por las diferencias de presiones.

Finalmente se tiene la turbina tipo francis, la cual es la encargada de la transformación de la energía hídrica en potencia mecánica. Este tipo de máquina corresponde al grupo de turbinas a reacción, de tal manera que el agua sale del distribuidor con una presión específica y disminuye conforme el fluido pasa por los álabes del rodete, hasta que a la salida de la turbina, sobre el tubo de aspiración, el fluido presenta una presión nula.

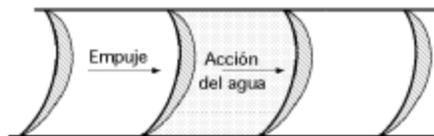


Fig I.2.a.- Acción



Fig I.2.b.- Reacción

Figura 8. Tipos de turbinas según el método de empuje y acción del agua (Fuente: Fernández Díez, 2014).

Además, la turbina francis se clasifica en las turbinas de tipo radial, ya que el flujo del agua no es proyectado de manera frontal a las directrices del rodete, si no que las láminas de

flujo se deslizan sobre estos, de manera que el flujo del fluido de la entrada con respecto a la salida, no coincide con la dirección de giro del rodete.

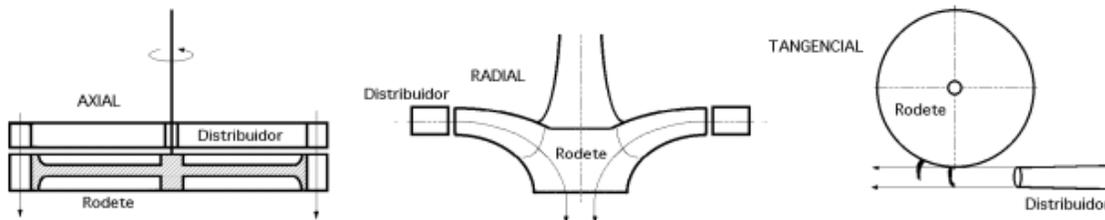


Fig 1.3.a) Turbina axial; b) Turbina radial; c) Turbina tangencial

Figura 9. Tipos de turbinas hidráulicas según el sentido de flujo de la entrada respecto a la salida del agua (Fuente: Fernández Díez, 2014).

2.2. Partes de la turbina francis

En general, la turbina tipo francis se compone de los siguientes elementos (Rivera Chávez, 2010):

- **Cámara espiral:** Es la encargada de homogenizar la velocidad del agua en la periferia del distribuidor.
- **Distribuidor:** Corresponde a un conjunto de álabes o paletas que se encuentran pivotadas sobre su centro, y que al girar, son capaces de modificar el área de la sección de entrada del caudal hacia el rodete. Estos álabes se encuentran unidos por medio de bieletas a un anillo giratorio el cual es accionado tangencialmente por un cilindro hidráulico.
- **Rodete:** El rodete es el componente que gira y transforma la energía potencial del salto del agua, en energía mecánica, transmitida hacia el generador por medio de un eje soportado en cojinetes. Dichos cojinetes se encuentran bajo dos tipos de esfuerzos, uno, soporta la carga radial del eje y los demás componentes de la turbina y el generador, mientras que el otro, soporta tanto la carga radial como la carga axial generada por el flujo de agua dentro del rodete hacia el tubo de aspiración.
- **Tubo de aspiración:** El tubo de aspiración es el encargado de conducir el caudal de salida de la turbina hacia el desfogue de la central hidroeléctrica.

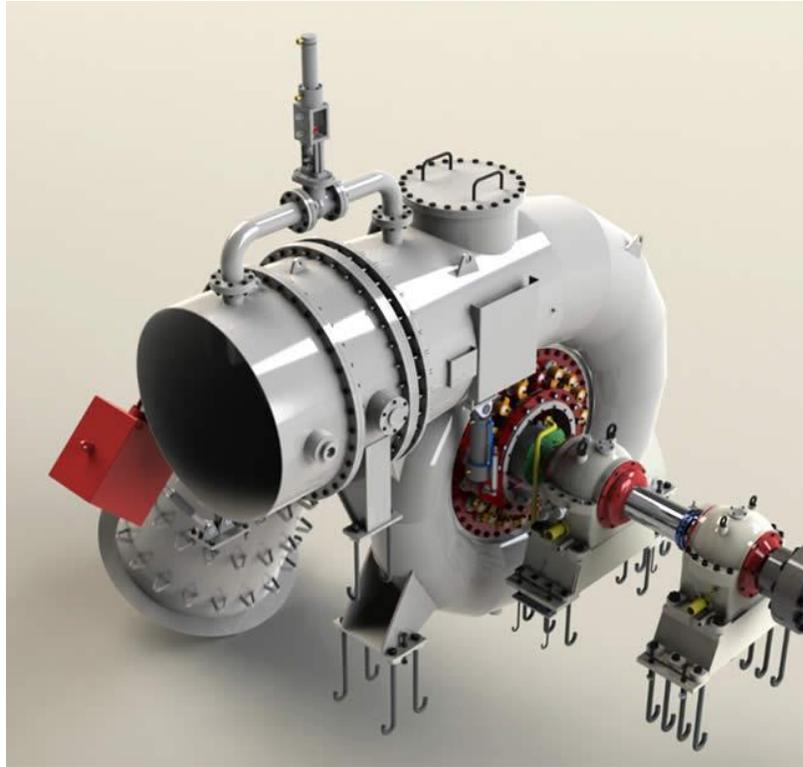


Figura 10. Modelo de una turbina francis (Fuente: HACKER).

2.3. Modelo matemático de la turbina francis

Se tienen dos aproximaciones para el modelo matemático de la turbina francis, el lineal y el no lineal. El primero, útil para el análisis de pequeñas centrales hidroeléctricas debido a su simplicidad para el control y el análisis para la regulación de velocidad previo a la sincronización a la red externa. Este modelo se restringe asumiendo lo siguiente (Kundur, 1994):

- La resistencia hidráulica es despreciable.
- La tubería forzada es inelástica y el agua es incompresible.
- La velocidad del agua varía directamente con la apertura de la compuerta y con la raíz cuadrada de la cabeza de agua neta.
- La potencia de salida de la turbina es proporcional al producto de la cabeza de agua y al volumen de flujo.

El modelo de Kundur, se basa en que para pequeños cambios en la velocidad del agua que pasa dentro del rodete de la turbina, se tienen pequeños cambios en la abertura del distribuidor y en la cabeza de agua neta, tal como se presenta en la ecuación (2.2):

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial U}{\partial G} \Delta G \quad (2.2)$$

Dado que, la velocidad del agua está representada de la siguiente manera:

$$U = K_u * G * \sqrt{H} \quad (2.3)$$

Y al evaluar la ecuación (2.2) cerca del punto de operación con:

$$U_0 = K_u * G_0 * \sqrt{H_0} \quad (2.4)$$

Se obtiene la ecuación en estado estable del sistema:

$$\Delta U = \frac{1}{2} \Delta H + \Delta G \quad (2.5)$$

Además, a partir de la segunda ley de Newton, se establece la relación que tiene la aceleración de la cabeza de agua sobre la turbina, de manera que:

$$F = m * a \quad (2.6)$$

$$m = \rho * L * A \quad (2.7)$$

$$a = \frac{d\Delta U}{dt} \quad (2.8)$$

$$F = A * \rho * 9.8 * -\Delta H \quad (2.9)$$

Obteniendo finalmente:

$$\rho * L * A * \frac{d\Delta U}{dt} = A * \rho * 9.8 * -\Delta H \quad (2.10)$$

Evaluando cerca del punto de operación para el diferencial de altura y velocidad del agua, se obtiene que:

$$\frac{\rho * L * A}{H_0} * \frac{d\Delta \bar{U}}{dt} = A * \rho * 9.8 * \frac{-\Delta \bar{H}}{U_0} \quad (2.11)$$

Despejando se tiene que:

$$\frac{L * U_0}{H_0 * 9.8} * \frac{d\Delta \bar{U}}{dt} = -\Delta \bar{H} \quad (2.12)$$

De la ecuación (2.12), se agrupan los coeficientes constantes, dando como resultado el tiempo requerido por la columna de agua para acelerar el fluido hasta una velocidad U_0 .

$$T_w = \frac{L * U_0}{H_0 * 9.8} \quad (2.13)$$

De manera que:

$$T_w * \frac{d\Delta \bar{U}}{dt} = -\Delta \bar{H} \quad (2.14)$$

Finalmente, se muestra el proceso de sustituir la ecuación (2.14) en la ecuación (2.5):

$$-\frac{1}{2} \Delta \bar{H} = \Delta \bar{G} - \Delta \bar{U} \quad (2.15)$$

$$-\Delta \bar{H} = 2 * (\Delta \bar{G} - \Delta \bar{U}) \quad (2.16)$$

$$T_W * \frac{d\Delta\bar{U}}{dt} = 2 * (\Delta\bar{G} - \Delta\bar{U}) \quad (2.17)$$

Aplicando la transformada de Laplace para obtener la función en el dominio de la frecuencia:

$$T_W * s * U(s) = 2 * (G(s) - U(s)) \quad (2.18)$$

$$T_W * s * U(s) + 2 * U(s) = 2 * G(s) \quad (2.19)$$

$$U(s)(T_W * s * +2) = 2 * G(s) \quad (2.20)$$

$$\frac{U(s)}{G(s)} = \frac{2}{(T_W * s * +2)} \quad (2.21)$$

$$\frac{U(s)}{G(s)} = \frac{1}{\left(\frac{T_W}{2} * s * +1\right)} \quad (2.22)$$

Al tener la relación de la velocidad del agua con respecto a la apertura en el distribuidor, será útil obtener el modelo que representa la interacción del fluido con el rodete de la turbina. Para este análisis se asumirá lo siguiente:

- Al ser una turbina tipo francis de reacción, el fluido ingresa al rodete con cierta velocidad, pero conforme avanza por los álabes del mismo, la velocidad se disminuye hasta llegar a ser nula, drenada gracias a la función del tubo de aspiración.
- El fluido ingresa tangencialmente a los álabes fijos del rodete, de manera que no hay pérdidas por descomposición del triángulo de velocidades.
- Se supone un caudal constante a partir de un diferencial de tiempo, basándose en la ecuación de continuidad del fluido, donde el caudal se mantiene constante provocando un aumento en la velocidad del fluido.

Aplicando la segunda ley de newton para movimientos rotacionales:

$$\sum T = I * \alpha \quad (2.23)$$

Sabiendo que I, corresponde a todas las inercias rotacionales que se oponen al movimiento, tales como el generador, el rodete, el eje de la turbina, el volante de inercia del eje entre la turbina y el generador.

Ahora bien, partiendo de la ecuación fundamental de Euler para turbomáquinas (Suay Belenguer, 2015), el par motor de una turbina generado por el fluido se representa de la siguiente manera:

$$T = \rho * Q * (r_2 * V_{2t} - r_1 * V_{1t}) \quad (2.24)$$

Partiendo de la suposición de que la velocidad en la salida del rodete es igual a cero y que la velocidad tangencial en el rodete es igual a la del fluido que ingresa a la cámara espiral, se tiene la definición del torque como:

$$T = \rho * Q * (r_2 * \Delta U) \quad (2.25)$$

De la ecuación (2.23), se tiene que:

$$\rho * Q * (r_2 * \Delta U) = I * \alpha \quad (2.26)$$

Sabiendo que:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (2.27)$$

Se tiene lo siguiente:

$$\rho * Q * (r_2 * \Delta U) = I * \frac{d\omega}{dt} \quad (2.28)$$

Aplicando la transformada de Laplace para obtener la función en el dominio de la frecuencia:

$$\rho * Q * r_2 * U(s) = I * s * \omega(s) \quad (2.29)$$

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{\rho * Q * r_2}{I * s} \quad (2.30)$$

Finalmente, al tener la relación existente entre el cambio de velocidad del rodete de la turbina con respecto al cambio de la velocidad del fluido de entrada (Ecuación (2.30)) y la relación entre el cambio en la apertura del distribuidor con respecto a el cambio en la velocidad del fluido de entrada (Ecuación (2.22)), se puede obtener la relación entre el cambio de velocidad de la turbina debido a un cambio en la apertura del distribuidor:

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} * \frac{U(s)}{G(s)} = \frac{1}{\left(\frac{T_W}{2} * s * +1\right)} * \frac{\rho * Q * r_2}{I * s} \quad (2.31)$$

$$\frac{\omega(s)}{G(s)} = \frac{\frac{\rho * Q * r_2}{I}}{s * \left(\frac{T_W}{2} * s * +1\right)} \quad (2.32)$$

Para centrales hidroeléctricas de alta potencia, se debe realizar un modelo matemático extra, útil para el diseño del control automático al momento en que el generador acoplado a la turbina se encuentre entregando energía a la red eléctrica. Se justifica la necesidad de dicho control automático por dos razones, la primera debido a la curva de eficiencia que caracteriza a las turbinas francis (Figura 11) la cual muestra que conforme aumente la apertura del distribuidor, la potencia de generación es mayor, hasta llegar a un punto en donde si se continúa abriendo el distribuidor, la potencia se disminuye. El segundo motivo se basa en la necesidad de realizar un uso racional del volumen de agua del embalse, ya que es de mayor interés producir durante más horas, que a mayor potencia, ya que de generarse un consumo excesivo del volumen del embalse, podría implicar la disminución en la producción de potencia, o en caso extremo, detener la planta por falta de caudal. El presente

proyecto, omite el desarrollo de este modelo, ya que al ser una micro central hidroeléctrica (Potencia=35kW), el procedimiento de regulación de potencia consiste en la apertura total del distribuidor ya que no se tiene una restricción de consumo de caudal; y la turbina, al ser de baja potencia, no responde críticamente a la curva de eficiencia.

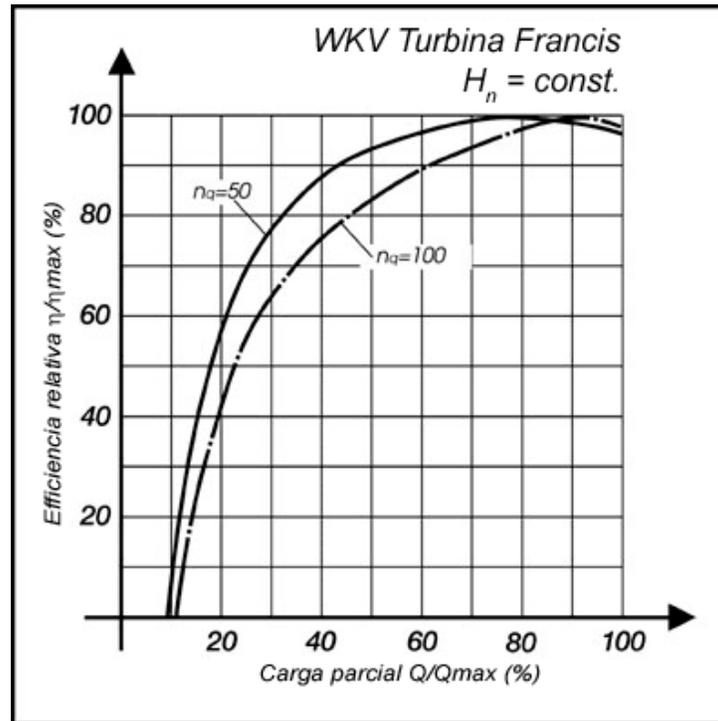


Figura 11. Curva de eficiencia de la turbina Francis (Fuente: Wasserkraft Volk AG).

2.4. Modelo matemático del generador con excitatriz independiente

El generador con excitación independiente consiste en una máquina síncrona que no posee imanes permanentes, en su lugar, el campo magnético es generado a partir de electroimanes llamados polos de campo alimentados por una fuente externa. Para este caso, es necesario modelar el sistema donde se relacione la corriente aplicada a la bobina de inducción con respecto a la tensión inducida al rotor del generador, y finalmente la tensión de salida generada.

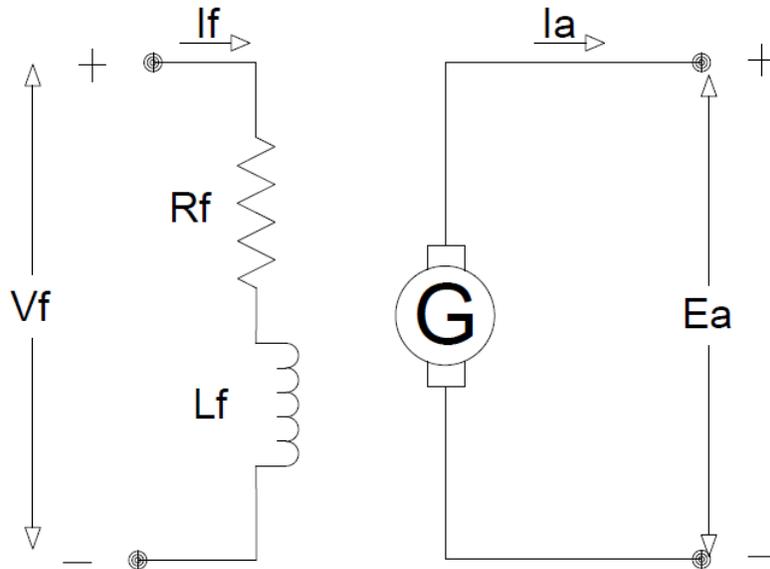


Figura 12. Diagrama eléctrico del generador con excitación independiente (Fuente: Diseño propio AutoCAD Electrical).

A partir del diagrama eléctrico del generador con excitación independiente (Figura 12) y por medio de la Ley de Tensiones de Kirchhoff se obtiene las ecuaciones respecto al tiempo, de manera que:

$$V_f(t) = R_f * I_f(t) + L_f * \frac{dI_f(t)}{dt} \quad (2.33)$$

Transformando al dominio de la frecuencia:

$$V_f(s) = R_f * I_f(s) + L_f * I_f(s) * s \quad (2.34)$$

Reagrupando:

$$V_f(s) = I_f(s) * (R_f + L_f * s) \quad (2.35)$$

$$\frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{(R_f + L_f * s)} \quad (2.36)$$

Además, sabiendo que el valor de la tensión inducida en un generador está dado por (Wildi, 2007):

$$E_a = \frac{Z * n * \Phi}{60} \quad (2.37)$$

Donde:

E_a =Tensión generada.

Z =Total de conductores en la armadura.

Φ =Flujo magnético.

n =Velocidad de rotación.

Seguidamente, sabiendo que el flujo magnético se representa de la siguiente manera:

$$\Phi = B * S \quad (2.38)$$

Donde:

B =Campo magnético de un inductor.

S =Área de la superficie que lo atraviesa.

El campo magnético B de un inductor se representa como:

$$B = \frac{m * N * i(t)}{L} \quad (2.39)$$

Con:

m =permeabilidad magnética.

N =Número de espiras del inductor.

i =Corriente que la circula.

L =Longitud del inductor.

Reagrupando:

$$E_a = \frac{Z * n * \frac{m * N * i(t)}{L} * S}{60} \quad (2.40)$$

Tomando como constantes:

$$K_a = \frac{Z * n * \frac{m * N}{L} * S}{60} \quad (2.41)$$

Lo ecuación (2.41) se reescribe como:

$$E_a(t) = K_a * I_f(t) \quad (2.42)$$

Transformando (2.42) al dominio de la frecuencia:

$$E_a(s) = K_a * I_f(s) \quad (2.43)$$

Reagrupando:

$$\frac{E_a(s)}{I_f(s)} = K_a \quad (2.44)$$

Finalmente, se obtiene la función de transferencia del generador con excitación independiente:

$$\frac{I_f(s)}{V_f(s)} * \frac{E_a(s)}{I_f(s)} = \frac{K_a}{(R_f + L_f * s)} \quad (2.45)$$

$$\frac{E_a(s)}{V_f(s)} = \frac{\frac{K_a}{L_f}}{(s + \frac{R_f}{L_f})} \quad (2.46)$$

3. Desarrollo metodológico

3.1. Automatización del sistema de detención

3.1.1. Pruebas de funcionamiento

En primera instancia, para iniciar el diseño del sistema de detención se realizaron las pruebas de consumo de corriente de los actuadores que se van a controlar (Tabla 3) con el fin de determinar las especificaciones de los componentes encargados del control de los equipos (contactores o relés).

Tabla 3. Pruebas de consumo de energía de los actuadores controlados (Fuente: Pruebas en la planta).

Equipo	Tensión (V DC)	Consumo (A)	
		Pico	Normal
Motor accionamiento del cierre del distribuidor	12	2.2 ⁽¹⁾	-
Motor de control de apertura/cierre válvula principal	12	20	12

Nota: (1) El motor al ser accionado por un tiempo muy corto, solo expone una corriente pico de 2.2A, y no fue posible obtener la corriente nominal del mismo, pero para cálculos posteriores, se asumirá de forma crítica la corriente nominal igual a la pico.

También se realiza el proceso manual de detención, puesta en marcha y acople a la red de la planta con el objetivo de determinar las variables y los procesos que se deben seguir al momento del diseño de la programación del PLC.

Finalmente, se probó el modelo preliminar existente encargado del cierre y apertura de la válvula principal, el cual consistía en un motor DC y un sistema de piñones y cadena con relación 1:1 que permitía el cierre de la válvula en 3 minutos.

3.1.1. Conversión de válvula principal

Para poder actuar eléctricamente sobre la válvula tipo compuerta del control de caudal (válvula principal), se necesita convertirla a un sistema electromecánico. Para esto propone instalar un motor de corriente continua y un sistema de piñón-cadena que se encargan de la transmisión del torque del motor hacia la válvula.

El diseño mecánico previo de la automatización de la válvula (Figura 13) no cuenta con realimentación sobre el estado de apertura; además, el sistema posee poca seguridad en relación a un posible descarrilamiento.



Figura 13. Diseño del sistema electromecánico previo (Fuente: Fotografía en la micro central).

Por esta razón se procede a realizar un diseño que cumpla con los siguientes requisitos:

- Seguridad ante descarrilamiento.
- Realimentación del estado de la válvula.
- Disminución en el tiempo de cierre de la válvula.
- Fácil ajuste de sensores.

- Reducción en el desgaste de la cadena.

Tomando en cuenta los requerimientos anteriores, en el nuevo diseño propuesto (Figura 14) se añaden dos guías de material nylon las cuales serán las encargadas de mantener la cadena en su correcta posición, evitando de esta manera el descarrilamiento.

Además, se sustituye el piñón que se encuentra acoplado al motor, encargado de la transmisión del torque hacia la válvula, por uno que cambie la relación de 1:1, a 3:1, con el fin de reducir el tiempo de cierre de 3 minutos a 1 minuto.

También se diseña un sistema que cuenta con un tornillo roscado que al girar hace que se deslice un collarín, el cual posee una extensión que colisiona con los sensores límites cuando la válvula se encuentra totalmente abierta o cerrada.

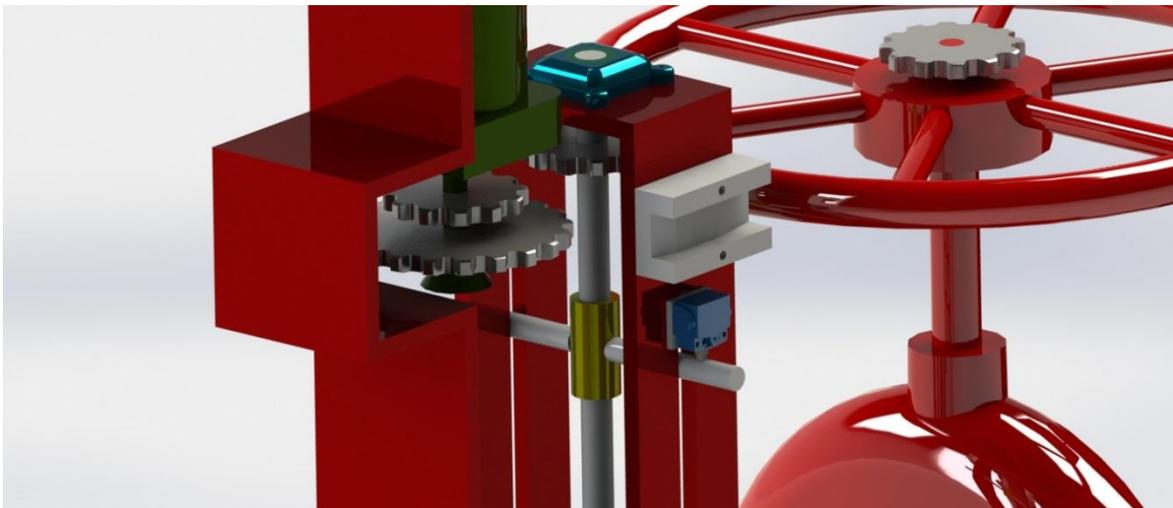


Figura 14. Diseño propuesto de la actualización del accionamiento electromecánico de la válvula principal (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).

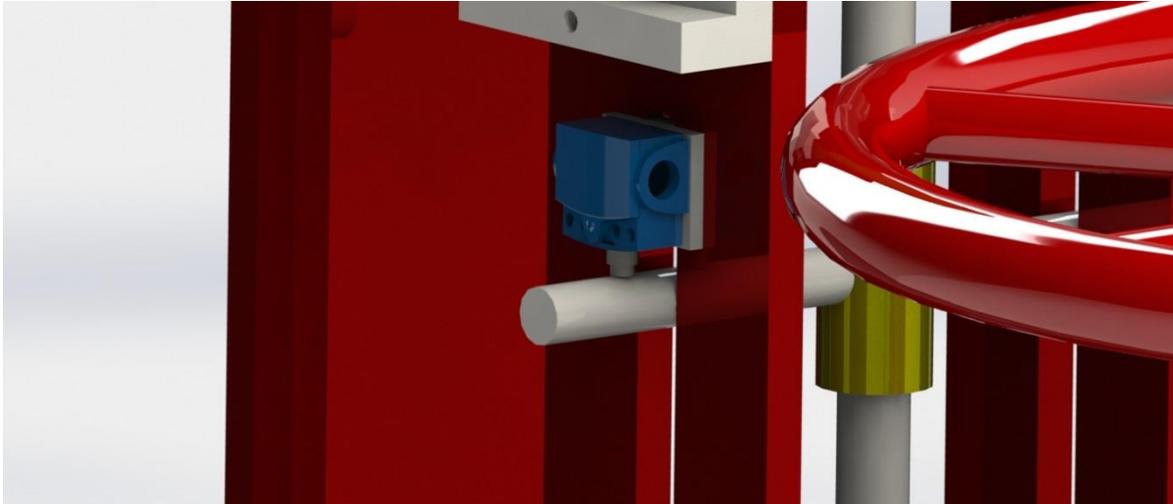


Figura 15. Contacto entre el sensor límite y la extensión del collarín (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).



Figura 16. Vista general del diseño propuesto de la actualización del accionamiento electromecánico de la válvula principal (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).

3.1.2. Selección de nuevos sensores

La solución a implementar, implica la selección de nuevos sensores para cubrir los posibles fallos que aún no se tienen en consideración por parte del módulo eléctrico existente. El primero de estos sensores consiste en un presostato (Figura 17) que permita visualizar la presión hidráulica del sistema de lubricación del cojinete de tope mediante una pantalla integrada en el sensor, y además, la generación de una alarma en caso de alcanzar los umbrales previamente programados (Figura 18).

La selección del presostato responde a los siguientes criterios:

Tabla 4. Parámetros para el criterio de selección del presostato (Fuente: Diseño de ingeniería).

Descripción	Parámetro
Fuente de alimentación	24V DC
Rango de operación	0- 206,843 kPa
Modo de operación	NO/NC y 4-20mA
Fluido	Aceite hidráulico
Otras	IP67



Figura 17. Presostato instalado, modelo XML-F010D2026 (Fuente Schneider Electric).

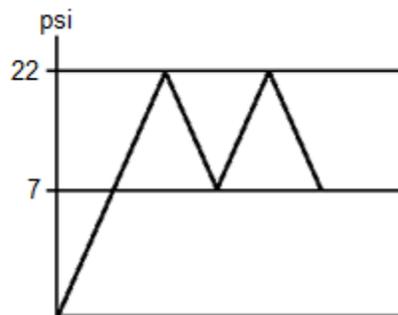


Figura 18. Tipo de programación de los umbrales de alarma (Fuente: Diseño propio en Paint).

En cuanto a la instalación, se requiere la desconexión del manómetro analógico que se encuentra sobre la bomba hidráulica, y por medio de una conexión de tipo T, se instalará el presostato y el mismo manómetro para poseer redundancia en la medición de presión.



Figura 19. Manómetro de la bomba hidráulica instalado previo a la automatización (Fuente: Fotografía en la micro central).

La metodología de programación del presostato responde al diagrama mostrado en la Figura 20, donde se establecen los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Selección de los parámetros programados al presostato (Fuente: Diseño de ingeniería).

Parámetro	Selección	Descripción
diSP/unit	Psi	Selección de la unidad a mostrar en la pantalla del sensor.
diSP/dA-d	FSt	Muestra del valor de presión sin filtro de tiempo.
SP01/out1	nPn1	Salida digital tipo npn.
SP01/Fct1	Fno1	Salida activa cuando la presión se encuentra dentro de los umbrales programados.
SP01/SP1	22	Umbral de presión superior.
SP01/rP1	7	Umbral de presión inferior.

Universal pressure sensors (4-20 mA or 0-10 V) + digital output
 "READ" menu, read the configuration of the product only and "PROG" menu, complete configuration of the product

Français : voir Légende des termes de l'afficheur page 10
 Deutsch : Siehe Anzeigebkürzungsliste Seite 10
 Español : ver leyenda de los términos del display página 10

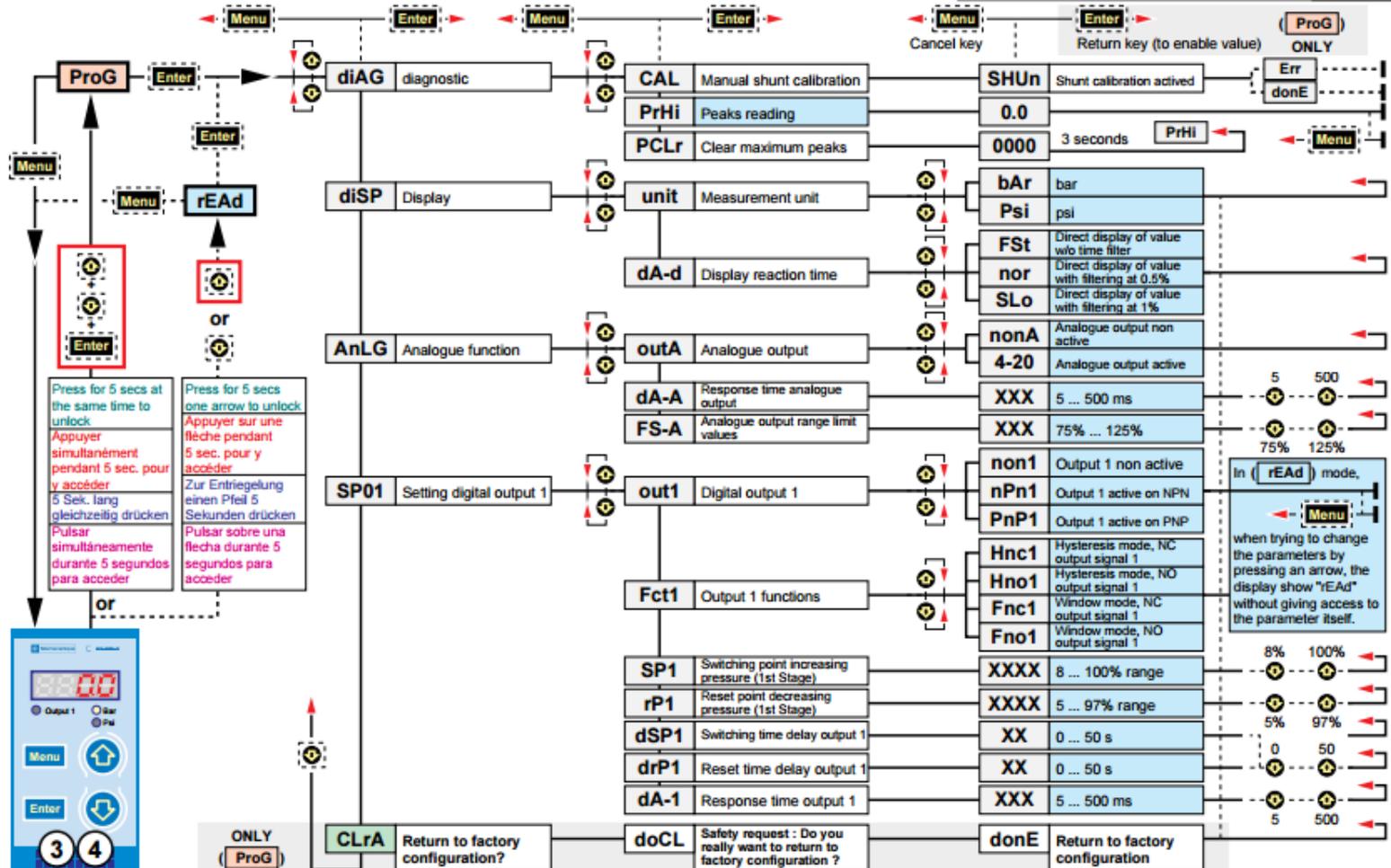


Figura 20. Procedimiento de programación del presostato XML-F010D206 (Fuente: Schneider Electric).

Además, se debe instalar un sensor inductivo (Figura 21) el cual se encargue de detectar una cuña en el eje de la turbina con el fin de monitorear su velocidad (Ejemplo de la aplicación: Figura 22).



Figura 21. Sensor inductivo instalado, modelo E2A-M12KS04-M1-B1 (Fuente: OMRON).

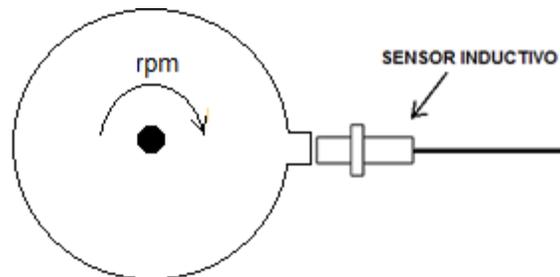


Figura 22. Sistema de monitoreo de velocidad utilizando un sensor inductivo (Fuente: Diseño propio en Paint).

Para la selección de este sensor, fue necesaria la evaluación de los siguientes parámetros:

Tabla 6. Parámetros para el criterio de selección del sensor inductivo (Diseño de ingeniería).

Descripción	Parámetro
Fuente de alimentación	24V DC
Frecuencia de operación	0-900 Hz
Distancia de detección	0-5mm
Modo de operación	NO/NC
Otras	IP67 Escudado

Para la instalación del sensor inductivo, se diseña una pieza en forma angular con ojo chino para una mayor facilidad en el ajuste del paralelismo que debe existir entre la cara del

sensor inductivo y el objeto a detectar. Además se debe ajustar la distancia de detección en relación a la recomendación de la hoja de datos del sensor equivalente a 3mm



Figura 23. Estructura propuesta para el montaje del sensor inductivo (Fuente: Fotografía en la micro central).

Finalmente, se deben instalar dos sensores límite (Figura 24) para el control de la válvula principal y así permitir una retroalimentación al sistema de control sobre el estado de la válvula (Abierta o Cerrada); descartando la opción de la instalación de un decodificador debido a la dificultad del montaje mecánico que este dispositivo implica. Además, esta última opción tampoco es viable debido a que su función esencial se extiende fuera de los alcances requeridos, ya que no es necesario identificar el estado de la válvula en toda su carrera.

El criterio de selección de los sensores límite se muestran a continuación:

Tabla 7. Parámetros para el criterio de selección de los sensores límite (Fuente: Diseño de ingeniería).

Descripción	Parámetro
Fuente de alimentación	24V DC
Modo de operación	NO/NC
Otras	IP67



Figura 24. Sensor límite para el monitoreo de posición de la válvula principal modelo ZCT21G11 (Fuente: Schneider Electric).

3.1.3. Selección de pantalla de monitoreo de RPM

La pantalla de monitoreo de revoluciones por minuto que se selecciona es la modelo LR5N-B (Figura 25). Esta funciona de forma que se debe presentar un pulso en la entrada por cada revolución dada por el eje que se monitorea (Figura 26).



Figura 25. Medidor de revoluciones por minuto LR5N-B (Fuente: Autonics).

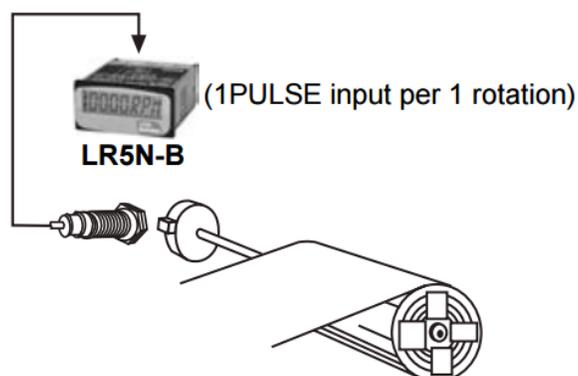


Figura 26. Descripción de la aplicación de la pantalla LR5N-B (Fuente: Autonics).

3.1.4. Diseño del sistema de alimentación y respaldo de energía

Selección de fuente de alimentación para el PLC y sensores

El criterio de selección requirió tomar en cuenta la potencia de consumo del PLC, los sensores y los indicadores de los botones (Tabla 8).

Tabla 8. Detalle de consumo de potencia de los dispositivos alimentados por la fuente de 24V DC (Fuente: Pruebas en la planta).

Componente	Modelo	Cantidad	Potencia (W)
PLC	TWDCAE40DRF	1	30
Sensor inductivo	E2A-M12KS04-M1-B1	1	4.8
Presostato	XML-F010D2026	1	1.92
Indicadores LED	XB4B4--B5	2	0.432
	Total		37.152

Por lo tanto, se selecciona la fuente de alimentación ABL8RPS24030 (Figura 27) la cual cumple con las siguientes características:

- Tensión de salida: 24V DC.
- Tensión de entrada: 120/240 V AC.
- Potencia: 72W.



Figura 27. Fuente Zelio 24V DC, 70W, modelo ABL8RPS24030 (Fuente: Schneider Electric).

Selección de UPS de respaldo para PLC y sensores

La UPS, es el dispositivo encargado de alimentar la fuente seleccionada en el punto previo (ABL8RPS24030). Es por ello que debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Tensión de salida: 120V AC.
- Tensión de entrada: 120V AC.
- Potencia a suministrar: 72W.

Por lo anterior se selecciona una UPS modelo SL-761, la cual posee los siguientes parámetros de funcionamiento que cumplen con los requerimientos anteriores:

- Tensión de salida: 120V AC.
- Tensión de entrada: 120V AC.
- Potencia: 375W.

Selección de fuente de alimentación para motores

La fuente de alimentación de los motores se selecciona de manera que cumpla con los siguientes requerimientos:

- Tensión de salida: 12V DC (Ver Tabla 3).
- Corriente: 14.2A (Ver Tabla 3).
- Tensión de entrada: 120/240V AC.

Es por ello que se selecciona la fuente modelo DVP-3212 la cual cuenta con las siguientes especificaciones:

- Tensión de salida: 12-13.8 V DC.
- Corriente máxima: 32A.
- Tensión de entrada: 120/240V AC.

Selección de batería de respaldo para alimentación de los motores

Finalmente se necesita seleccionar un módulo de energía de respaldo para los motores que consiste en una batería de 12V DC.

Se propone el uso de una batería modelo 27MDC, la cual tiene una capacidad de soportar la entrega de 10A continuos durante 1 hora (Exide Technologies, 2014).

El consumo total de ambos motores es de 14.2A (Ver Tabla 3), y la duración prevista del cierre de la válvula corresponde a 1 minuto, por lo que la descarga reflejada en la batería se calcula de la siguiente manera:

$$\%Descarga = \frac{14.2A \cdot min}{10A \cdot h} \times 100 = 2.36\% \quad (3.1)$$

Finalmente, se procede con la selección del cargador; este debe ejecutar la desconexión automática de la batería cuando esté totalmente cargada; es por esto que se selecciona un cargador modelo SS3512 (Figura 28) el cual cuenta con las siguientes características:

- Tensión: 13.8V DC
- Corriente: 5A.
- Protecciones:
 - Limitador de corriente.
 - Corto circuito.
 - Polaridad inversa.



Figura 28. Cargador automático de batería SS3512 (Fuente: PROSEMI, S.A.).

3.1.5. Entradas del PLC

El modo de conexión propuesto para las entradas del PLC es el conocido como “Sink Input”. Este consiste en interconectar la polaridad negativa de todas las entradas, como un nodo común, y luego, conectar la polaridad positiva de cada variable a su respectiva entrada al PLC (Figura 29).

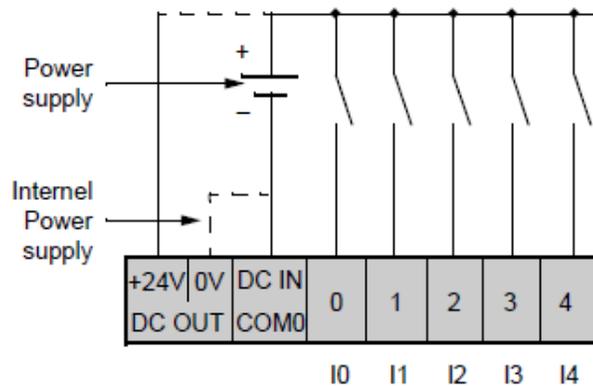


Figura 29. Ejemplo de la conexión tipo "Sink Input" (Fuente: Schneider Electric).

Además, se requiere la modificación del panel de potencia existente, con el fin de obtener una serie de señales necesarias para la operación del PLC; estas modificaciones se citan a continuación:

1. Desconexión de las señales de los componentes (Anexo 1.1.) RC5, 27/59, RC3, CT1, CT2, 50/51 que se conectan a la entrada A1 del relé RC1.

2. Conexión de las señales (Anexo 1.1.) RC3, 27/59, RC5, 50/51, CT1, CT2 a los relés (Apéndice A.1.) K1, K2, K3, K4, K5 y K6 respectivamente.
3. Añadir un contacto instantáneo al botón de paro de emergencia del panel de potencia para luego cablear la señal de la bornera X9.11 (Apéndice A.1.) al contacto instantáneo, y luego la conectar la otra salida del contacto instantáneo a la bornera X10.4 (Apéndice A.1.).
4. Desconectar la entrada 1 del botón de paro de emergencia (Anexo B.1.).
5. Conectar la bornera X7.6 (Apéndice A.1.) a la entrada 1 del botón de paro de emergencia (Anexo B.1.).
6. Conectar la bornera X7.7 (Apéndice A.1.) a la entrada 32 del relé RC1 (Anexo B.1.).
7. Añadir un contacto instantáneo al botón de apertura del interruptor BT1 (Anexo B.1) y después interconectar la entrada de 24V DC del contacto instantáneo del botón BT3 (Apéndice A.1.), y luego conectar la salida del contacto instantáneo a la bornera X10.7 (Apéndice A.1.).
8. Conectar la entrada 61 del contacto auxiliar del contactor 52 (Anexo B.1.) a la bornera X9.13 y la salida 62, conectarla a la bornera X10.6 (Apéndice A.1.).

Cabe mencionar, que algunas de las señales indicadas anteriormente no consisten en una señal operable por el PLC (Tabla 9), es por ello que no se conectan directamente al PLC, y se debe utilizar relés como interface de acción (Figura 30). El modelo seleccionado es el RXM2AB2F7 (Figura 31), el cual posee una bobina de control a 120V AC, y su circuito de contacto puede operar a 24V DC (Apéndice A.1, ficha D4-00).

Tabla 9. Descripción de las variables que se deben manejar en el diseño del sistema de detención (Fuente: Diseño de ingeniería).

Detalle	Tipo de señal	Tensión	Operable por el PLC
Transistor (Sensor inductivo)	Tren de pulsos	24V DC	SI
Selector	Discreta	24V DC	SI
Pulsador	Discreta	24V DC	SI
Selector	Discreta	24V DC	SI
Selector	Discreta	24V DC	SI
Pulsador	Discreta	24V DC	SI
Contacto (Sensor límite)	Discreta	24V DC	SI
Contacto (Sensor límite)	Discreta	24V DC	SI
Contacto (Relé)	Alterna	120V AC	NO
Contacto (Relé)	Alterna	120V AC	NO
Contacto (Relé)	Alterna	120V AC	NO
Contacto (Relé)	Alterna	120V AC	NO
Contacto (Relé)	Alterna	120V AC	NO
Contacto (Relé)	Alterna	120V AC	NO
Pulsador	Discreta	24V DC	SI
Contacto (Presostato)	Discreta	24V DC	SI
Contacto (Relé)	Discreta	24V DC	SI

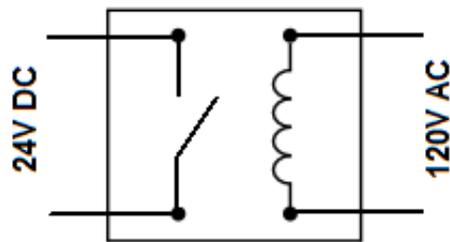


Figura 30. Esquema simplificado de la interfaz 120V AC-24V DC tipo relé (Fuente: Diseño propio en Paint).



Figura 31. Relé modelo RXM2AB2F7 (Fuente: Schneider Electric).

Las demás señales que si son operables por el PLC se conectan directamente al mismo; únicamente se tiene una señal especial enviada por parte del sensor inductivo, la cual corresponde a un tren de pulsos por lo que es necesario conectarla a la entrada “muy rápida” del PLC.

3.1.6. PLC y programación

Se utilizará un PLC TWDCDE40DRF que permita la lectura de las variables que implican una desconexión de la micro central hidroeléctrica por fallas mecánicas o eléctricas, además, la actuación sobre los relés y contactores que permiten el accionamiento de los motores de la válvula principal y del distribuidor.

Los requisitos que debe cumplir esta programación se citan a continuación:

- Seleccionar modo de operación entre “Automático” o “Manual”.

Modo manual

- Abrir válvula principal por medio de un selector de dos posiciones con enclavamiento.
- Cerrar válvula principal por medio de un selector de dos posiciones con enclavamiento.
- El procedimiento de mantener presionado el botón de reseteo y además seleccionar la apertura o cierre de la válvula principal, provocará una memorización de la

operación de apertura o cierre hasta que uno de los sensores límite sea activado, o cuando se seleccione el proceso inverso que se está ejecutando.

- Abrir el distribuidor por medio de un botón pulsador.
- Reseteo del PLC en caso de falla de la planta hidroeléctrica por medio de un botón pulsador.
- Generar paro de emergencia al presionar un botón de paro de emergencia.
- En caso de generarse alguna falla (Tabla 10) se procede con la detención automática del sistema.

Modo automático, planta desacoplada

- Cuando se genera un fallo (Tabla 10), se inicia el proceso de detención automática.
- Cuando se encuentre dentro de un rango de 1300 rpm y 1400 rpm, se cierra el relé encargado de la permisión de acople a la red de la planta y se enciende un indicador de luz verde parpadeante.
- Al pulsar el botón de acople a la red, y si se cumple la igualdad entre los parámetros de tensión y frecuencia, la planta se acopla.

Modo automático, planta acoplada

- Cuando se genera un fallo (Tabla 10), se inicia el proceso de detención automática.
- El botón de acople a la red estará activo de forma fija.
- En caso de presionar el botón de desacople a la red, la planta se desacoplará.

Modo secuencia de detención

- Se abre el contactor que conecta la red externa con el generador.
- Se activa de forma parpadeante el botón de falla.
- Se activa el cierre de la válvula principal hasta activarse el sensor límite inferior.
- Se activa el cierre del distribuidor durante 100 ms.
- Se mantiene en estado de espera que causa que el operario no pueda presionar ningún botón más que el de reseteo.

La programación se realiza en lenguaje escalera, utilizando un diseño previo tipo graficet (Figura 32) para un mejor manejo de las condiciones y resultados que se desean obtener.

Tabla 10. Descripción de los tipos de fallas de la central hidroeléctrica (Fuente: Diseño de ingeniería).

TIPO DE FALLA	UMBRALES			AUTO ⁽¹⁾	MAN ⁽²⁾
	min.	Max.	unidad		
Potencia inversa	-	-	W	X	-
Sobre/baja tensión	16%	2%	V	X	-
Sobre/baja frecuencia	2%	2%	Hz	X	-
Sobre corriente	-	200	A	X	X
Temperatura en cojinete de soporte	-	45	°C	X	X
Temperatura en cojinete de tope	-	45	°C	X	X
Botón paro de emergencia	-	-	-	X	X
Presión	48,2633	151,685	kPa	X	X ⁽³⁾
Velocidad	1140-1260 ⁽⁴⁾	1380	rpm	X	X

Nota:

- (1) Panel en modo Automático.
- (2) Panel en modo Manual.
- (3) Solo en caso de superar las 660 rpm.
- (4) No es una falla, solo no permite acoplar la planta en estado manual.

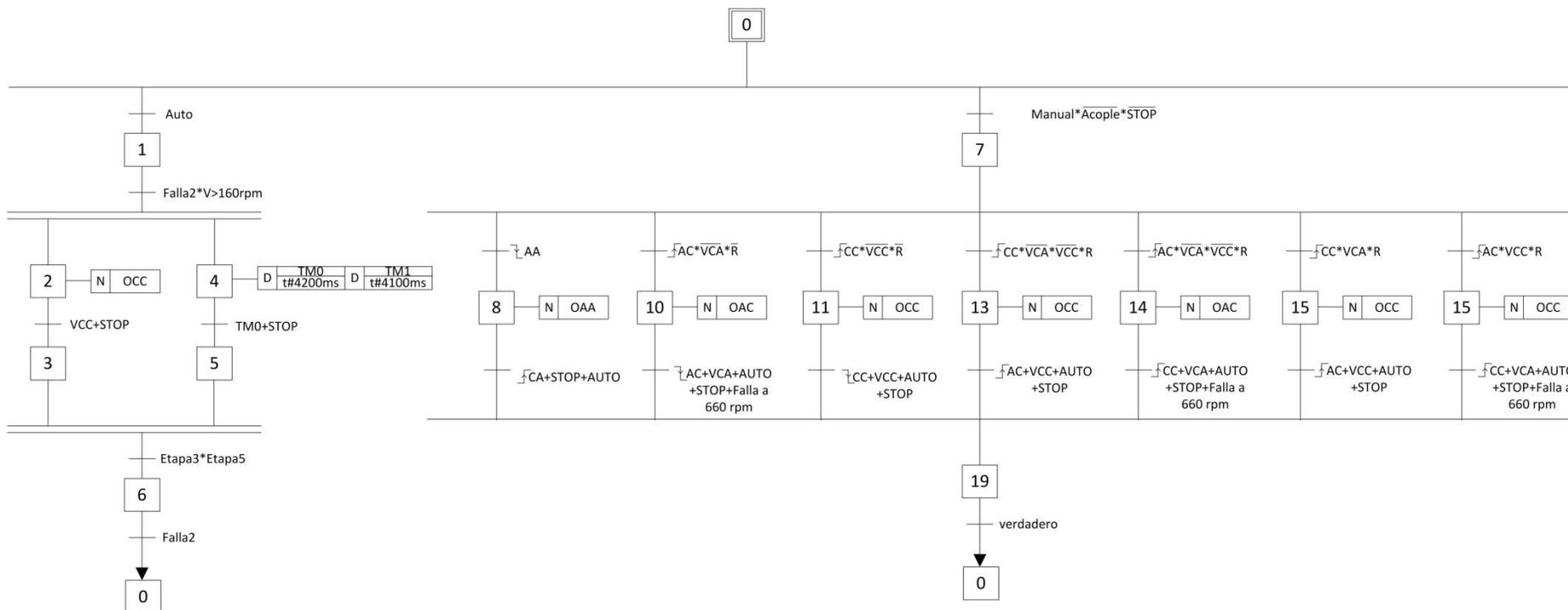


Figura 32. Graficet del sistema de detención automático (Fuente: Diseño propio en Microsoft Visio).

Para más detalle de la programación revisar los apéndices A.2., A.3. y A.4..

3.1.7. Salidas del PLC

Para generar el cambio de giro del motor de la válvula principal, se utilizan dos contactores los cuales permitirán el paso de una corriente pico de 20A a los motores, alternando en cada uno de ellos la polaridad de salida al motor (Figura 33 y Figura 34). El modelo que se propone es el LC1D25BD (Figura 35) con una especificación de corriente máxima del circuito de potencia de 25A.

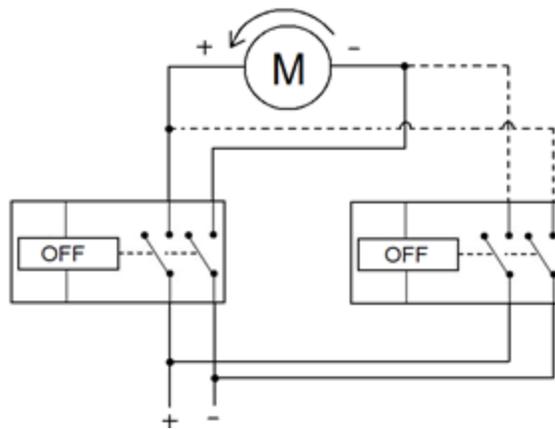


Figura 33. Control de giro antihorario del motor por medio de relés/contactores (Diseño propio en Paint).

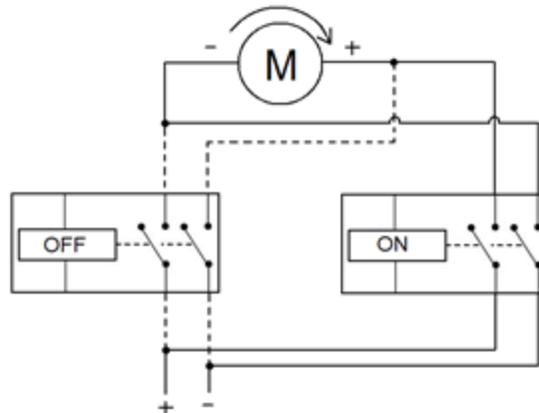


Figura 34. Control de giro horario del motor por medio de relés/contactores (Diseño propio en Paint).



Figura 35. Contactor modelo LC1D25BD (Fuente: Schneider Electric).

La misma aplicación corresponde para el cambio de giro del motor encargado de la apertura o cierre del distribuidor. En este caso, al poseer una corriente pico de 2.2A, se plantea el uso de dos relés modelo RXM4AB2BD los cuales son capaces de soportar una corriente nominal de 6A en el circuito de potencia (Figura 36).



Figura 36. Relé modelo RXM4AB2BD (Fuente: Schneider Electric).

Cabe mencionar que los dos relés y los dos contactores de control de giro de los motores, se controlan mediante el PLC activando o desactivando la bobina de 24V DC, con un consumo de corriente de 5mA (Para más detalle de la configuración revisar los planos incluidos en el apéndice A.1., ficha B2-00).

Además, se debe instalar un relé RXM4AB2BD (Figura 36) que se encargue de permitir que el operario pueda acoplar la planta a la red. El circuito de potencia de este relé, también es utilizado como circuito de control, de manera que no tiene un consumo de corriente

elevado, simplemente se necesita como interfaz de 24V DC a 120V AC, ya que los 120V AC se encargan de activar la bobina de otro relé encargado directamente cerrar el circuito que conecta el generador con la red externa (Para más detalle de la configuración revisar los planos incluidos en el apéndice A.1., ficha D4-00).

3.1.8. Protecciones

El diseño eléctrico del sistema, se diseña con una serie de protecciones que permiten brindar seguridad y confiabilidad al sistema. Se propone el uso de interruptores termomagnéticos que permiten la desconexión de las líneas en caso de que se sobrepase un límite de corriente. Estos interruptores se encuentran instalados tal como se menciona a continuación:

Previo a la fuente Zelio de 24V DC (Modelo ABL8RPS24030)

Se opta por un interruptor termomagnético modelo A9F74204 (Figura 37) debido a que la corriente máxima que la fuente permite en su entrada es de 30A durante 2s; mientras que el interruptor desconectará las líneas de potencia instantáneamente al presentarse una corriente mayor o igual a 4A.

Previo a todo el sistema eléctrico (Línea C y neutro en entrada al panel de control)

Se selecciona un interruptor termomagnético modelo A9F74232 (Figura 37) debido a que la corriente pico del sistema corresponde a 3A por parte de la alimentación del PLC, y los 22.2A de la fuente de alimentación de los motores, para un total de 25.2A; mientras que el interruptor desconectará las líneas de potencia instantáneamente al presentarse una corriente mayor o igual a 32A.

Previo a la fuente de DC y la batería de alimentación de los motores

Se elige un interruptor termomagnético modelo A9F74232 (Figura 37) debido a que la corriente pico de consumo de los motores es de 22.2A; mientras que el interruptor desconectará las líneas de potencia instantáneamente al presentarse una corriente mayor o igual a 32A.



Figura 37. Interruptor termomagnético modelo A9F74232 y A9F74204 (Fuente: Schneider Electric).

Además, se implementará un contactor LC1D38G7 (Figura 38) que permita la desconexión de la fuente DC cuando falla la energía externa de la planta, y así evitar el deterioro de los componentes internos de dicho componente.



Figura 38. Contactor modelo LC1D38G7 (Fuente: Schneider Electric).

También se instalará un rectificador modelo NTE5342 (Figura 39) para la protección de corriente inversa en la batería de respaldo, esto con el fin de evitar que tanto la fuente de alimentación de los motores, como los mismos motores, puedan transmitir una corriente hacia la batería y así disminuir su vida útil, ya que la batería requiere de un método especial de carga que solo lo brinda el cargador de baterías instalado. Se selecciona este modelo debido a que la corriente pico que supe la batería es de 22.2A, mientras que este rectificador es capaz de soportar una corriente media en directa de 40A.



Figura 39. Rectificador modelo NTE5342 (Fuente: NTE Electronics).

3.1.9. Aterrizaje de dispositivos

Finalmente, se aterriza la fuente DC Zelio de 24V DC (Modelo ABL8RPS24030) y el PLC (Modelo TWDLCAE40DRF) al chasis del gabinete, esto para brindar seguridad a los equipos de manera que en caso de presentarse una falla por sobrecorriente, esta sea descargada al chasis y no dañe los componentes aterrizados.

3.1.10. Distribución de equipos en el panel eléctrico

El panel de control es el gabinete en el cual se instalan los contactores, interruptores y relés (Para más información ver anexo A.1.) encargados de controlar el accionamiento de los motores. Además, tiene como función proteger el PLC y la fuente de alimentación del mismo ante los factores externos presentes en la planta, tales como humedad y temperatura. La distribución de los equipos dentro del panel se diseñó buscando un fácil y rápido mantenimiento; de manera que se agruparon los componentes por función:

- Fuente de alimentación (24V DC, 3A), PLC.
- Relés de control del motor del gobernador.
- Contactores de control del motor de la válvula principal.
- Relés de interfaz de la sección de potencia (120V AC) y el circuito de control (24V DC).
- Borneras.
- Los interruptores se encuentran junto al dispositivo que se ve afectado en caso de su cambio de estado.

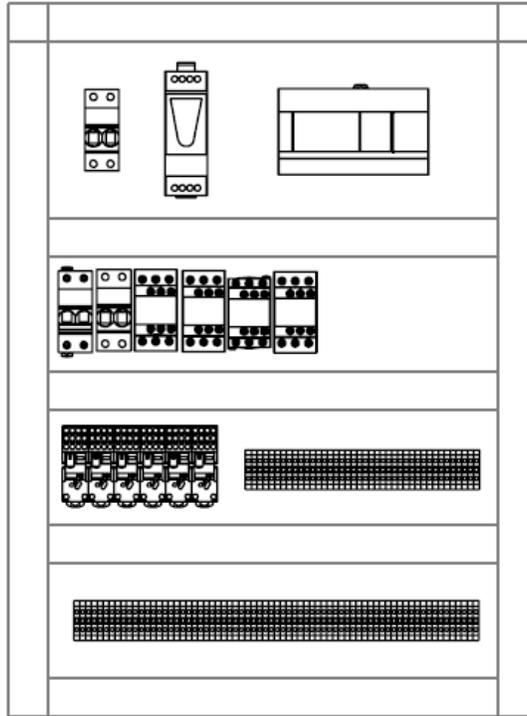


Figura 40. Propuesta de distribución de los equipos dentro del panel de control (Fuente: Diseño propio en SolidWorks con modelos de Schneider Electric).

En la puerta principal del panel, se instalarán los botones y selectores para el control manual o automático del panel y sus variables, así también una pantalla que permite mostrar al operario la velocidad actual de la turbina (Figura 41).

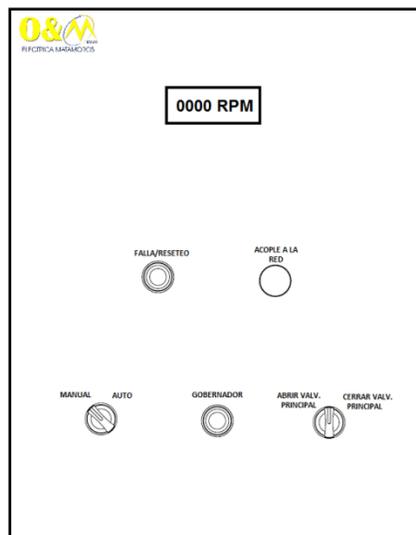


Figura 41. Propuesta de la parte frontal del panel (Fuente: Fotografía en la micro central).

3.1.11. Módulo de envío de informe

Se diseña un módulo encargado de emitir un informe de manera remota vía internet al momento en que ocurra un evento importante en la micro central tal como un aumento sobre los 45°C en la temperatura del cojinete de tope o de soporte, falla por sobre/baja tensión, sobre/baja frecuencia, potencia inversa, sobrecorriente, por sobre velocidad en la turbina, o por una presión en el sistema hidráulico del cojinete de tope fuera del rango de 48,2633 kPa a 151,685 kPa; además por la detención por paro de emergencia, desconexión de la red externa o por desacople autorizado por el operador. Para esto se propone el uso de una tarjeta de programación llamada Arduino YUN para permitir la conexión a internet vía Ethernet.

Se proponen dos diseños; el primero consiste en que al presentarse una falla, la salida Q0.0 del PLC se encarga de establecer un porcentaje de PWM específico para cada evento (Tabla 11). La entrada digital del Arduino, se encarga de decodificar el porcentaje de PWM para luego enviar el informe a la red. El diseño requiere de una interfaz que aisle la señal de 24V DC emitida por el PLC de la señal de 5V DC del Arduino, y que además sea de alta frecuencia de interrupción ya que responderá a la señal de tipo PWM. Por lo que se propone el uso de un relé de estado sólido modelo SSM1D26BD (Figura 42).

Tabla 11. Detalle del porcentaje del PWM de la salida Q0.0 del PLC respecto al tipo de evento presentado (Fuente: Diseño de ingeniería).

Tipo de evento	PWM (%)
Acoplada	3
Falla por potencia inversa	7
Falla por sobre/baja tensión	13
Falla por sobre/baja frecuencia	17
Falla por sobrecorriente	23
Falla por temperatura en cojinete de soporte	27
Falla por temperatura en cojinete de tope	33
Falla por presión	37
Falla por velocidad	43
Falla de red	47
Falla de paro de emergencia	53
Desacople autorizado	57



Figura 42. Relé de estado sólido modelo SSMID26BD (Fuente: Schneider Electric).

El otro diseño propuesto e implementado, consiste en el uso de una de las salidas digitales del PLC, la cual envía una señal en alto, un tiempo específico para cada falla. Con esto se elimina la necesidad de que el dispositivo que aísle la señal del PLC con la del Arduino sea de alta frecuencia de interrupción, pudiendo utilizar un relé conmutado por bobina modelo C383RL24D de EATON (Figura 43).

Tabla 12. Detalle del tiempo en alto de la salida digital del PLC en relación al tipo de evento presentado (Fuente: Diseño de ingeniería).

Tipo de evento	Tiempo (s)
Acoplada	1
Falla por potencia inversa	2
Falla por sobre/baja tensión	3
Falla por sobre/baja frecuencia	4
Falla por sobrecorriente	5
Falla por temperatura en cojinete de soporte	6
Falla por temperatura en cojinete de tope	7
Falla por presión	8
Falla por velocidad	9
Falla de red	10
Falla de paro de emergencia	11
Desacople autorizado	12



Figura 43. Relé de tipo bloque modelo C383RL24D (Fuente: EATON).

Una vez que se tenga decodificado el tipo de evento, se enviará un informe hacia la plataforma web Carriots, en donde se almacena cada tipo de falla junto con la fecha y hora del evento, y después de la adquisición del dato, se enviará un correo electrónico y un mensaje de texto al encargado de la planta.

3.2. Diseño del regulador teórico para el control automático de frecuencia.

Para el diseño del regulador, se procede a obtener la función de transferencia del sistema que relaciona la apertura del gobernador con la velocidad de la turbina.

Tomando como referencia la ecuación (2.13) del marco teórico, se calcula el tiempo de reacción del agua T_w con respecto a los valores característicos de la micro central hidroeléctrica (Tabla 1):

$$T_w = \frac{100 \cdot 2.345}{9.81 \cdot 18} = 1.328 \text{ s}$$

Sustituyendo el parámetro T_w en la ecuación (2.32), y especificando los demás valores de cada variable se tiene que la función de transferencia es:

$$\frac{\omega(s)}{G(s)} = \frac{1000 * 0.385 * 0.4}{27} \frac{1}{s * (1.328 * s * +1)} \quad (3.2)$$

Simplificando la ecuación (3.2):

$$\frac{\omega(s)}{G(s)} = \frac{77}{17.93 * s^2 + 27 * s} \quad (3.3)$$

Ahora se procede a diseñar un controlador que permita regular el sistema para que posea una salida con bajo sobreimpulso con el fin de disminuir la fatiga mecánica en los diferentes elementos que integran el sistema, además, un error en estado estacionario igual a cero ya que de lo contrario, al momento de realizar el procedimiento de sincronización, la máquina no podrá acoplar por el desfase entre frecuencias del generador con respecto a la red externa; y finalmente, el tiempo de estabilización no es significativamente relevante, debido a que es un sistema lento y se desea que se aproveche más una disminución del sobreimpulso. En resumen, se citan a continuación la cuantificación de dichos comportamientos:

$$\text{Sobreimpulso} < 3\%$$

$$\text{Error en estado estable} = 0$$

$$\text{Tiempo de estabilización (2\%)} < 2 \text{ s.}$$

Previo al diseño, se debe verificar las características actuales del sistema; esto se realiza por medio de la respuesta de la función de transferencia de la ecuación (3.3) ante un escalón utilizando el programa Matlab, donde se obtiene un comportamiento con un sobreimpulso de 21.6%, el tiempo de estabilización a 4.88 s y un error en estado estable de 0 (Figura 44).

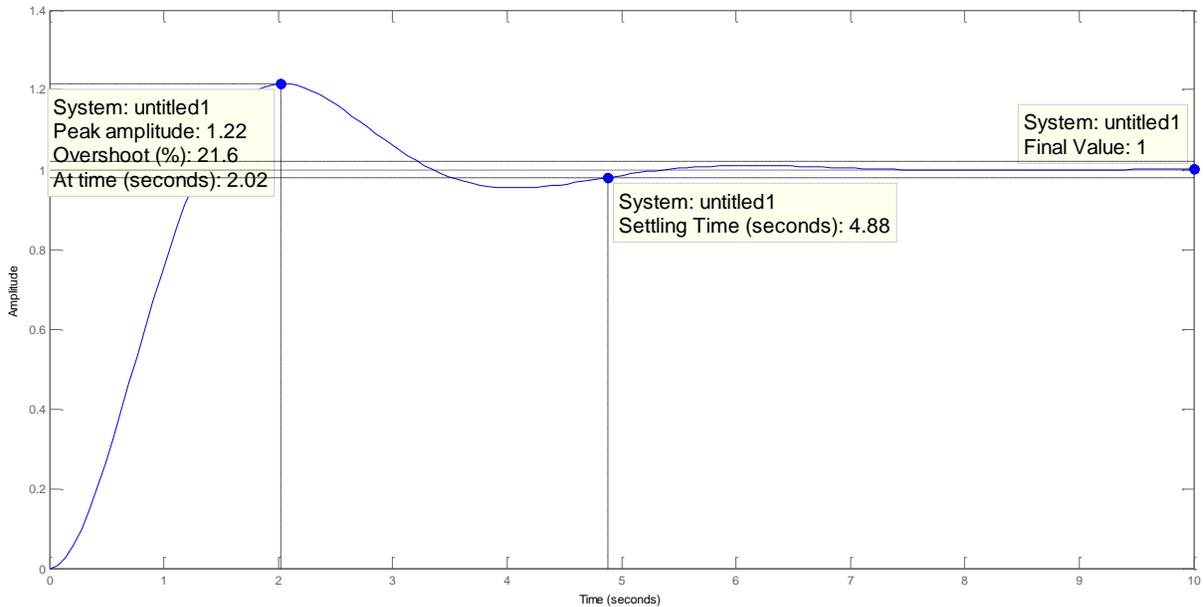


Figura 44. Respuesta ante un escalón del sistema de control de frecuencia respecto a la apertura del distribuidor sin regulador (Fuente: Diseño propio en Matlab).

Es por ello que se procede a diseñar un regulador de adelanto con el fin de reducir el sobreimpulso (Anexo A.5.). El regulador de adelanto va a disminuir el sobreimpulso a medida de que el tiempo de estabilización aumenta, sin embargo, tal como se mencionó en la propuesta de diseño, no es un problema debido a que es un sistema mecánicamente lento e incluso no debe poseer cambios bruscos en su velocidad de operación.

Aplicando el controlador diseñado, se obtiene como resultado una respuesta ante un escalón (Figura 45) con un error en estado estable de 0, un sobreimpulso de 1.97% y un tiempo de estabilización de 1.25 segundos.

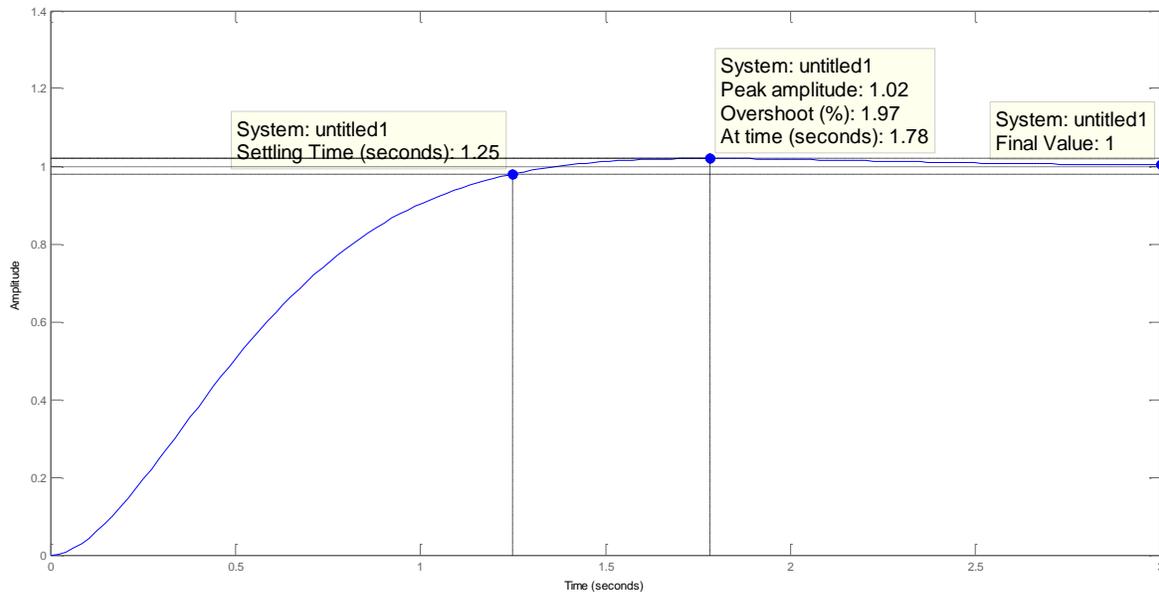


Figura 45. Respuesta ante un escalón del sistema de control de frecuencia respecto a la apertura del distribuidor con regulador de adelanto (Fuente: Diseño propio en Matlab).

3.3. Automatización del sistema de control de frecuencia.

En la sección 1.3 “Enfoque de la solución”, se menciona de la posibilidad de automatizar el gobernador mecánico que actualmente se encuentra en operación, mediante la instalación de un motor y un sistema de piñones y cadenas para la manipulación electromecánica de la manivela del gobernador, sin embargo, se propone sustituir el gobernador, manteniendo el principio esencial que consiste en la regulación de la apertura y cierre del distribuidor mediante la actuación lineal de un pistón, transformando la fuerza lineal mediante un sistema tipo biela que ejecute el proceso de rotación de los álabes móviles de la turbina. Este nuevo sistema, estará compuesto en principio, por un cilindro hidráulico y un sensor de posición para realimentar al sistema sobre el porcentaje de abertura del distribuidor; además de los componentes oleohidráulicos y de control que se retomarán en las secciones posteriores a este capítulo.

Los siguientes puntos representan ventajas del sistema de regulación de la apertura del distribuidor por medio de un pistón hidráulico, y no con la automatización del gobernador anterior:

- Se reducen variables de desajuste que el gobernador posea de manera interna debido al tiempo que lleva en operación.

- Se reduce la cantidad de componentes en el sistema, que implica una mayor facilidad en los procedimientos de mantenimiento. Además al reducir la cantidad de componentes, se aumenta la confiabilidad del sistema al haber menos elementos que podrían fallar.
- El montaje mecánico de un pistón es de menor complejidad que el montaje de un motor y el sistema de piñones que este último conlleva para acoplarse al sistema de manivela ya existente.
- Se evita el desajuste por el estiramiento de cadenas, crítico en este módulo de control debido a la gran precisión que se necesita al momento de regular la posición de los álabes.

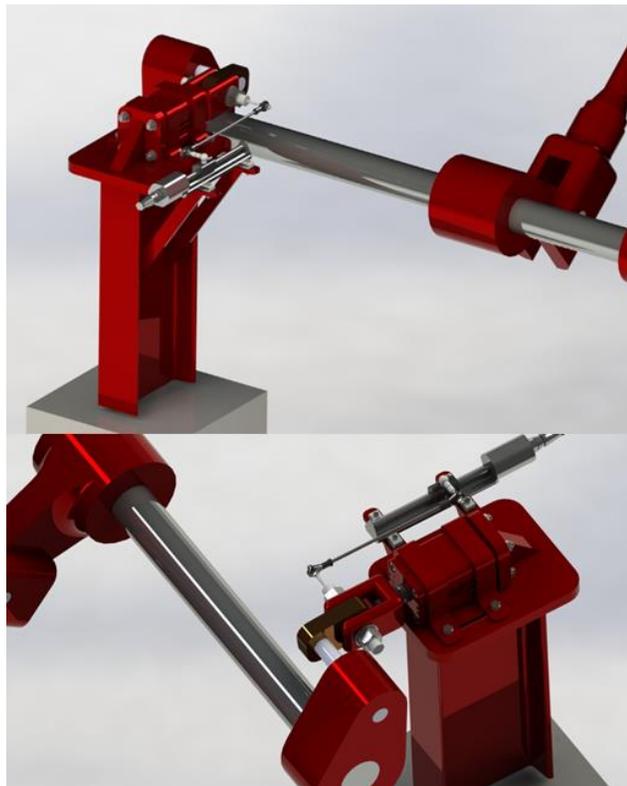


Figura 46. Propuesta de sustitución del gobernador por un actuador lineal (Fuente: Diseño propio en SolidWorks, Fuente de cilindro: Parker).

3.3.1. Selección de actuador lineal.

En primera instancia se consideró que la carrera fuera igual o mayor al del pistón del gobernador actual. Para determinar esta longitud, fue necesario hacerlo en la planta

mediante un calibrador y manipulando al gobernador de manera manual, se cerró los álabes por completo, luego, se identifica esta posición mediante una indicación, y posterior se abrió por completo los álabes y se tomó la medida entre la diferencia de la nueva posición con respecto a la indicación previa, obteniendo como resultado una distancia de carrera de 34.44mm. Además, se necesita que sea un pistón hidráulico y no neumático debido a la fuerza que deberá aplicar, además de que el control de posición en un cilindro neumático no permite una regulación en toda su carrera. También, se requiere que los acoples de conexión del sistema hidráulico sean de tipo NPTF, ya que las demás conexiones de los sistemas ya instalados en la planta son de este tipo de acople.

Finalmente, al no contar con un dispositivo de medición que permita obtener la magnitud de la fuerza de empuje que debe poseer el pistón, se procede a seleccionar uno de manera que se respeten las dimensiones del diámetro y presión hidráulica del cilindro interno del gobernador.

Tabla 13. Resumen de los requerimientos del actuador lineal (Fuente: Diseño de ingeniería).

Parámetro	Requerimiento
Tipo de pistón	Hidráulico
Carrera mínima del pistón	50mm
Diámetro mínima del pistón	20mm
Presión mínima de trabajo	96,5266 kPa
Material	Aluminio/Acero inoxidable
Tipo de acoples	NPTF Rosca de tubería

Finalmente, se selecciona el modelo 20TCHEBU4M60, del proveedor PARKER, el cual cumple los requerimientos especificados (Tabla 14).

Tabla 14. Características del cilindro modelo 20TCHEBU4M60 (Fuente: Parker).

Parámetro	Descripción	Código
Diámetro	20 mm	20
Vástago	Simple	-
Montaje	Estándar	T
Series	Cuerpo de aluminio	CHE
Tipo de pistón	No magnético	B
Conexión	Rosca de tubería NPTF	U
Sello	Estándar (Clase 1)	1
Modificaciones especiales	Ninguna	-
Tipo de final del vástago	Estilo 4 (Macho pequeño)	4
Tipo de rosca del vástago	Métrico	M
Carrera	60	mm
Tipo de puerto	Rosca de tubería NPTF	U
Tamaño de puerto	1/8" NPTF	NP13
Posición del puerto	Posición 1	1



Figura 47. Propuesta de montaje del cilindro modelo 20TCHEBU4M60 (Fuente del diseño: Diseño propio en Solidworks, Fuente del cilindro: Parker).

3.3.2. Selección de sensor de posición.

Para la selección del sensor que determinará la posición de la carrera del pistón se necesitó respetar los parámetros de la Tabla 15.

Tabla 15. Parámetros de selección del sensor de posición de la carrera del pistón (Fuente: Diseño de ingeniería).

Parámetro	Requerimiento
Carrera	60 mm mínimo
Resolución	1mm
Alimentación	24V DC
Señal	Analógica 4-20mA ó 0-10V

Preliminarmente se tiene dos propuestas de sensores, la primera consiste en el uso de un sensor ultrasónico fijado en el cuerpo del cilindro y que esté monitoreando la posición de una placa fijada al final del eje del pistón, tal como se muestra en la Figura 48.

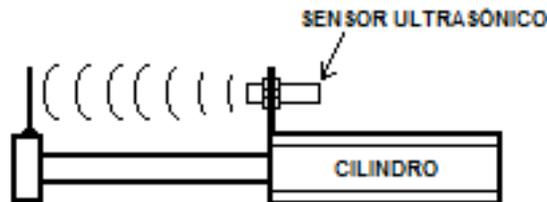


Figura 48. Propuesta de sensor ultrasónico para monitoreo de posición de la carrera de un cilindro hidráulico (Fuente: Diseño propio en Paint).

El problema de este diseño radica en que se podría interferir la señal fácilmente, de manera que un objeto obstaculice la zona de monitoreo. Además, en el sistema se presentan vibraciones que hace que la longitud de la onda que emite el sensor regrese con distorsión, implicando una lectura errónea de la posición.

Es por esto que se selecciona un sensor magnético de posición modelo MPA1/100SB01, el cual se encontrará acoplado al vástago del cilindro por medio de una barra de acople, la cual a su vez se acoplará mediante rodillas que permitan un pequeño desalineamiento necesario en el momento de la instalación y el movimiento lineal del pistón.



Figura 49. Propuesta de montaje del transductor de posición modelo MPA1/100SB01 (Fuente: Diseño propio en SolidWorks).

3.3.3. Diseño del sistema oleohidráulico.

Para el sistema de potencia hidráulica será necesaria la instalación de una central hidráulica la cual deberá operar a no menos de 96,5266 kPa con el fin de asegurar la operación del cilindro que sustituirá al gobernador.

Dicha instalación deberá contar con el sistema de alimentación principal compuesto por una cuba, la cual corresponde al reservorio de aceite hidráulico. A continuación se debe instalar una bomba capaz de aumentar la presión del aceite a 96,5266 kPa, seguido de un tanque de almacenamiento para mantener la presión estable y hacer posible que la bomba no requiera estar accionada en todo momento.

Además debe contar con sistemas de seguridad, tales como lo son los filtros en los puntos previos al cilindro, bomba hidráulica, y al acumulador, con el fin de asegurar de que cualquier partícula que se pueda desprender en el sistema, no ingrese nunca a estos dispositivos. Además, se diseña de forma que cuente con aliviadores de presión posterior a la bomba y el acumulador, los cuales son los encargados de suplir de presión al sistema.

También se requiere instalar válvulas anti-retorno en la conexión antes del acumulador y la bomba, con el fin de que una sobre-presión, dada por la falla de alguno de los elementos mencionados anteriormente, no afecte a la entrada de los sistemas previos.

En relación a los dispositivos de monitoreo, será necesario instalar manómetros en los puntos donde la presión es crítica, como lo son el cilindro, el acumulador y la bomba. Finalmente, se instalará un presostato digital posterior al acumulador, modelo XML-F010D2026 (Figura 17), el cual se debe comunicar con el PLC, para que en caso de que la presión se encuentre fuera de un rango establecido, el sistema sea capaz de detener la planta

automáticamente, operando sobre el cierre de la válvula principal de la turbina y la desconexión de la bomba hidráulica; de la misma manera, se deberá instalar una sonda de temperatura PT100 (Figura 50) en el acumulador para monitorear un aumento de temperatura que también deberá provocar la detención automática de la central.



Figura 50. Sonda de temperatura PT100 (Fuente: Ocean Controls).

Finalmente, se debe instalar una válvula proporcional que permita controlar el caudal de entrada del actuador lineal, esto con el fin de tener la capacidad de variar la posición del pistón con alta precisión. Este dispositivo es capaz de controlar el flujo de 0 al 100% con respecto al caudal del sistema oleohidráulico (Figura 51), por medio de una señal de control, ya sea mediante tensión (0-10VDC o ± 10 VDC) o corriente (4-20mA) (Figura 53); sin embargo, será necesario instalar previo a la entrada de caudal de la válvula proporcional, un regulador de caudal manual, con el fin de controlar la relación de porcentaje de apertura con respecto a la velocidad del pistón.

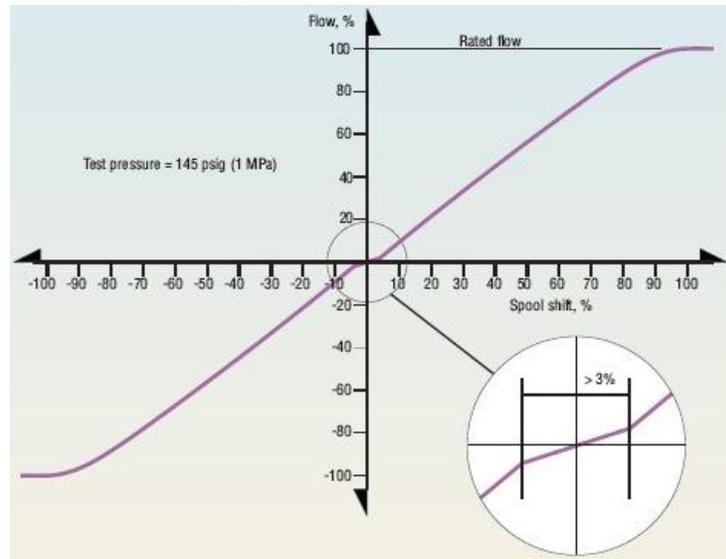


Figura 51. Características de flujo de una válvula proporcional (Fuente: Max Machinery).

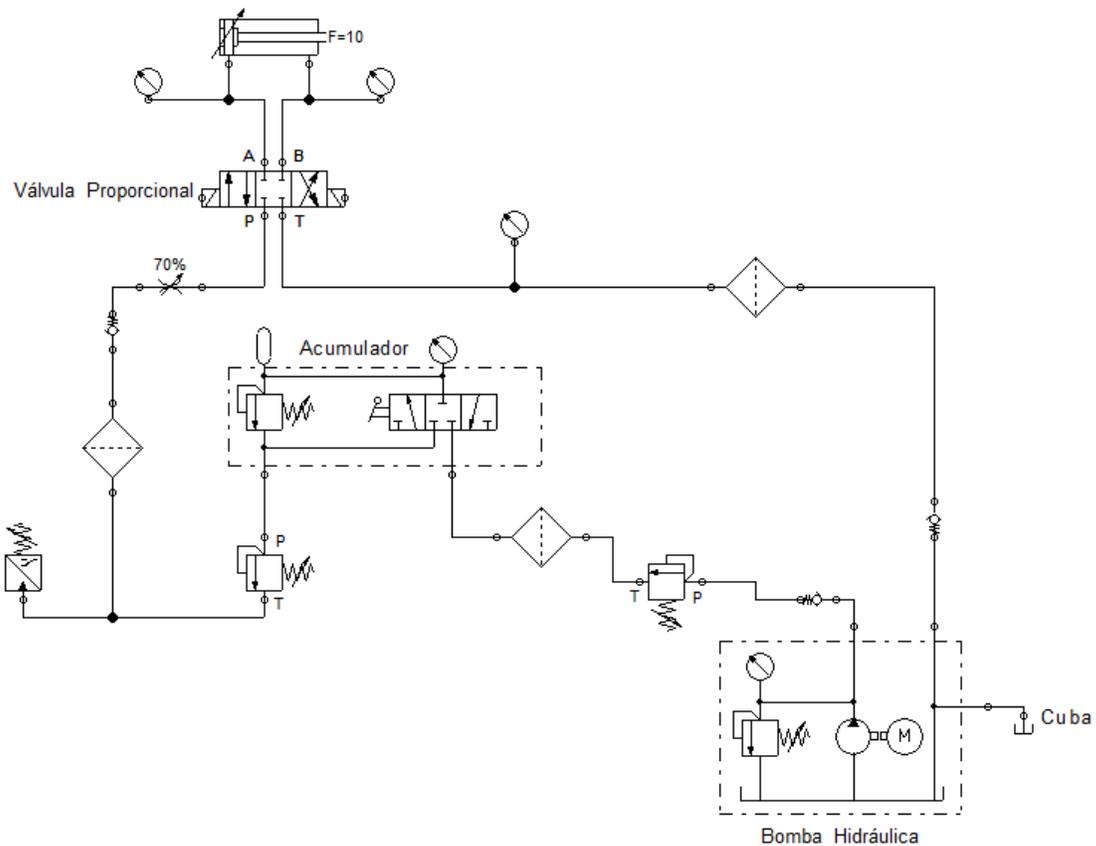


Figura 52. Propuesta del sistema de potencia hidráulica para el cilindro modelo (Fuente: Diseño en Festo Hidraulic).

3.3.1. Modificaciones del PLC

Para la automatización del sistema de control de velocidad, se requiere añadir un nuevo módulo al PLC. Este corresponde a un dispositivo de entradas y salidas analógicas, ya que el sensor de posición, así como el control de la válvula proporcional corresponden a señales analógicas.

El transductor de posición, consiste en un sensor que se comunica mediante una señal de 4-20mA, el cual varía linealmente respecto a su posición, mientras que la válvula proporcional, se comporta de manera que los 4mA (0V o -10V) equivalen a un cierre total de la válvula, y los 20mA (o 10V) a la apertura (Figura 54).

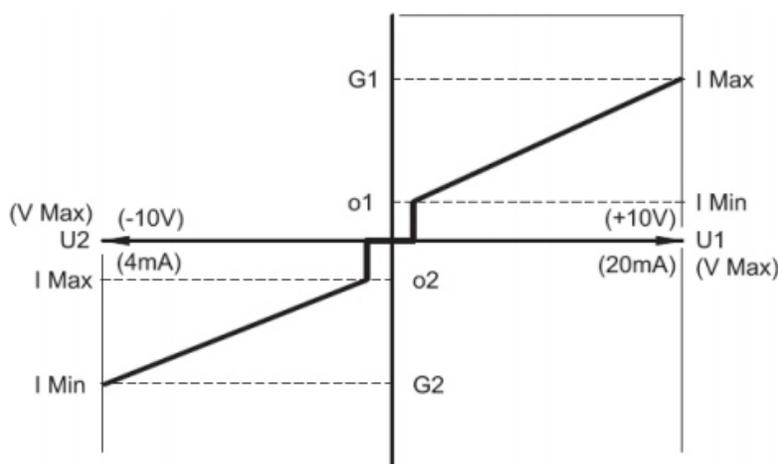


Figura 53. Comportamiento de la válvula según la señal de control (Fuente: Rodavigo S.A.).

Además, al integrar dicho módulo analógico, también se podrá vincular al PLC las señales analógicas de las sondas de temperatura, como también se programará el presostato modelo XML-F010D2026 de manera que envíe una señal analógica para monitorear el valor de la presión, ya que actualmente este dispositivo está configurado únicamente para emitir una alarma al momento de salir del rango de 48,2633 kPa a 151,685 kPa.

El modelo propuesto es el TWDAMM6HT (Figura 54), el cual se compone de 4 entradas y 2 salidas analógicas de 0-10V, o de 4-20mA, con una resolución de 12 bits.



Figura 54. Módulo de entradas y salidas analógicas modelo TWDAMM6HT (Fuente: Schneider Electric).

3.4. Diseño del regulador teórico para el control automático de tensión.

Partiendo del modelo teórico de la relación entre la tensión del circuito de excitación respecto a la tensión generada (Ecuación (2.46)), se requiere de la obtención de cada uno de los parámetros para obtener la función de transferencia del sistema.

Donde la resistencia se calcula mediante el análisis del circuito de excitación en estado de operación nominal, sabiendo que:

- Tensión nominal: 20 V DC.
- Corriente nominal: 7 A.

De manera que para un circuito RL, la corriente se representa con la siguiente ecuación (Rashid, 2004):

$$i(t) = \frac{V}{R}(1 - e^{-\beta t}) + I_0 * e^{-\beta t} \quad (3.4)$$

Evaluando la ecuación (3.4) cuando t tiende a infinito:

$$i(t \rightarrow \infty) = \frac{V}{R} \quad (3.5)$$

Despejando de la ecuación (3.5) el parámetro de resistencia:

$$R = \frac{20}{7} = 2.85 \Omega$$

Además, se debe calcular la constante K_a mediante la ecuación (2.42) y utilizando los parámetros de la placa del generador (Tabla 2), obteniendo como resultado:

$$230 = K_a * 20.6$$

$$K_a = \frac{230}{20.6} = 11.165$$

La inductancia L_f , se obtiene del promedio de la medición de dos excitatrices (Tabla 16) de similar magnitud a la analizada por medio del dispositivo MCE MAX utilizado para realizar distintas pruebas eléctricas en generadores (Figura 55), dando como resultado la siguiente magnitud:

$$L_f = 586.5 \text{ mH}$$

Tabla 16. Valores de la inductancia promedio de dos excitatrices similares a la Rebeca de La Marina (Fuente: Mediciones mediante MCE MAX).

Excitatriz	Inductancia promedio
El Carmen I	687mH
El Carmen II	486mH
Promedio	586.5mH



Figura 55. Dispositivo MCE MAX utilizado para diversas pruebas eléctricas en generadores (Fuente: MCE MAX).

Finalmente, se tiene la función de transferencia mostrada a continuación:

$$\frac{E_a(s)}{V_f(s)} = \frac{\frac{11.165}{0.5865}}{\left(s + \frac{2.85}{0.5865}\right)} \quad (3.6)$$

Simplificando la ecuación (3.6):

$$\frac{E_a(s)}{V_f(s)} = \frac{19.05}{(s + 4.863)} \quad (3.7)$$

Seguidamente, se analiza la respuesta del sistema ante un escalón, para verificar que los parámetros de sobreimpulso, tiempo de estabilización y error en estado estable sean los siguientes:

$$\text{Sobreimpulso} < 5\%$$

$$\text{Tiempo de estabilización (2\%)} < 0.2 \text{ s}$$

$$\text{Error en estado estable} = 0$$

Mediante el programa Matlab, se obtiene la respuesta al escalón de la función de transferencia mostrada en la ecuación (3.7) con un comportamiento de sobreimpulso correspondiente a 0% y un tiempo de estabilización de 0.164 s, sin embargo el valor final

del sistema es de 0.797 (Figura 56) por lo que se procede a diseñar un regulador de atraso que corrija dicho error (Anexo 6.1.).

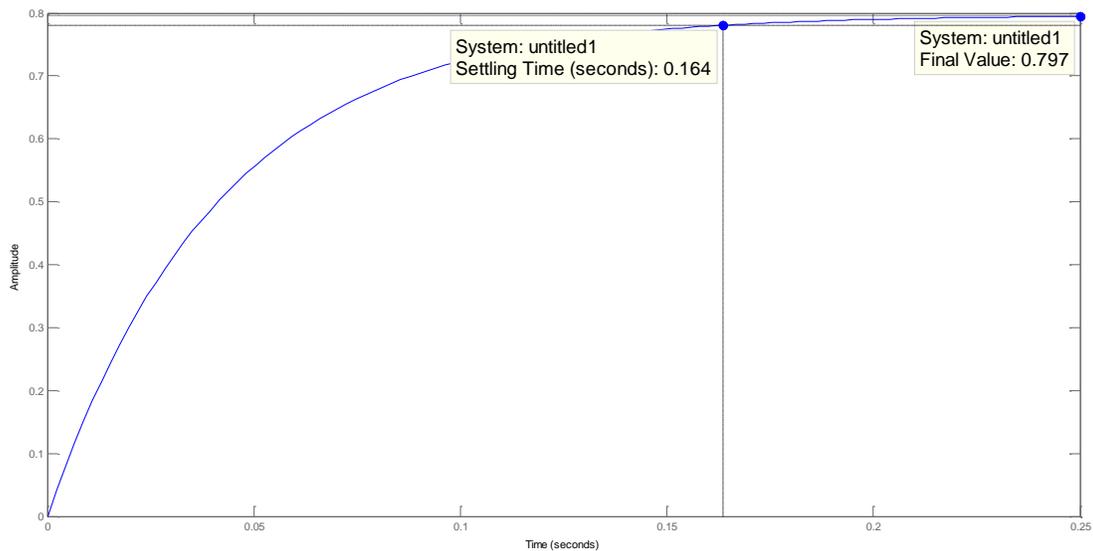


Figura 56. Respuesta al escalón de la función de transferencia de la tensión en el inductor, respecto a la tensión en el inducido, sin regulador (Fuente: Diseño propio en Matlab).

Ahora es necesario corregir el tiempo de estabilización, ya que al añadir el controlador de atraso, este parámetro aumenta a 0.226 s y se alcanza el error en estado estable de cero a los 0.7s (Figura 57). Debido a que el tiempo de estabilización no cumple con las características de la respuesta deseada, se procede a diseñar un regulador de adelanto (Anexo 6.2.).

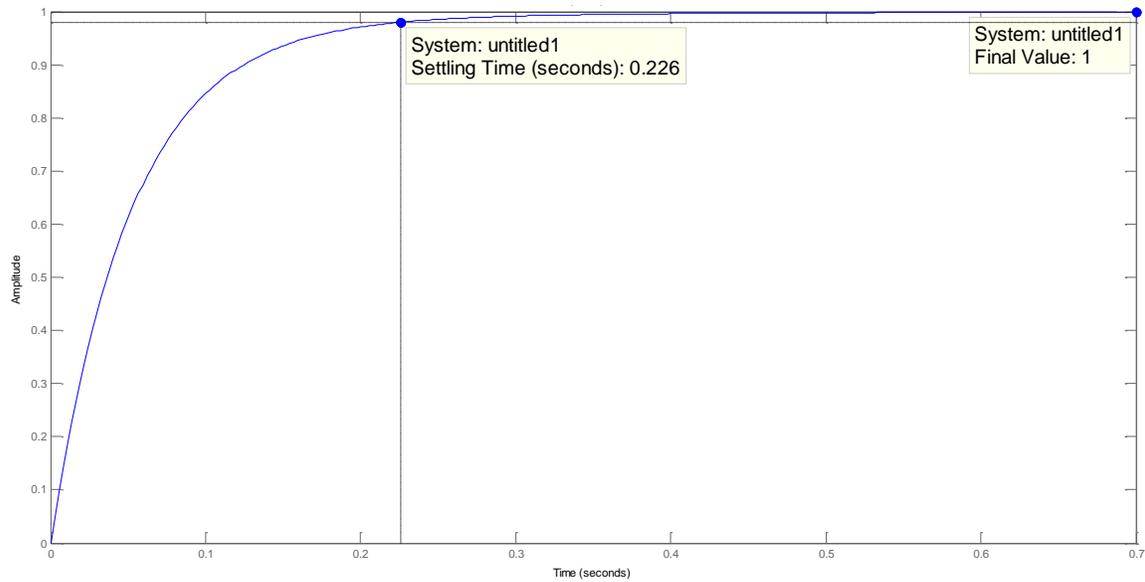


Figura 57. Respuesta al escalón de la función de transferencia de la tensión en el inductor, respecto a la tensión en el inducido, con regulador de atraso (Fuente: Diseño propio en Matlab).

El regulador de adelanto va a disminuir el tiempo de estabilización a medida que aumenta el sobreimpulso. Para esto se selecciona un polo dominante que se encargue de cumplir con las características de diseño de un sobre impulso menor al 5% y un tiempo de estabilización no mayor a 0.2 segundos.

Finalmente, con la aplicación del controlador de atraso y de adelanto (PID), se obtiene una respuesta del sistema ante un escalón (Figura 58) que posee un sobre impulso de 0%, un tiempo de estabilización de 0.196 y un error en estado estable igual a cero alcanzado a los 0.6 s.

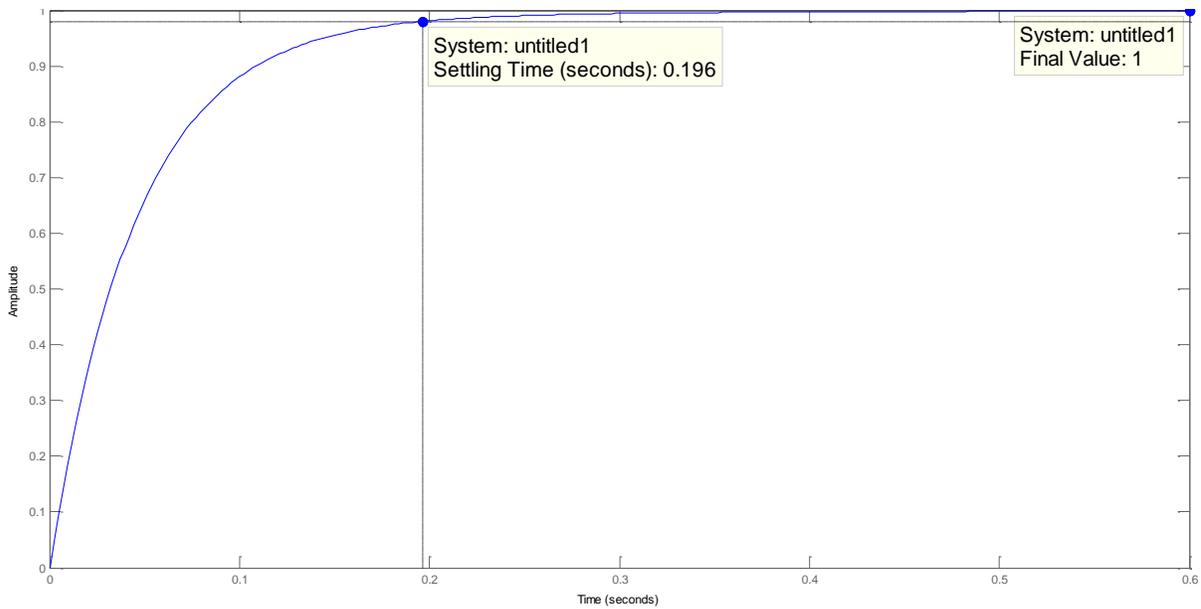


Figura 58. Respuesta al escalón de la función de transferencia de la tensión en el inductor, respecto a la tensión en el inducido, con regulador de atraso y adelanto (Fuente: Diseño propio en Matlab).

3.5. Automatización del sistema de control de tensión.

El sistema que se propone para la automatización de la regulación de la corriente de la excitatriz, relacionada con el control automático de tensión del generador síncrono con excitatriz independiente consiste en un AVR (Automatic Voltage Regulator), el cual es un módulo electrónico capaz de monitorear la tensión del generador y controlar la corriente de excitación del mismo (Figura 59).

Las razones por las cuales se selecciona este dispositivo para el proceso de modernización de la micro central hidroeléctrica en lugar de un sistema motorizado que controle el reóstato actual son las siguientes:

- Reducción en el mantenimiento.
- Mayor precisión por parte de un control automático en relación a un sistema mecánico que puede sufrir desajustes en los engranes o cadenas.
- Fácil ajuste en la consigna deseada.

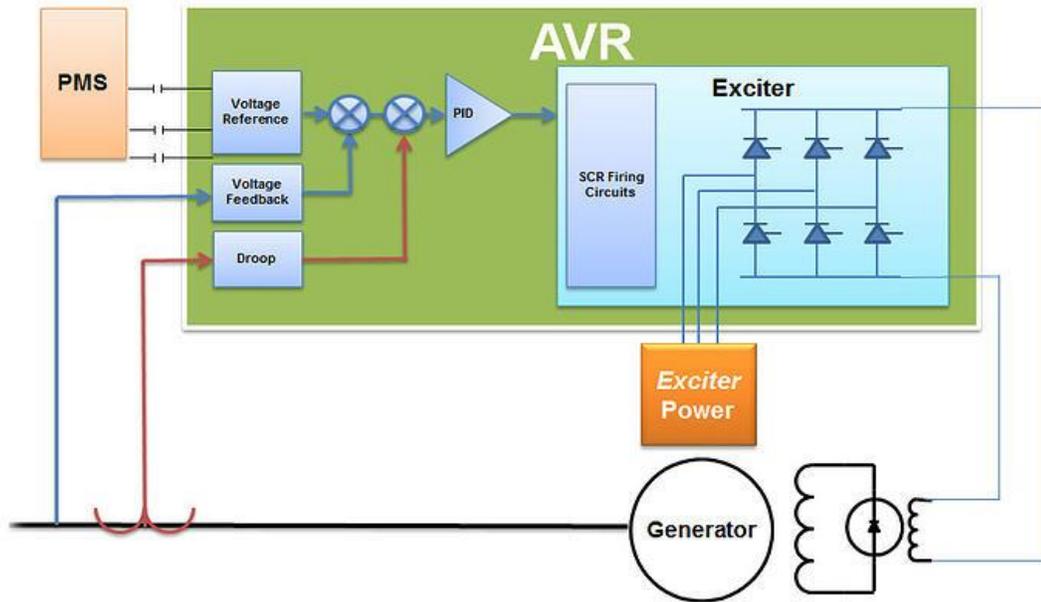


Figura 59. Regulador automático de tensión (Fuente: Governor Control Systems, Inc.).

El AVR que se propone, debe cumplir con los siguientes parámetros de excitación del generador:

- Voltaje de campo promedio: 20V DC
- Corriente de campo promedio: 7A
- Tensión nominal: 240V AC
- Frecuencia nominal: 60Hz

Con respecto a las características anteriores, se selecciona el modelo SX460, de SainSmart, el cual cumple con los requerimientos, y además, es un controlador que posee de forma embebida el establecimiento mediante potenciómetros, los parámetros de consigna de la tensión generada y el porcentaje de amortiguamiento. Existen modelos más complejos que requieren del ingreso de las constantes de un controlador PID ajustado específicamente para el generador a controlar, sin embargo, son utilizados en sistemas en donde se requiere modificar en determinados momentos la potencia para optimizar el rendimiento de la central respecto al consumo del embalse; sin embargo, en nuestro caso, el sistema opera a una potencia específica y máxima de 35kW, por lo que se descarta el uso de este tipo de sistemas.



Figura 60. Regulador automático de tensión modelo SX460 (Fuente: SainSmart).

El generador actual corresponde a un generador autoexcitado, lo que implica que no se necesite de una fuente externa para provocar la inducción. Este proceso se le conoce como cebado, y es la utilización de un pequeño flujo de remanencia para producir una baja tensión inducida que va aumentando hasta que se alcanza un valor nominal (Instituto Nacional de Aprendizaje, 1997). El diagrama esquemático del circuito de la excitatriz del generador se presenta en la Figura 61.

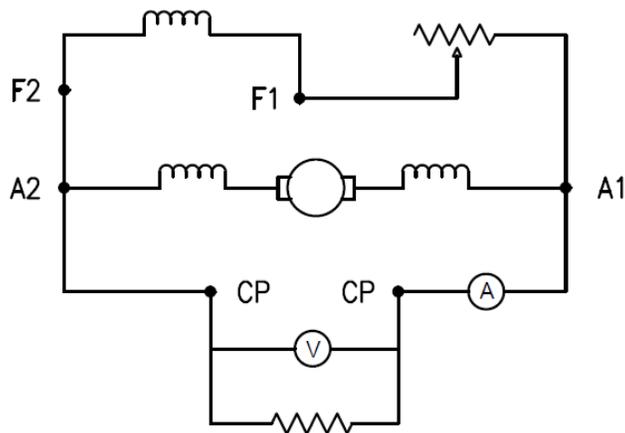


Figura 61. Diagrama del circuito de excitatriz del generador (Fuente: Diseño propio AutoCAD Electrical).

El diseño del nuevo sistema de regulación de tensión, requiere de una fuente externa, por lo que se propone la modificación del sistema de excitación, pasando de un sistema autoexcitado, a uno con excitación independiente.

El proceso consta de la desconexión del reóstato, realizando el conexionado de las terminales F2 y F1 del inductor a las salidas de control de corriente del AVR propuesto en la sección anterior.

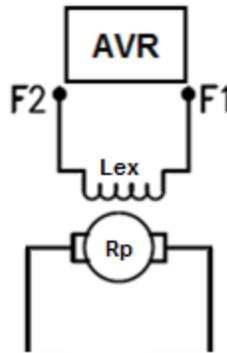


Figura 62. Generador con excitación independiente controlada mediante el AVR (Fuente: Diseño propio en Paint).

Finalmente, el conexionado del módulo de regulación de tensión automático (AVR) debe seguir la siguiente metodología:

1. Entradas 7 y 8 a las fases T y S respectivamente.
2. Salidas F1 y F2 hacia el inductor.
3. Puente entre 1 y 2.
4. Puente entre C y 60.

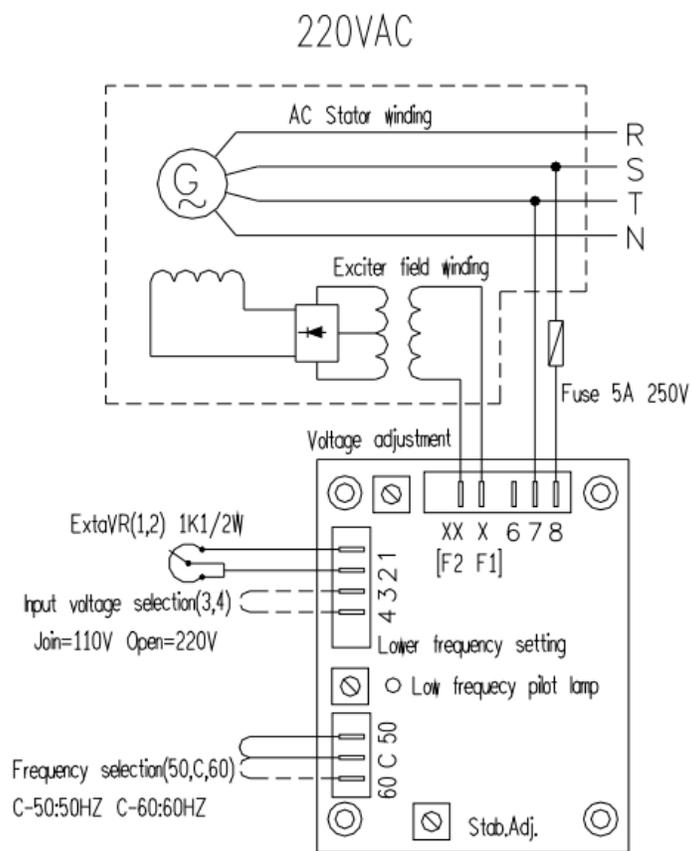


Figura 63. Diagrama de conexión del AVR SX460 autoexcitado (Fuente: SainSmart).

Finalmente, la metodología para el ajuste de variables de la tensión consigna y el amortiguamiento de la respuesta de control se muestra a continuación:

Tensión consigna:

1. Conectar un multímetro en modo de tensión alterna a la salida de la fase A-B.
2. Modificar el potenciómetro de tensión consigna hasta alcanzar el valor deseado.
3. Verificar la tensión de las fases A-C y B-C.

Amortiguamiento:

1. Conectar un multímetro en modo de tensión alterna a la salida de la fase A-B.
2. Modificar el potenciómetro de amortiguamiento hasta alcanzar un valor de tensión constante, sin oscilaciones.
3. Verificar la tensión de las fases A-C y B-C.

3.6. Automatización del sistema de acople automático a la red

Para el sistema de acople automático a la red, se selecciona un sincronoscopio y relé de autorización de acoplamiento. Ambos dispositivos se encuentran integrados en un solo módulo con el fin de ejecutar el acoplamiento entre el grupo de generación y la red eléctrica externa al cumplir durante determinado lapso de tiempo las siguientes condiciones:

- Diferencia de tensiones de los sistemas dentro del rango deseado.
- Diferencia de frecuencia de los sistemas dentro del rango deseado.

Además, se debe seleccionar un dispositivo que posea las siguientes características:

- Tensión de alimentación: 0-24V DC ó 0-240 V AC
- Tensión de operación: 240 V AC.
- Frecuencia de operación: 60 Hz.
- Protección: Mayor o igual a IP64.
- Activación de comprobación de sincronismo mediante entrada 0-24V DC ó 0-240V AC.

Finalmente se selecciona el sincronoscopio digital DKG-117 (Figura 64), el cual cumple con las características descritas anteriormente.

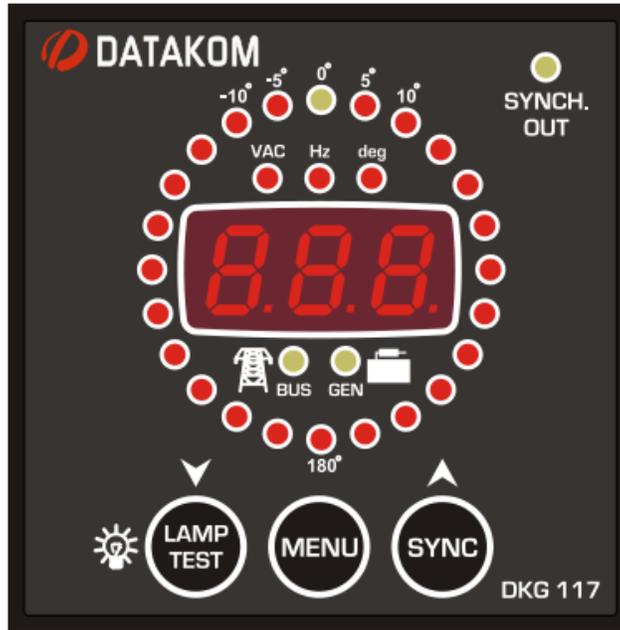


Figura 64. Sincronoscopio digital modelo DKG-117 (Fuente: DATAKOM).

La metodología para el conexionado de este dispositivo es la siguiente:

1. Entrada 13 y 11 a las líneas R y N respectivamente.
2. Entrada 10 y 8 a las líneas N y U respectivamente.
3. Entrada 5 a tierra.
4. Entrada 7 interruptor de sincronoscopio habilitado.
5. Entrada 4 interruptor de fases muertas.
6. Entrada 6 y 1 al positivo de la batería.
7. Entrada 2 a la bobina que controla la bobina del relé de acople.

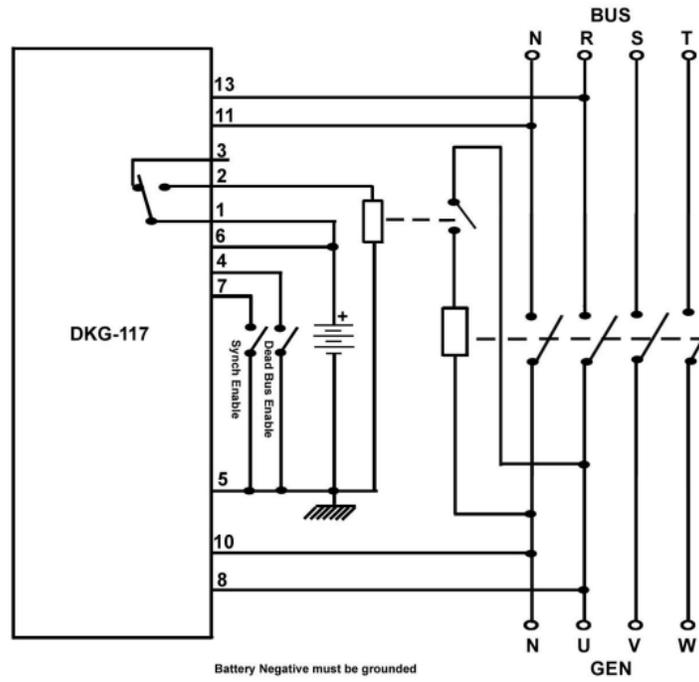


Figura 65. Conexión del sincroscoPIO automático DKG-117 (Fuente: DATAKOM).

4. Análisis de resultados

El sistema de detención automática de la micro central fue implementado, para ello se instaló el panel de control encargado de intervenir en la actuación de los motores de las válvulas, el monitoreo de presión, velocidad y las fallas emitidas por el panel de potencia. Se utilizaron los mismos dispositivos propuestos en la metodología, y las conexiones responden al diseño mostrado en los planos del apéndice (A.1.). La distribución de los equipos y la instalación final se muestra en la Figura 66.



Figura 66. Distribución final de los equipos en el panel (Fuente: Fotografía en la micro central).

Además, se implementó el rediseño propuesto para la automatización de la válvula principal, integrando los sensores límite ZCT21G11 necesarios para determinar el estado de la misma (Figura 67).



Figura 67. Automatización de la válvula principal (Fuente: Fotografía en la micro central).

También, se instaló el presostato modelo XML-F010D2026 en la bomba de aceite hidráulico del cojinete de tope que genera una alarma en caso de que la presión se encuentra fuera de 48,2633 kPa y 151,685 kPa., y se mantiene el manómetro anterior con el objetivo de tener redundancia en las mediciones (Figura 68), además, se integró el sensor inductivo E2A-M12KS04-M1-B1 encargado del monitoreo de velocidad cerca del volante de inercia del eje de la turbina (Figura 69).



Figura 68. Conexión del sistema de monitoreo de presión en la bomba hidráulica (Fuente: Fotografía en la micro central).



Figura 69. Instalación de sensor inductivo (Fuente: Fotografía en la micro central).

Al ocurrir una de las fallas (Tabla 10), el sistema de control genera adecuadamente la detención automática de la planta cuando ésta se encuentra en modo automático, tanto cuando está sincronizada o al estar desacoplada. El sistema cierra la válvula de caudal de entrada en un tiempo de 1 m:28 s; y además, con un retardo de 7 s después de generada la falla, se bloquea el flujo de aceite del gobernador, bloqueando la posición de los álabes del distribuidor, esto con el fin de que una vez se encuentren cerrados, no se puedan abrir en caso de una fuga en la válvula principal. La detención, al ser en un lapso tan corto, hace que

el sistema de respaldo no sea necesario mantenerlo durante 30 minutos de manera continua como fue diseñado, sin embargo, queda previsto para una posible ampliación de nuevos sensores, actuadores y módulos del controlador.

Además, es importante resaltar que a pesar de que el sistema de control actúa inmediatamente cerrando el paso de caudal de entrada a la turbina, el sistema cuando se encuentra sincronizado y se desconecta, provoca que la velocidad en la turbina aumente, pasando de 1197 rpm a 1540 rpm. También, una vez que la válvula principal se cierra por completo, la turbina se encuentra en 1300 rpm, y se detiene por completo hasta después de 3 minutos.

La descarga de la batería es baja tal como se calcula en la sección de metodología, de manera que el cargador es capaz de completar la carga en 4 minutos, con una corriente de 5A; y pasando a 3A, 2.5A, 1.5A y 0.7A de forma escalonada cuando la batería se acerca a su carga nominal, y en el momento en que se encuentra totalmente cargada, el cargador se desconecta de forma automática.

Cabe mencionar que al desconectar el sistema de la red eléctrica, simulando un caso de que ocurra un apagón, el panel de control es capaz de detener la planta accionando los actuadores de cierre de válvula y bloqueo del distribuidor debido a la UPS y a la batería que supe de energía a todo el sistema.

En cuanto a el diseño que se implementó para el módulo de envío de fallas, corresponde al modelo en que utiliza una salida digital del PLC con un temporizador para codificar mediante tiempos el tipo de evento que se genera, seguido de un relé encargado de aislar la señal de 24V DC con la de 5V DC para luego ser decodificación por el Arduino YÚN quien se encarga a su vez de emitir el informe mediante una conexión Ethernet. Se opta por este diseño, y no el del uso de un PWM para codificar los eventos debido a que los proveedores no contaban con dispositivos tales como relés de estado sólido u optoacopladores para aislar la señal de alta frecuencia.

El módulo de envío de fallas corresponde a una herramienta sumamente útil para el control de tiempos de operación de la micro central, además es muy importante en cuanto al historial de fallas incorporado en la página web, ya que se puede verificar el tipo de falla que ocurre de manera habitual, con lo que se podría evidenciar la necesidad de sustitución de cojinetes, inestabilidad por parte de la red, o inestabilidad del control de velocidad por

parte del gobernador mecánico actual. Además, es de suma importancia ya que al ser una micro central donde el método de puesta en marcha y sincronización es totalmente manual, es necesario saber en qué momento se detuvo la planta para volver a ingresar a operación. En cuanto al sistema de regulación automático de velocidad, útil para regular la frecuencia de la energía generada, se obtuvo la función de transferencia que relaciona la apertura del distribuidor con respecto a la velocidad de la turbina. En este modelo, se observa que existen dos variables críticas que caracterizan el modelo; el primero corresponde al tiempo de aceleración de la cabeza de agua y el segundo a la inercia rotacional del sistema (Figura 70). A medida que el tiempo de respuesta de la cabeza del agua aumenta, se refleja un aumento en el tiempo de respuesta del sistema; este efecto se debe a que el agua tarda más en acelerarse a lo largo de la tubería de presión y esto ocasiona que se requiera de mayor tiempo para vencer las inercias del sistema. El sobreimpulso que se observa, también se relaciona con esta variable, ya que el agua tarda más en aumentar o disminuir su impulso, lo que ocasiona que al cerrar o abrir el distribuidor, se de una oscilación en la velocidad angular de la turbina.

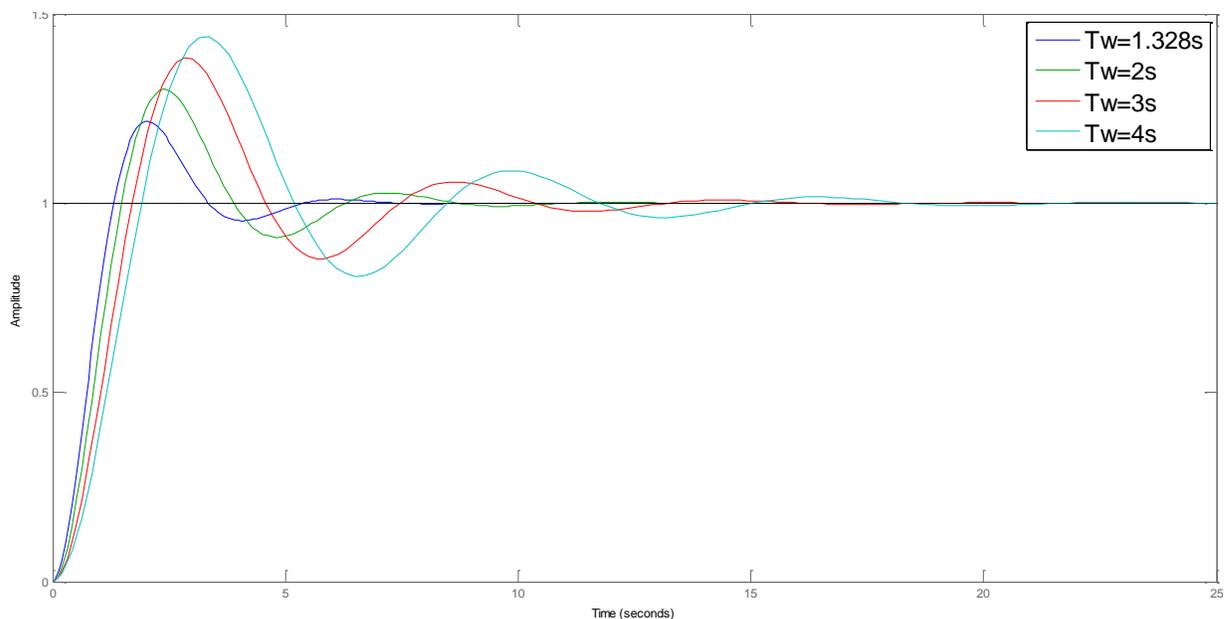


Figura 70. Respuesta al escalón del sistema de regulación de velocidad sin controlador, relacionadas con el aumento del tiempo de respuesta de la cabeza del agua (Fuente: Diseño propio en Matlab).

Otro aspecto relevante es la inercia rotacional del sistema, la cual al aumentar, el tiempo de estabilización se incrementa al mismo tiempo que el sobre impulso disminuye; esto debido a que para alcanzar la consigna de velocidad, el impulso del agua debe vencer una mayor inercia por lo que tarda más en lograr la velocidad nominal de operación (Figura 71).

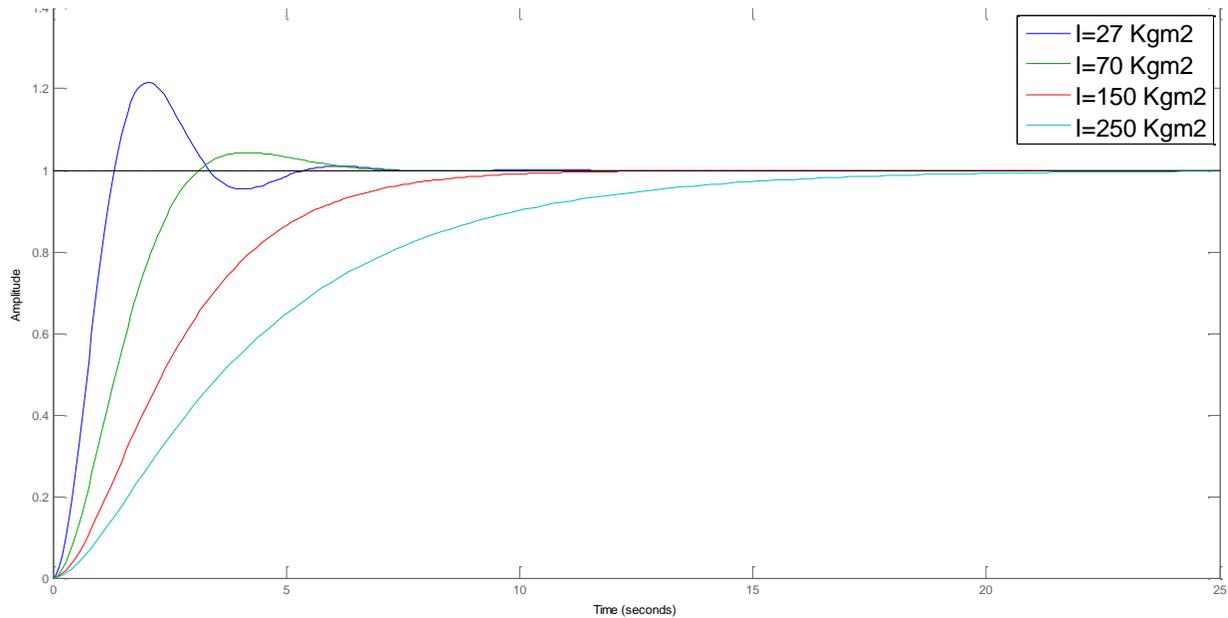


Figura 71. Respuesta al escalón del sistema de regulación de velocidad sin controlador, relacionadas con el aumento en la inercia rotacional del sistema (Fuente: Diseño propio en Matlab).

Por otra parte, con el diseño del regulador de adelanto capaz de controlar el comportamiento del sistema de regulación de velocidad (Figura 45), se logró obtener una respuesta con sobreimpulso de 1.97%, lo cual hace que los componentes mecánicos del sistema, tales como los cojinetes de tope y de soporte estén menos esforzados ante la regulación automática de velocidad y de igual manera, el sistema al tener baja oscilación, es capaz de alcanzar su velocidad de operación con un efecto de vibraciones mínimo. A su vez, se logró disminuir el tiempo de estabilización, pasando de 4.88s a 1.25s. Finalmente, no se requirió de un compensador para corregir el error en estado estacionario, ya que la respuesta inicial, sin regulador, no poseía un error (Figura 44).

Cabe mencionar que el regulador de velocidad deja de ser útil al acoplar la planta a la red, esto se debe a que una vez realizada la sincronización, la apertura del distribuidor de la turbina controla la potencia activa de la energía generada, por lo que el regulador de

velocidad pasa a segundo plano y se ejecuta la apertura total del distribuidor para asegurar la generación a máxima potencia. Lo anterior no responde directamente a la curva de eficiencia de la turbina francis (Figura 11), la cual muestra que el punto de mayor potencia no coincide con la máxima apertura del distribuidor, sin embargo, al ser una turbina de baja potencia, es posible realizar dicha afirmación.

Por otra parte, para implementar el regulador de velocidad se requiere de aumentar la resolución con que el PLC es capaz de monitorear la velocidad de la turbina, ya que actualmente corresponde a 1Hz, lo cual no es útil para una aplicación de control de velocidad automático ya que habría una banda muerta de 60 rpm. Para mejorar esta resolución, es necesario aumentar el número de muescas que el sensor detecta por cada revolución, de manera que para obtener una resolución de 2 rpm, es necesario utilizar 30 muescas, esto se justifica a partir del siguiente factor de conversión:

$$Revolución = \frac{60}{\#muescas} \quad (4.1)$$

Donde:

60 = Factor de conversión entre Hz a rpm.

El sensor de posición que se propone para la implementación del regulador de velocidad, corresponde a una realimentación del PLC que solo es útil para determinar el punto de saturación de la apertura del distribuidor y para efectos de monitoreo de la apertura del distribuidor al momento de ejecutar el proceso de entrega a máxima potencia.

En cuanto a la automatización del sistema de regulación de tensión, no se requiere automatizar el sistema anterior compuesto por un reóstato que ajusta la corriente de excitación para así controlar la tensión generada mediante un motor con realimentación de posición, ya que actualmente existen tarjetas integradas diseñadas para dichas aplicaciones de control automático de tensión, lo cual brinda una mayor fiabilidad al sistema reduciendo condiciones de desajuste que perturbe el controlador diseñado. La modificación necesaria se basa en pasar de un generador autoexcitado, a uno de excitación independiente, realizando únicamente un re-conexionado de algunas de las terminales del generador, y la conexión de otras terminales a la tarjeta electrónica de control.

Estas tarjetas de control electrónicas pueden ser de dos tipos; las más sencillas que poseen un ajuste de las variables de valor de consigna y amortiguamiento mediante potenciómetros; o aquellas que requieren del diseño de un PID para ser programadas, como es el caso de los AVR de Basler Electric modelos DECS-150 (Basler Electric, 2015); donde lo recomendado es que para sistemas donde se requiera variar la potencia para optimizar la generación eléctrica, se utilice un dispositivo con PID programable, mientras que para micro-centrales, el uso de tarjetas con ajuste de parámetros mediante potenciómetros es más común.

A pesar de que se seleccionó una tarjeta electrónica para el control de tensión modelo SX460, la cual no requiere el ingreso de los parámetros del PID, se analizó el comportamiento del generador con respecto a la excitación independiente, en donde se observa que el sistema sin regulador, posee un error en estado estable del 20.3% (Figura 56), por lo que se diseña un compensador de atraso para obtener una respuesta con error en estado estable igual a cero (Figura 57). La respuesta de dicho controlador posee un tiempo de estabilización de 0.226s, sin embargo, debe ser menor a 0.2s para alcanzar de una forma más rápida la consigna de tensión generada, por lo que se procede a diseñar un compensador de adelanto hasta obtener una respuesta con un tiempo de estabilización 0.196s y sin sobreimpulso (Figura 58).

En relación al acople de forma automático entre la planta y la red externa, se propone el uso de un sincronizador modelo DKG-117, el cual, corresponde a un relé encargado de acoplar la planta al momento en que las variables de frecuencia y tensión de la red externa y el generador son iguales, con el objetivo de disminuir el tiempo que toma realizar dicho acople por medio de un operador, el cual debe visualizar las variables mostradas en un panel digital y otro analógico, para luego presionar el botón de cierre del contactor principal.

A continuación, se ejecuta el análisis económico para determinar la factibilidad del sistema automático de detención de la central hidroeléctrica, tomando como referencia el evento ocurrido en el 2015, el cual corresponde a una falla provocada por un aumento en la velocidad de la turbina hasta incrementar excesivamente la presión hidráulica del sistema de refrigeración del cojinete de tope, generando una desconexión de una de las mangueras provocando el daño de dicho cojinete.

Previo al estudio financiera es importante tomar en consideración los siguientes puntos:

- Anterior a la implementación del sistema automático de detención, el módulo encargado de limitar la velocidad a 1200 rpm y evitar una falla mayor correspondía al gobernador mecánico, sin embargo al dañarse, se requiere sustituir por completo el sistema.
- El riesgo de fallas en relación a la probabilidad de ocurrencia corresponde a un promedio mensual de dos veces, dato brindado por el historial generado mediante el módulo de informes de eventos.
- El sistema de detención automático requiere una inversión inicial total de ₡4.763.300,00 colones (Tabla 17), asumiendo un periodo de vida útil mínimo del sistema de 20 años, dato obtenido a partir de la hoja de datos de los dispositivos en relación a la cantidad de ciclos eléctricos.

Tabla 17. Detalle de inversión para la implementación del sistema de detención automático (Fuente: O&M Eléctrica Matamoros).

Detalle	Monto
Sistema de detención automático	₡4.507.150,00
Equipos de respaldo	₡256.150,00
Total	₡4.763.300,00

- El costo que se genera, al ocurrir una sola falla, corresponde a ₡6.695.025,00 colones (Tabla 18), en el cual se incluyen los costos directos en relación a la reparación de los componentes eléctricos y mecánicos dañados, así como los indirectos como la producción no entregada correspondiente a 13 días.

Tabla 18. Detalle de costos debido a la falla por sobre velocidad de la turbina (Fuente: Encargados de la central).

Detalle	Monto
Producción no entregada (10800kW/h)	¢655.000,00
Reparación de cojinete talleres industriales Artola	¢847.000,00
Mano de obra interna por limpieza de casa de máquinas e insumos para control de aceites	¢100.000,00
Mano de obra OyM desarme de cojinete. Medidas de cojinete. Montaje y puesta en operación de cojinete.	¢2.804.025,00
Limpieza generador afectado.	¢2.289.000,00
Total	¢6.695.025,00

Seguidamente, se analiza el impacto económico por fallas anuales en caso de no contar con un sistema de detención:

$$\text{Costo anual por fallas} = (\text{¢}6.695.025,00 * 2 \text{ eventos}) * 12 \text{ meses} \quad (4.2)$$

$$\text{Costo anual por fallas} = \text{¢}160.680.600,00 \quad (4.3)$$

En cuanto a la inversión, teniendo en cuenta un periodo de vida útil de 20 años se tiene que:

$$\text{Inversión anual} = \frac{\text{¢}4.763.300,00}{20 \text{ años}} \quad (4.4)$$

$$\text{Inversión anual} = \text{¢}238.165,00 \quad (4.5)$$

Por lo que se evidencia una alta factibilidad económica de la implementación del sistema de detención, debido a que los costos anuales por falla al no contar con un sistema de detención ascienden a los ¢160.680.600,00 colones, en relación a un costo anual por la implementación del sistema de detención que previene dichas fallas de tan solo ¢238.165,00 colones.

Finalmente, se analiza la relación de costos que se ahorra la empresa hidroeléctrica con respecto a los costos de inversión del proyecto de control automático de velocidad y tensión, útiles para acople a la red en un menor tiempo y de forma remota, evitando con esto la necesidad de contar con un operador con disponibilidad diaria, y a su vez, los tiempos en los que la máquina se encuentra fuera de línea se reducen (24 horas semanales por fallas nocturnas o fines de semana).

Tabla 19. Detalle de los costos mensuales por un acople y puesta en marcha de forma manual (Fuente: Diseño de ingeniería).

Detalle	Monto
Producción no entregada por desacoples (840kW/h)	¢50.944,44
Disponibilidad de operador no calificado	¢230.369,52
Total	¢ 281.313,96

Tabla 20. Detalle de la inversión para la implementación del sistema de acople y puesta en marcha automático (Fuente: Diseño de ingeniería).

Detalle	Monto
Sistema control automático de velocidad	¢3.618.121,73
Sistema de control automático de tensión	¢42.918,75
Sistema de sincronismo automático	¢168.179,40
Total	¢3829219,88

Seguidamente, se analizan los periodos de falla en caso de no contar con un sistema de detención, donde:

$$\text{Costo anual por sistema fuera de línea} = \text{¢ } 281.313,96 * 12 \text{ meses} \quad (4.6)$$

$$\text{Costo anual por sistema fuera de línea} = \text{¢}3.375.767,52 \quad (4.7)$$

En cuanto a la inversión, en relación a un periodo de vida útil de 20 años se tiene que:

$$Inversión\ anual = \frac{\text{¢}3829219,88}{20\ años} \quad (4.8)$$

$$Inversión\ anual = \text{¢}191.460,99 \quad (4.9)$$

Mostrando con ello un impacto económico positivo en relación a la implementación del sistema de arranque y acople a la red automático, debido a que los costos anuales por reducción en la eficiencia de arranque y acople a la red corresponden a ¢3.375.767,52 colones, en relación al costo anual por la implementación del sistema de detención equivalente a solo ¢191.460,99 colones.

5. Conclusiones

- Se implementó el control automático de detención que asegura el buen estado de los componentes eléctricos y mecánicos, al impedir que al generarse una falla, los dispositivos se fatiguen hasta el límite de vida útil estipulada.
- Se implementó un sistema electromecánico que permite el cierre de la válvula principal en un tiempo de un minuto y veintiocho segundos disminuyendo el tiempo en que la turbina se encuentra en modo de embalamiento.
- Se implementó un panel de control que permite la operación manual de la planta en caso de requerir mantenimiento o en el momento previo a la sincronización con el fin de poder manipular la apertura de la válvula tipo compuerta para controlar el caudal de entrada de la turbina.
- Se implementó un módulo electrónico que permite generar un informe de manera remota a los encargados de la central hidroeléctrica en caso de detención o acople de la planta con el objetivo de generar un reporte de los tiempos de operación de la planta y poder llevar un control del total de horas que los cojinetes han estado en operación y de esta manera pronosticar de manera exacta la sustitución o el mantenimiento de estos. Además, evidencia que al generarse una falla que provoque la desconexión de la máquina de la red, se desencadenan fallas secundarias debido al aumento en la velocidad de la turbina tales como el aumento de presión del sistema hidráulico y aumento en la temperatura de los cojinetes.

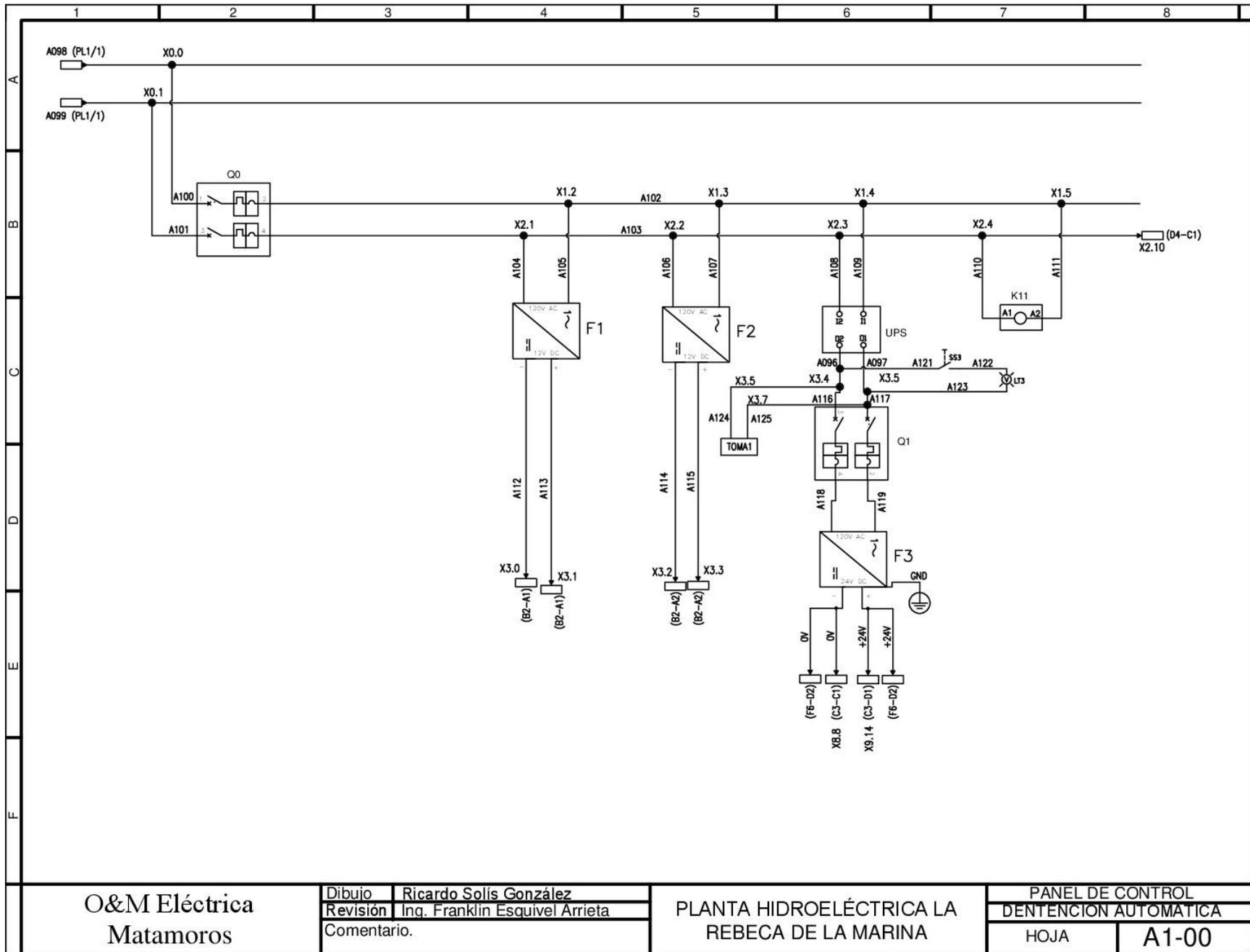
- Se diseñó la automatización del sistema encargado del control de posición de los álabes de la turbina mediante la sustitución del gobernador mecánico actual y la instalación de un cilindro hidráulico y un sensor de posición lineal controlados mediante un compensador de adelanto lo cual permite un control de velocidad sin oscilaciones que fatiguen de manera excesiva los componentes mecánicos de la planta, tales como el rodete, el eje de la turbina, los cojinetes de tope y soporte, así como las fajas que transmiten la potencia entre la turbina y el generador.
- Para el control automático de tensión se selecciona una tarjeta electrónica modelo SX460 la cual es capaz de controlar dicho parámetro mediante el ajuste por medio de potenciómetros el ajuste de la tensión consigna y el amortiguamiento, logrando una disminución en el tiempo de sincronización.
- Para la sincronización automática a la red se propone el uso de un sincronoscopio digital modelo DKG-117 asegurando un acople eficaz con respecto al momento exacto en que las variables de tensión y frecuencia de la red son iguales a las del generador.

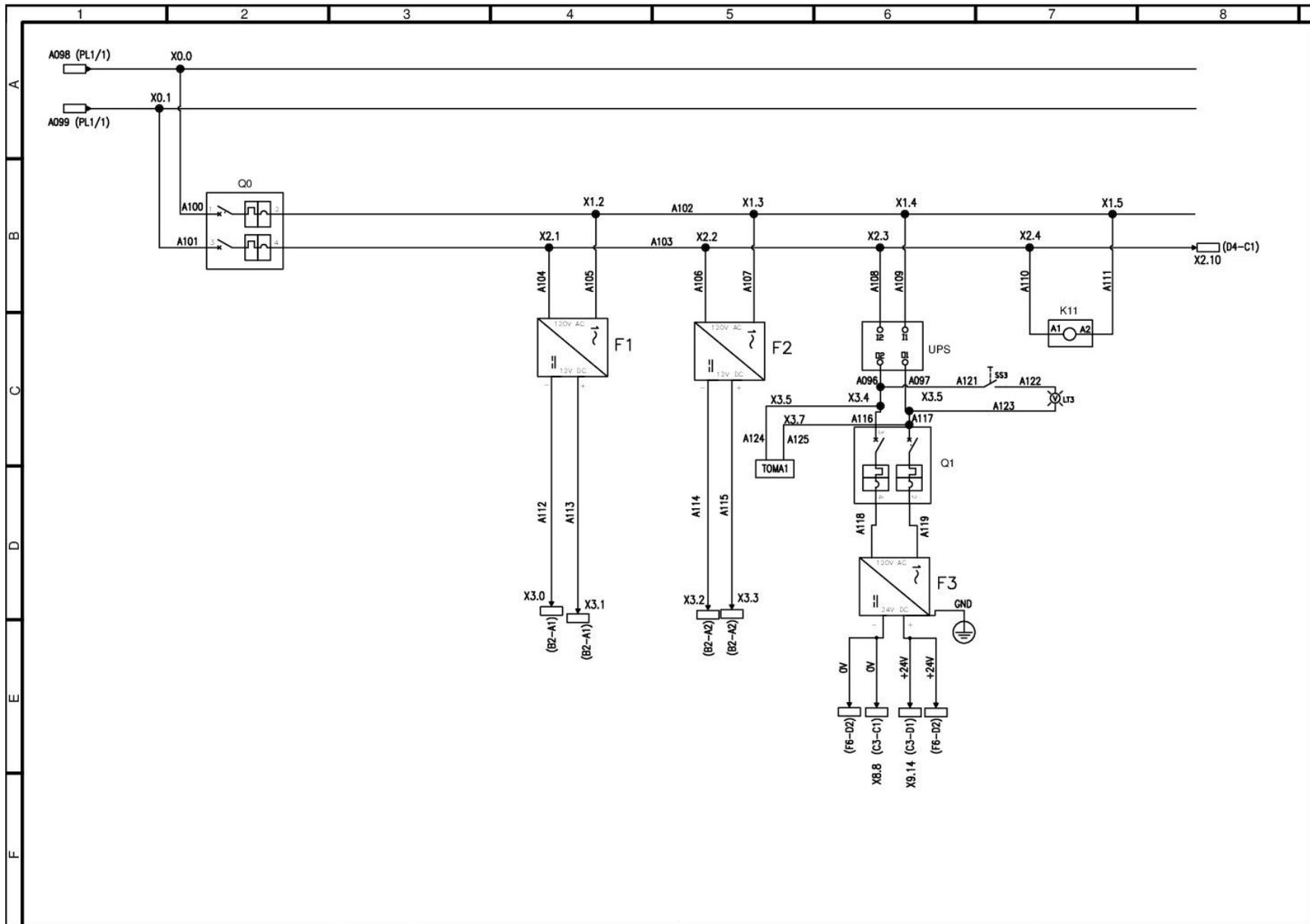
6. Recomendaciones

- Sustituir el motor encargado del bloqueo del aceite del gobernador por un actuador lineal para disminuir el impacto generado por el mismo motor.
- Instalar un sistema de bypass para permitir una apertura más rápida y menos esforzada con respecto al motor DC que actualmente se encarga de dicha función.
- Instalar CPU que permita funcionar como servidor al PLC y así no utilizar el módulo externo de envío de informes, con lo que permitiría una comunicación bidireccional con alta seguridad.
- Instalar un gabinete con un grado de protección IP67 para almacenar la batería, la fuente de 12V DC y la UPS.
- Diseñar un plan de mantenimiento para el sistema automatizado del control de la válvula principal.
- Aumentar a 30 la cantidad de muescas a detectar por parte del sensor inductivo para asegurar una resolución de 2 rpm.
- Medir mediante el dispositivo MCE MAX, el inductor y la resistencia de la excitatriz del generador en cuestión para el modelado exacto del circuito de excitación.

A. Apéndices

A.1. Planos del sistema de detención automático



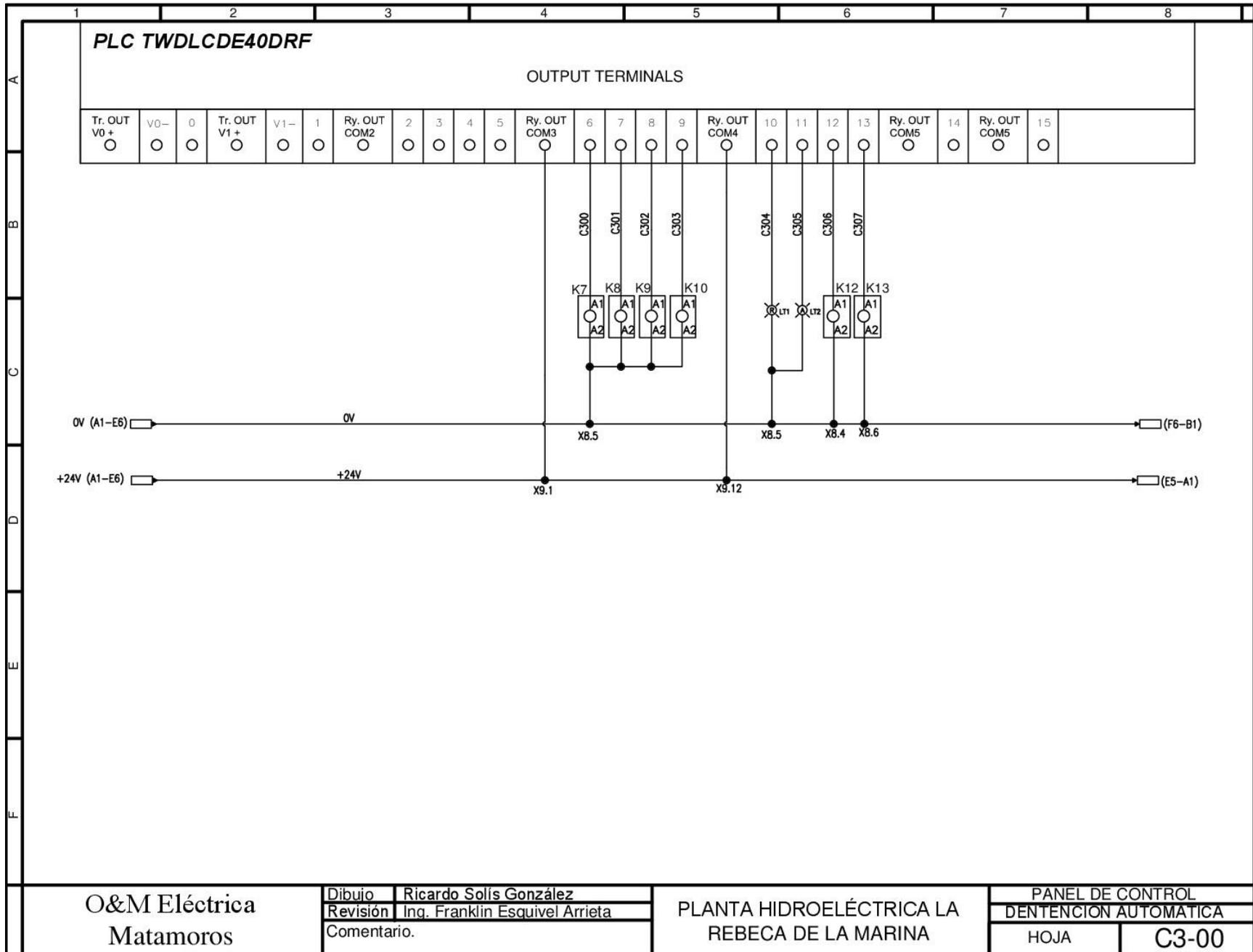


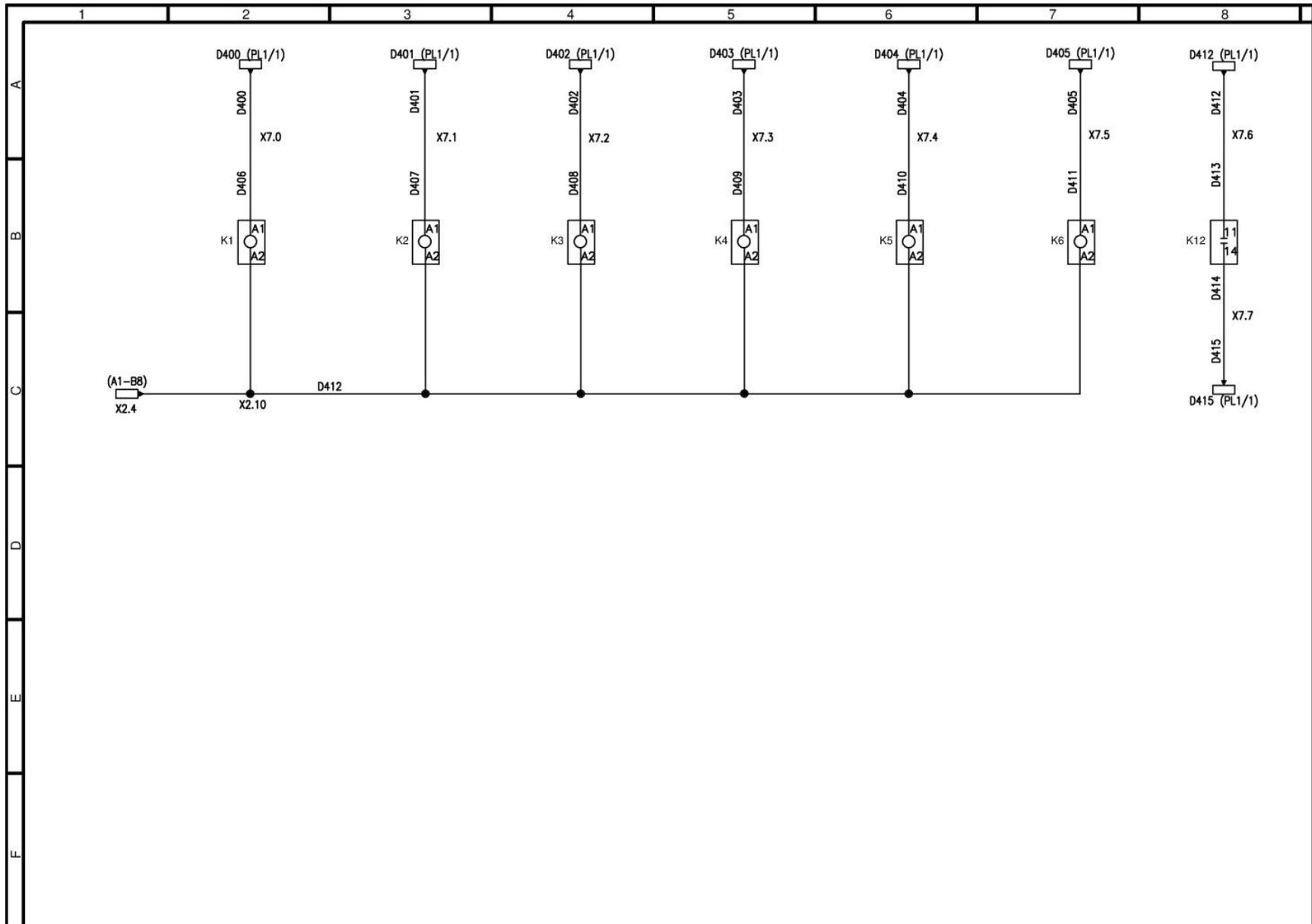
O&M Eléctrica
Matamoros

Dibujo Ricardo Solís González
Revisión Ing. Franklin Esquivel Arrieta
Comentario.

PLANTA HIDROELÉCTRICA LA
REBECA DE LA MARINA

PANEL DE CONTROL	
DENTENCION AUTOMATICA	
HOJA	A1-00



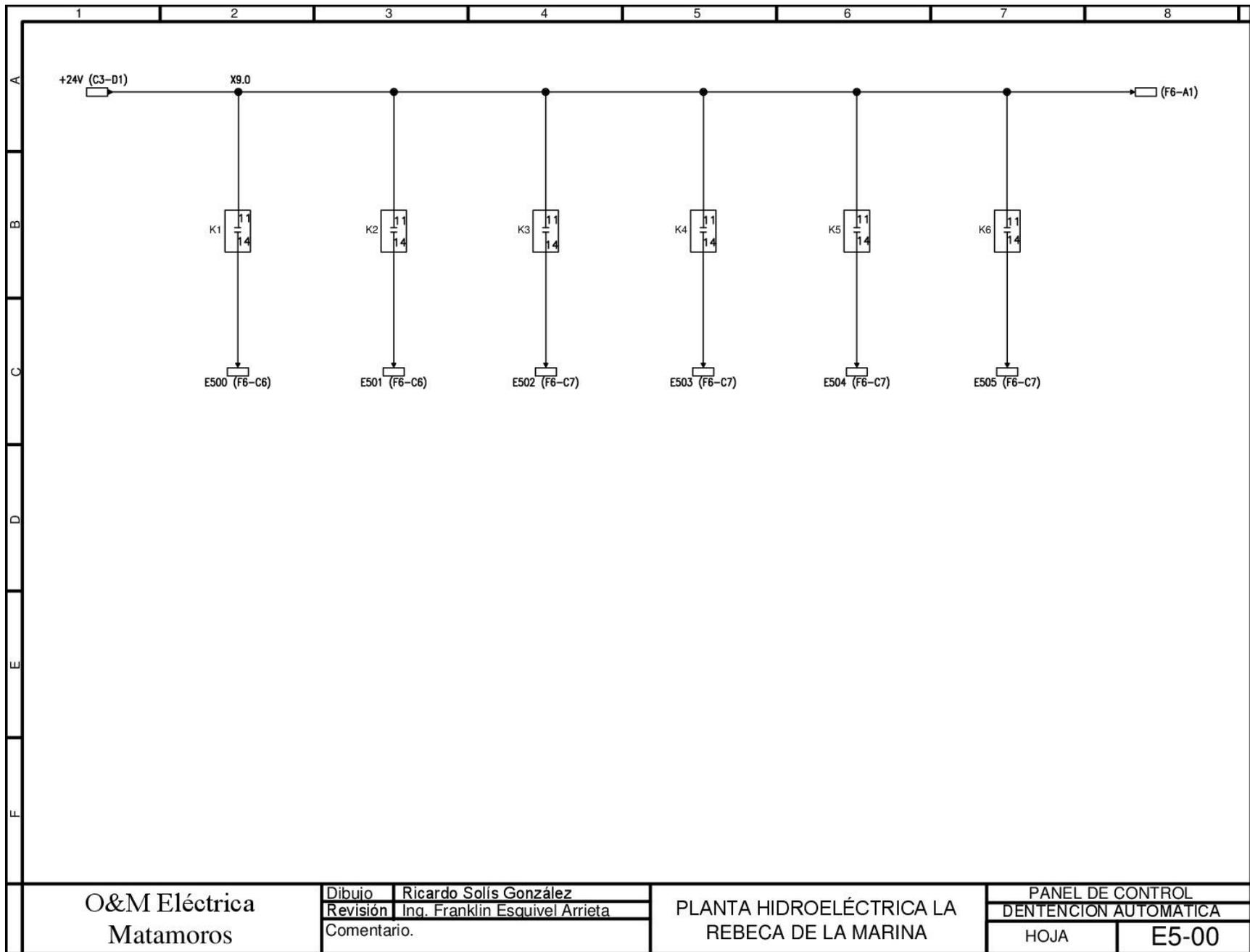


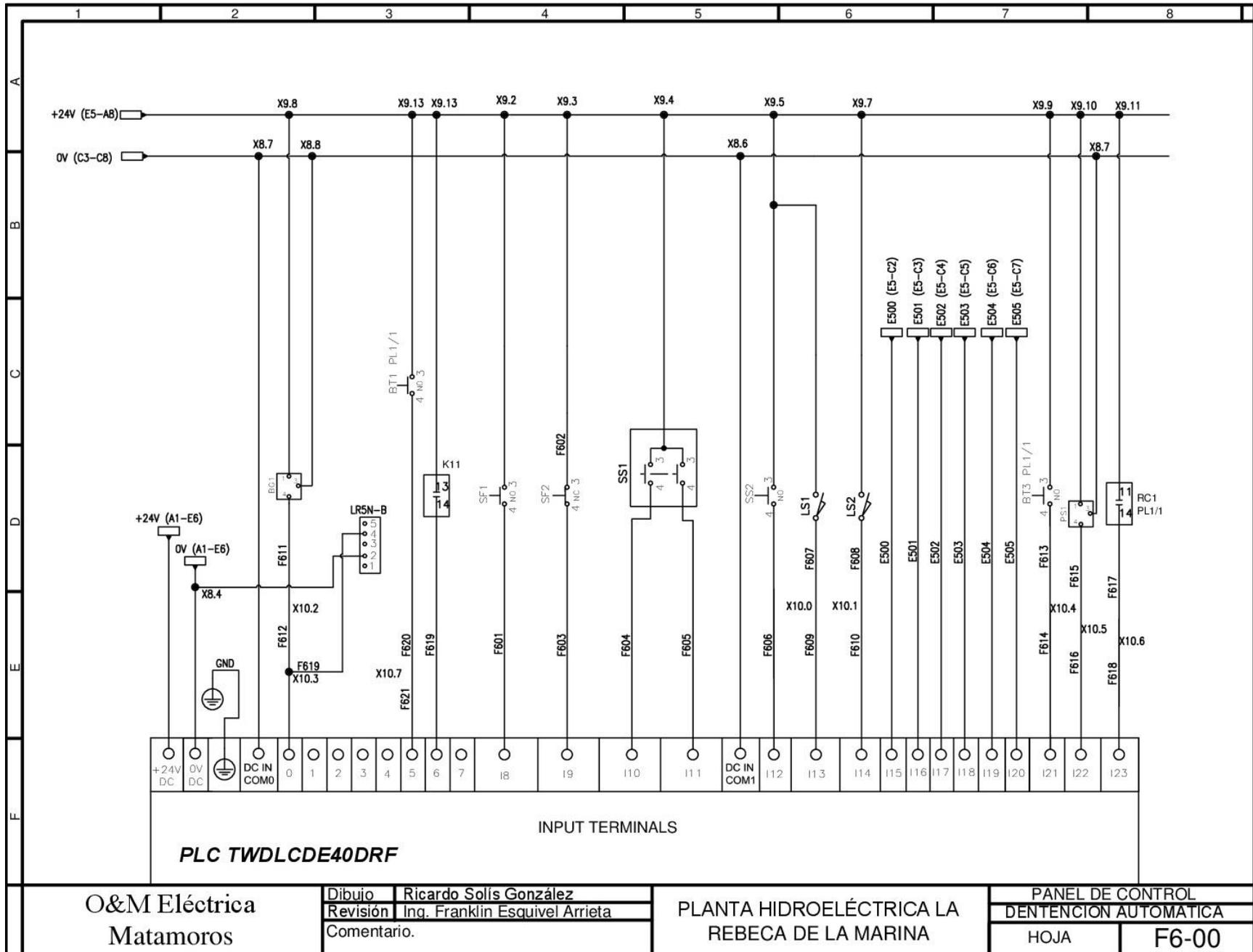
O&M Eléctrica
Matamoros

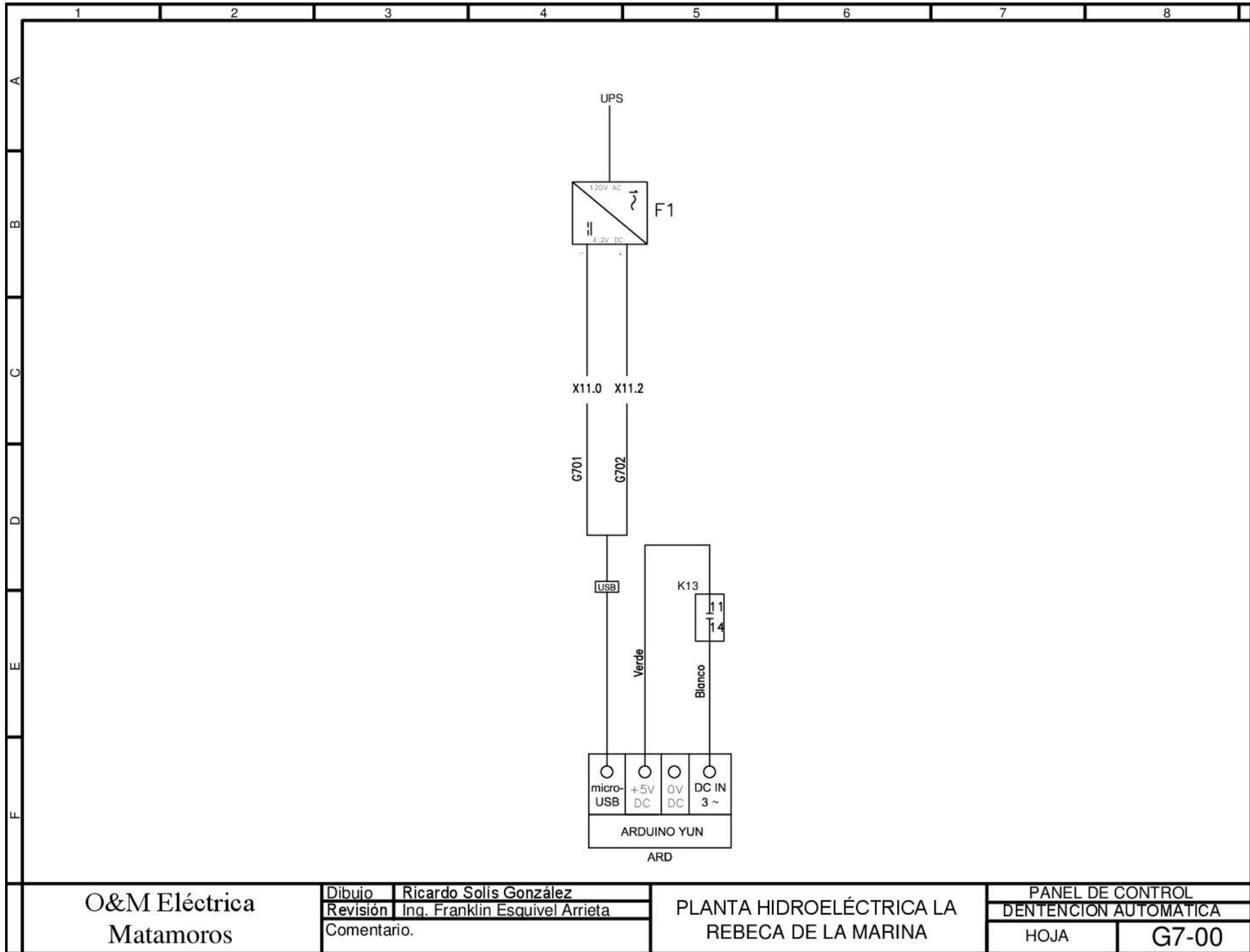
Dibujo	Ricardo Solís González
Revisión	Ing. Franklin Esquivel Arrieta
Comentario.	

PLANTA HIDROELÉCTRICA LA
REBECA DE LA MARINA

PANEL DE CONTROL DENTENCION AUTOMÁTICA	
HOJA	D4-00





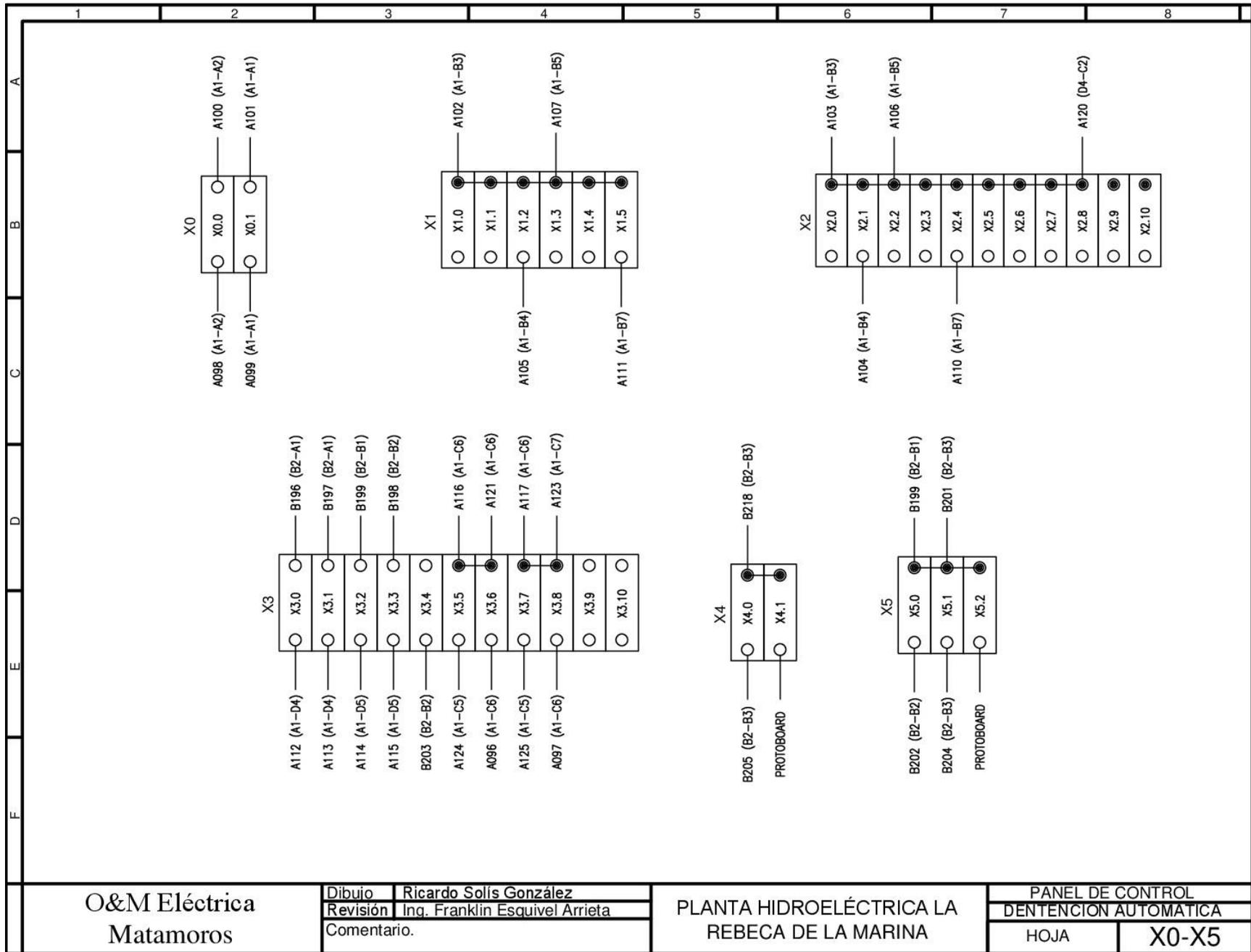


O&M Eléctrica
Matamoros

Dibujo	Ricardo Solís González
Revisión	Ing. Franklin Esquivel Arrieta
Comentario.	

PLANTA HIDROELÉCTRICA LA
REBECA DE LA MARINA

PANEL DE CONTROL	
DENTENCION AUTOMÁTICA	
HOJA	G7-00

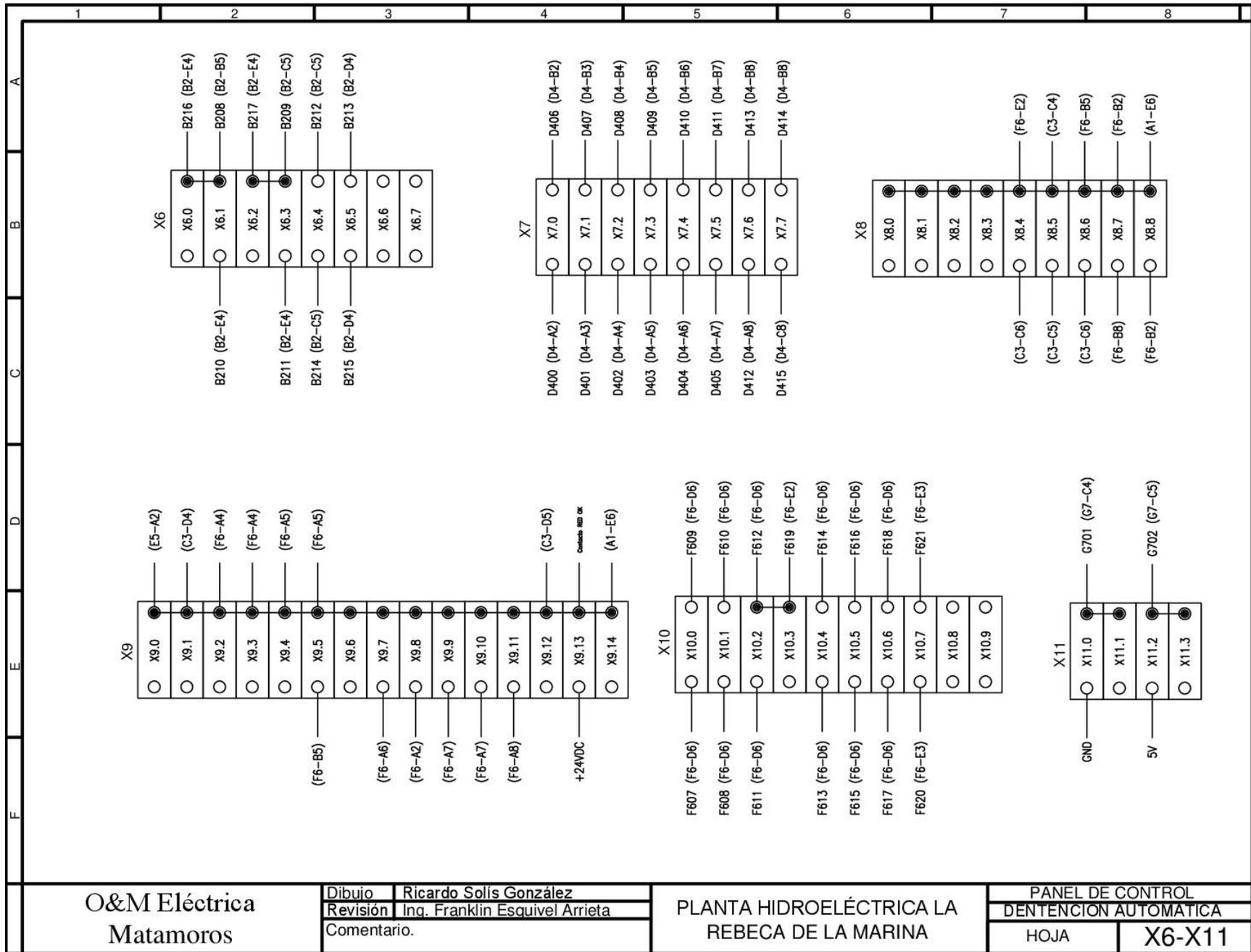


O&M Eléctrica
Matamoros

Dibujo	Ricardo Solís González
Revisión	Ing. Franklin Esquivel Arrieta
Comentario.	

PLANTA HIDROELÉCTRICA LA
REBECA DE LA MARINA

PANEL DE CONTROL DENTENCION AUTOMÁTICA	
HOJA	X0-X5



O&M Eléctrica
Matamoras

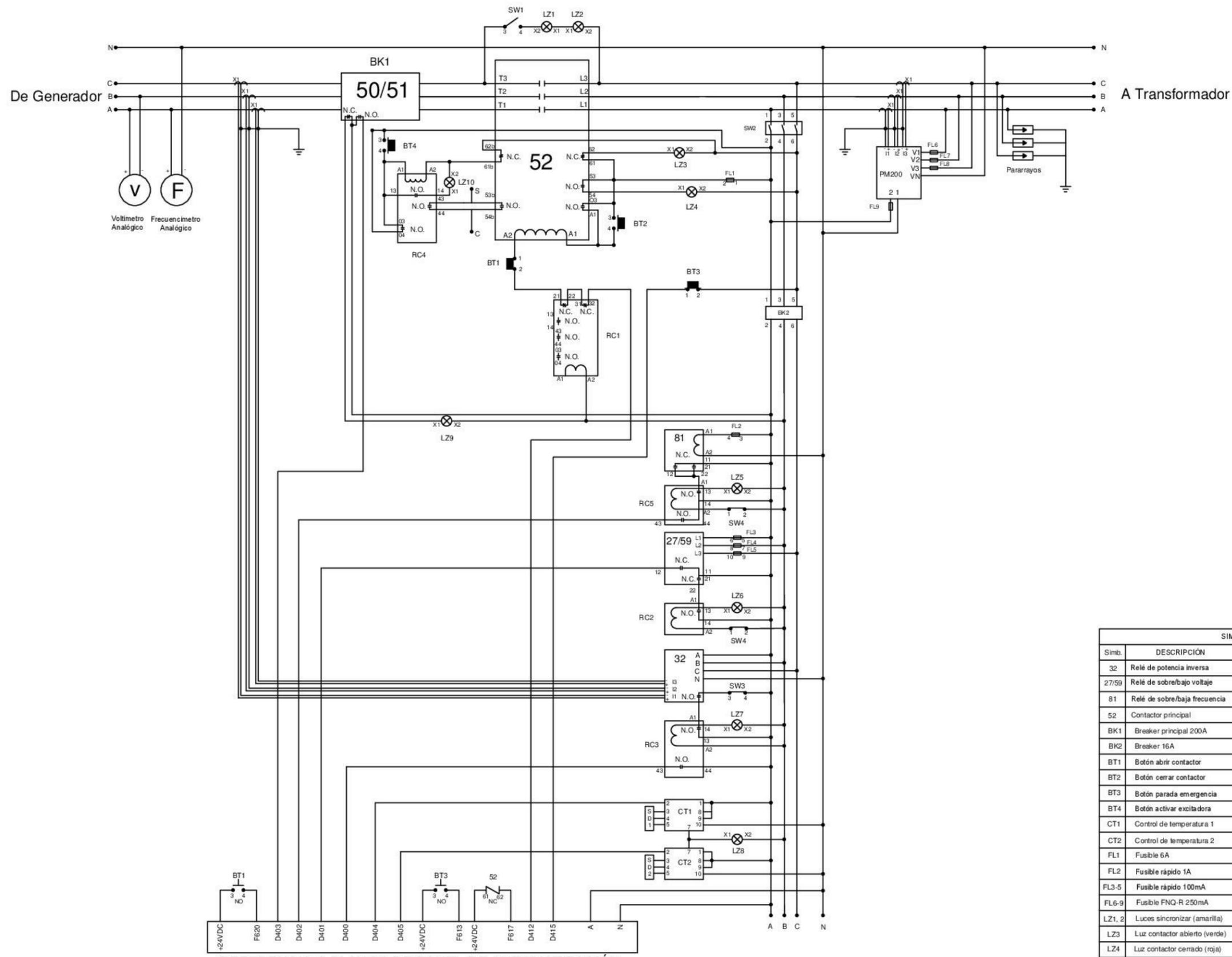
Dibujo | Ricardo Solís González
Revisión | Ing. Franklin Esquivel Arrieta
Comentario.

PLANTA HIDROELÉCTRICA LA
REBECA DE LA MARINA

PANEL DE CONTROL
DENTENCION AUTOMÁTICA
HOJA | X6-X11

ITEM	DESCRIPCIÓN	HOJA	REFERENCIA	FUNCIÓN
K9	CONTACTOR BOBINA 24V DC 25A	(C3-C5)	LC1D25BD	ABRIR VALV.CAUDAL
K10	CONTACTOR BOBINA 24V DC 25A	(C3-C5)	LC1D25BD	CERRAR VALV.CAUDAL
K11	CONTACTOR BOBINA 120V DC 38A	(A1-C7)	LC1D38G7	SWITCHEO ENTRE FUENTE O BATERÍA
K12	RELAY MINI BOBINA 24V DC	(C3-C6)	RXM4AB2BD	CONTROL DE DESACOPLE DE LA PLANTA
K13	RELAY DE BLOQUE	(G7-E5)	C383RL24D	
M1	MOTOR DC VALV.CAUDAL	(B2-D5)	68146	MOTOR DC VALV.CAUDAL
M2	MOTOR DC GOBERNADOR	(B2-C5)	-	MOTOR DC GOBERNADOR
SF1	PULSADOR AMARILLO	(F6-D4)	XB4BW35B5	RESET
SF2	PULSADOR VERDE	(F6-D4)	XB4BW	ACCIONAMIENTO GOBERNADOR
SS1	SELECTOR 3 POSIC.S/ENCLAVAMIENO	(F6-C5)	XB4BD53	GIRO HORARIO/ANTIHORARIO VALV.CAUDAL
SS2	SELECTOR 2 POSICIONES	(F6-D5)	32223	MANUAL/AUTOMÁTICO
LS1	LIMIT SWITCH	(F6-D6)	XCKT2110G11	VALVULA ABIERTA
LS2	LIMIT SWITCH	(F6-D6)	XCKT2110G11	VALVULA CERRADA
LT1	LUZ ROJA	(C3-C5)		
LT2	LUZ AMARILLA	(C3-C6)		
LT3	LUZ VERDE	(A1-C7)		
BG1	SENSOR INDUCTIVO VELOCIDAD	(F6-D2)	E2A-M12KS04-M1-B1	
SS3	BOTON PARO EMERGENCIA	(F6-D7)		
PS1	PRESOSTATO	(F6-D7)	XML-F010D2026	
LR5N-B	MEDIDOR DE PULSOS	(F6-D3)	LR5N-B	
D1	RECTIFICADOR DE PROTECCIÓN	(B2-B2)	NTE5342	

O&M Eléctrica Matamoros	Dibujo	Ricardo Solís González	PLANTA HIDROELÉCTRICA LA REBECA DE LA MARINA	PANEL DE CONTROL	
	Revisión	Ing. Franklin Esquivel Arrieta		DENTENCION AUTOMATICA	
	Comentario.			HOJA	L-EQUIP2



SIMBOLOGÍA			
Simb.	DESCRIPCIÓN	Simb.	DESCRIPCIÓN
32	Relé de potencia inversa	LZ5	Luz alarma frecuencia (roja)
27/59	Relé de sobre/bajo voltaje	LZ6	Luz alarma Voltaje (roja)
81	Relé de sobre/baja frecuencia	LZ7	Luz alarma Potencia Inversa (roja)
52	Contactor principal	LZ8	Luz alarma temperatura (roja)
BK1	Bresker principal 200A	LZ9	Luz Breaker cerrado (roja)
BK2	Breaker 16A	LZ10	Luz excitadora activa (amarilla)
BT1	Botón abrir contactor	PM200	Display digital multivariables PM200
BT2	Botón cerrar contactor	RC1	Relé de control circuito de disparo
BT3	Botón parada emergencia	RC2	Relé de control de luz voltaje
BT4	Botón activar excitadora	RC3	Relé de control potencia inversa
CT1	Control de temperatura 1	RC4	Relé de control de excitadora
CT2	Control de temperatura 2	RC5	Relé de control de luz frecuencia
FL1	Fusible 6A	SW1	Interruptor para sincronizar
FL2	Fusible rápido 1A	SW2	Interruptor 3 fases
FL3-5	Fusible rápido 100mA	SW3	Interruptor relé potencia inversa
FL6-9	Fusible FNQ-R 250mA	SW4	Interruptor desconexión RC2 y RC5
LZ1, 2	Luces sincronizar (amarilla)	SD1	Sonda temperatura cojinete 1
LZ3	Luz contactor abierto (verde)	SD2	Sonda temperatura cojinete 2
LZ4	Luz contactor cerrado (roja)		

A.2. Programación del PLC

Configuración objetos de memoria:

Configuración del temporizador (%TM)

Uso	%TM	Símbolo	Tipo	Ajustable	Base de tiempo	Preselección
Sí	%TM0	TCD	TCN	Sí	100 ms	71
Sí	%TM1	RESET_LR	TP	Sí	1 ms	1000
Sí	%TM2	SET_LR	TOF	Sí	1 ms	1000
Sí	%TM3	RESET_LV	TP	Sí	1 ms	1000
Sí	%TM4	SET_LV	TOF	Sí	1 ms	1000
Sí	%TM5	TAD	TP	Sí	100 ms	1
Sí	%TM6	TCD2	TCN	Sí	100 ms	70
Sí	%TM7	TARDUI NO	TP	Sí	1 s	9999

Configuración del contador (%C)

Configuración de los registros (%R)

Configuración del conmutador de tambor cíclico (%DR)

Configuración de fechador (%SCH)

Configuración de contadores rápidos (%FC)

Configuración de los contadores muy rápidos (%VFC)

%VFC0 : Frecuencímetro Palabra simple	
Símbolo :	
Entradas especializadas	
Entrada de pulsos	%V0.1
Ajustable	No
Ventana de tiempo	1 s

Palabras de memoria (%MD)

Palabras de memoria (%MW)

Palabras de memoria (%MF)

Bits de memoria (%M)

Uso	%M	Símbolo	Asignado
Sí	%M0	ETAPA0	Sí
Sí	%M1	ETAPA1	Sí
Sí	%M2	ETAPA2	Sí
Sí	%M3	ETAPA3	Sí
Sí	%M4	ETAPA4	Sí
Sí	%M5	ETAPA5	Sí
Sí	%M6	ETAPA6	Sí
Sí	%M7	ETAPA7	Sí
Sí	%M8	ETAPA8	Sí
Sí	%M9	MARDUI NO	Sí
Sí	%M10	ETAPA10	Sí
Sí	%M11	ETAPA11	Sí
Sí	%M12	TEMP7	Sí
Sí	%M13	ETAPA13	Sí
Sí	%M14	ETAPA14	Sí

Uso	%M	Símbolo	Asignado
Sí	%M15	ETAPA15	Sí
Sí	%M16	ETAPA16	Sí
Sí	%M17	TEMP6	Sí
Sí	%M18	TEMP5	Sí
Sí	%M19	ETAPA19	Sí
Sí	%M20	ETAPA0REP	Sí
Sí	%M21	TEMP0	Sí
Sí	%M22	TEMP1	Sí
Sí	%M23	TEMP2	Sí
Sí	%M24	MLR	Sí
Sí	%M25	FALLA1	Sí
Sí	%M26	FALLA2	Sí
Sí	%M27	I NLR2	Sí
Sí	%M28	I NLR	Sí
Sí	%M29	FEM	Sí
Sí	%M30	DESBORDE1	Sí
Sí	%M31	FV	Sí
Sí	%M32	ACVEL	Sí
Sí	%M33	PCERRADO	Sí
Sí	%M34	MLV	Sí
Sí	%M35	TEMP3	Sí
Sí	%M36	TEMP4	Sí
Sí	%M37	MLV2	Sí

Configuración PID (PID)

Configuración constante (%KD)

Configuración constante (%KW)

Configuración constante (%KF)

Configuración de PLS/PWM (%PLS/%PWM)

Configuración de los objetos externos Comm

Configuración de los objetos externos Drive

Configuración de los objetos externos Tesys

Configuración de los objetos externos Advantys OTB

Uso de memoria

Estadísticas de utilización de la memoria

Datos del usuario		
Bits de memoria	: 38 Bits	0.1%
Palabras de memoria	: 0 Palabras	0.0%
Copia de seguridad realizada	: 300 Palabras	
RAM = EEPROM	: ???	
Constantes	: 0 Palabras	0.0%
Configuración	: 443 Palabras	12.9%
Disp. Mem Datos	: 2911 Palabras	84.3%
Programa de aplicación		
Código ejecutable	: 1124 Palabras	7.1%
Datos de programa	: 4 Palabras	0.1%
Cambios en línea	: 0 Palabras	0.0%
Disp. Mem código	: 14524 Palabras	91.0%
Otros		
Datos ejecutivos	: 88 Palabras	2.6%
:	88 Palabras	2.6%

Configurar el comportamiento

Niveles funcionales

Gestión de los niveles funcionales

Gestión :	Automático
Nivel :	Lo más alto posible

Modo de exploración

Modo de exploración

Modo :	Normal
Duración (ms) :	-

Watchdog

Duración (ms) :	250
-----------------	-----

Evento periódico

No utilizado :	Sí
----------------	----

Arranque

Parámetros

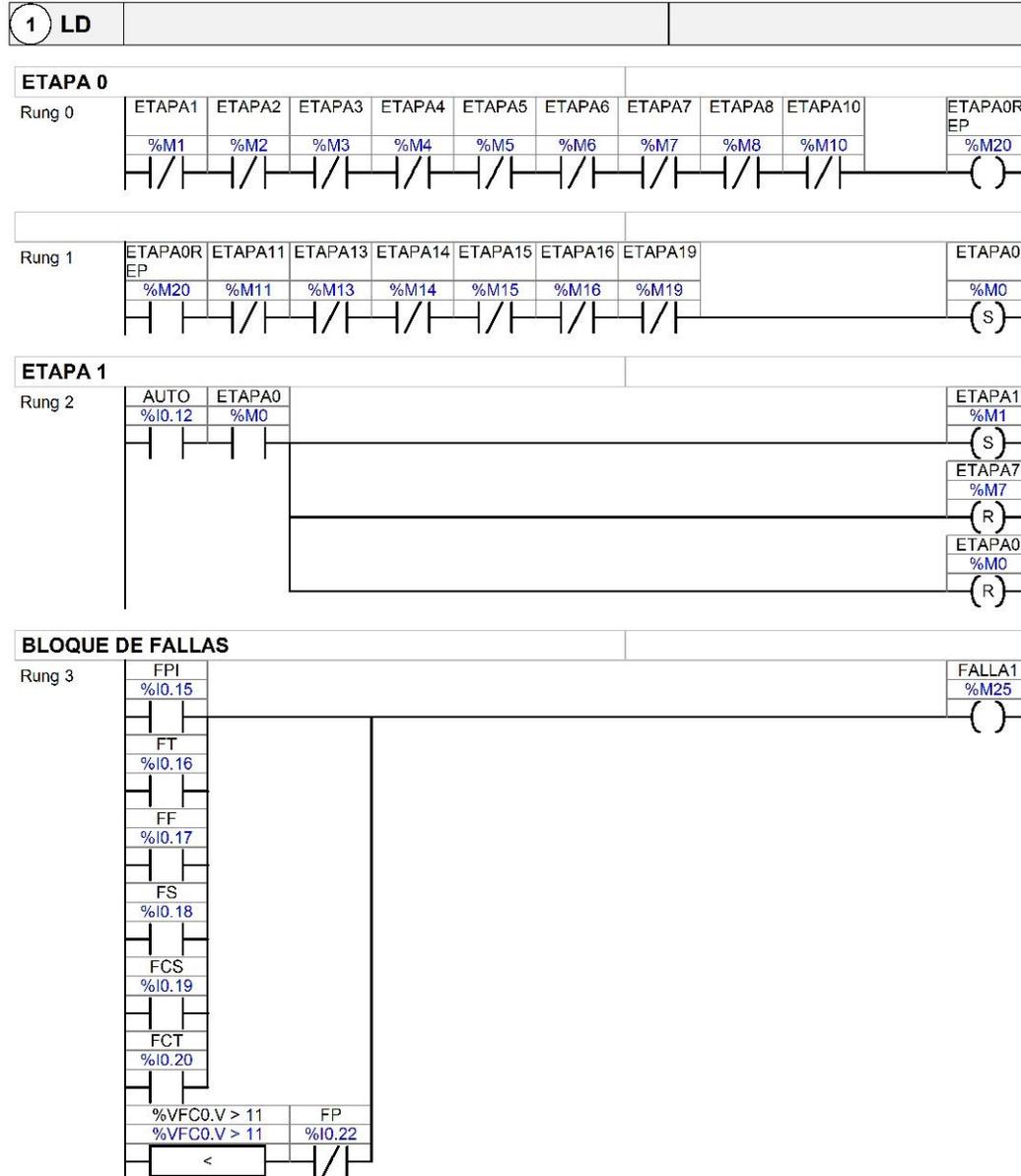
Arranque automático en Run :	No
Entrada Run/ Stop:	Ninguno

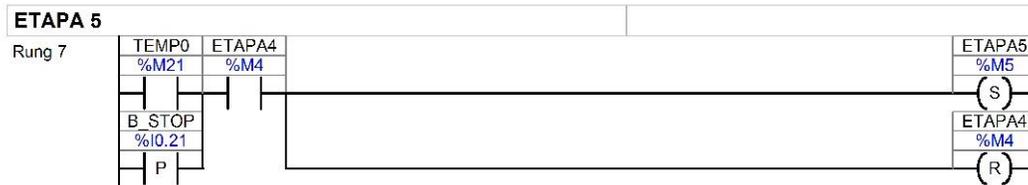
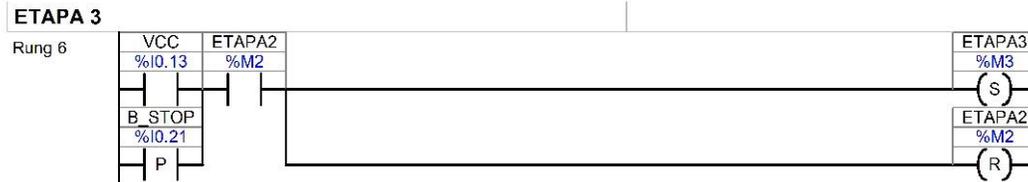
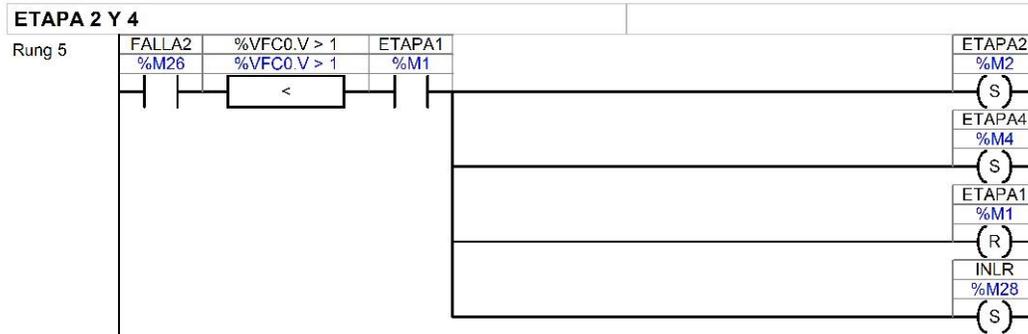
Almacenamiento automático

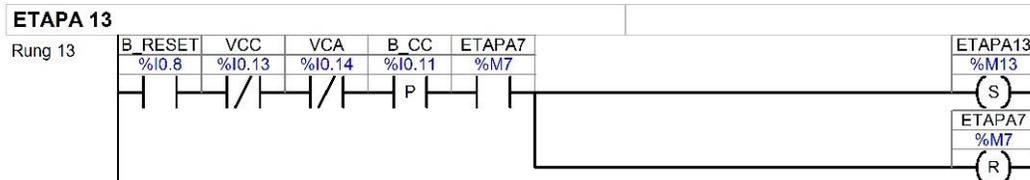
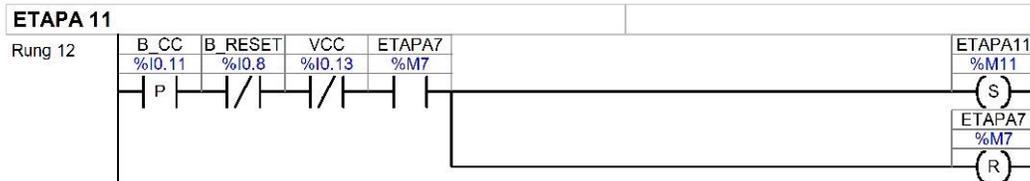
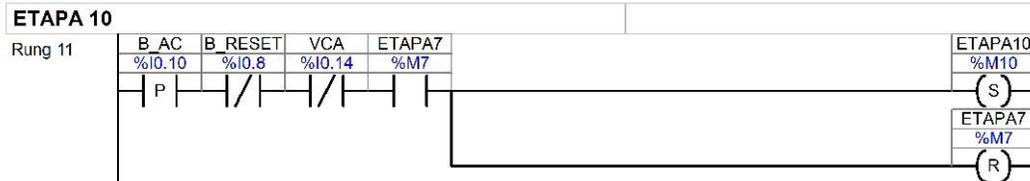
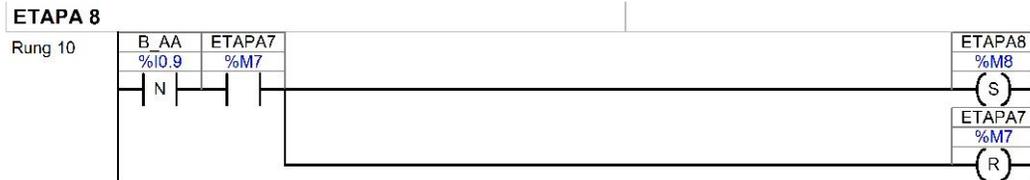
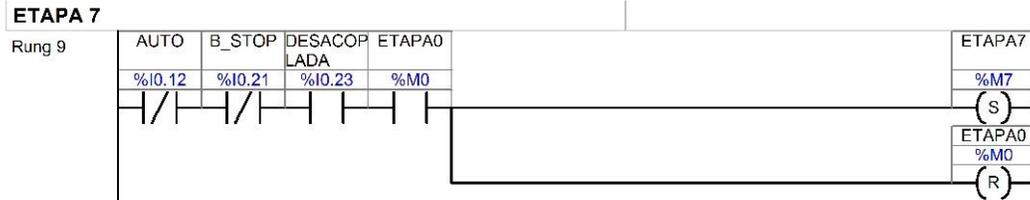
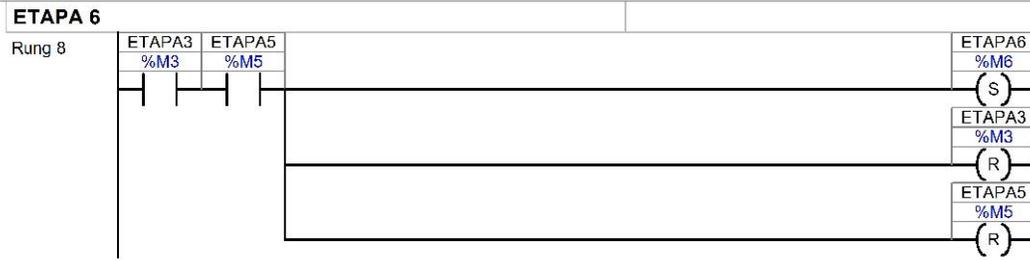
Parámetros

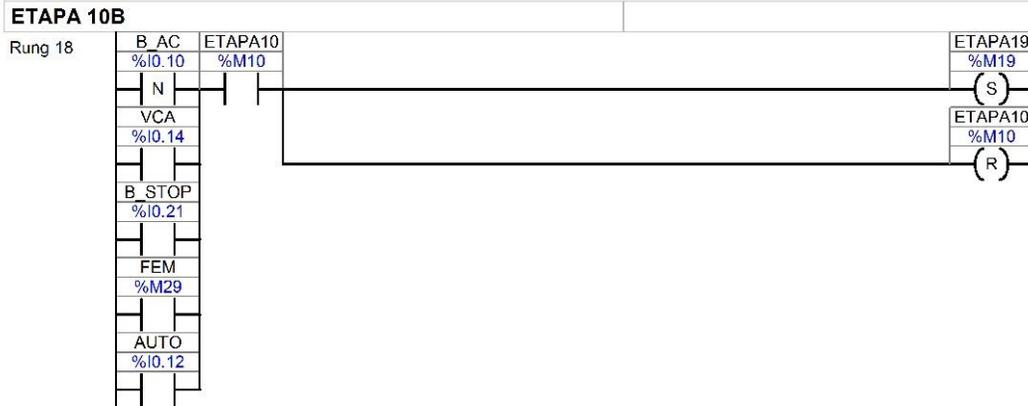
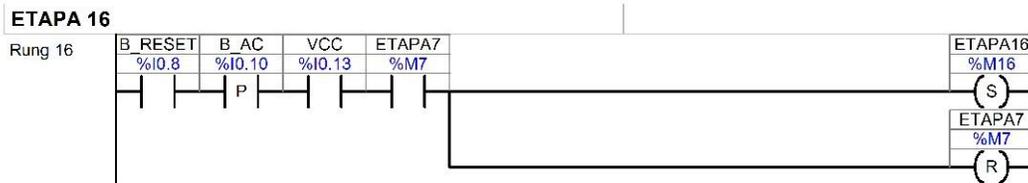
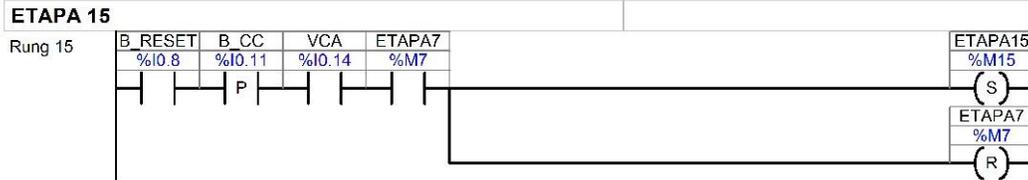
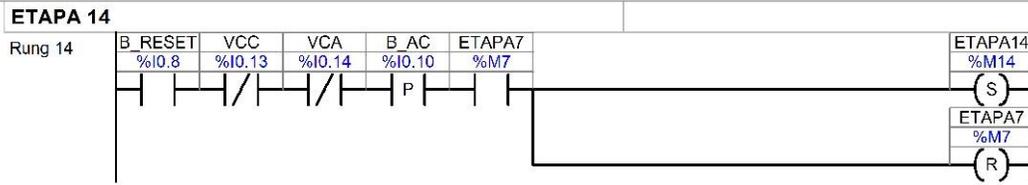
Almacenamiento automático RAM->EEPROM No :	
--	--

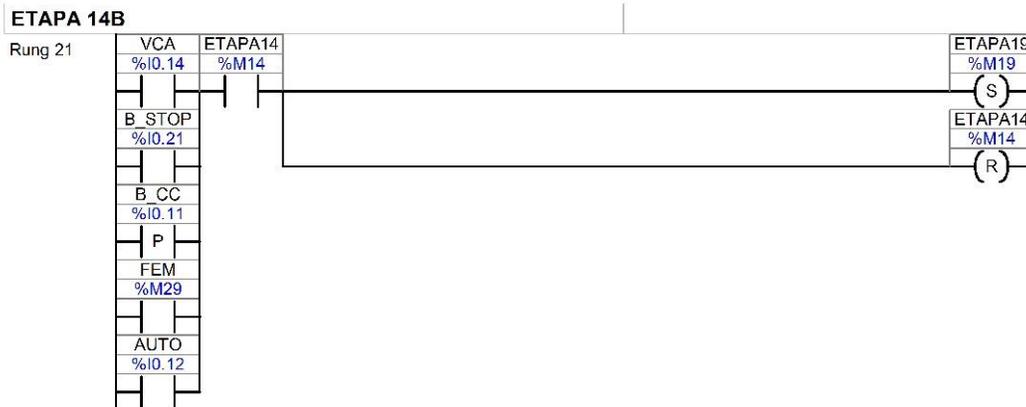
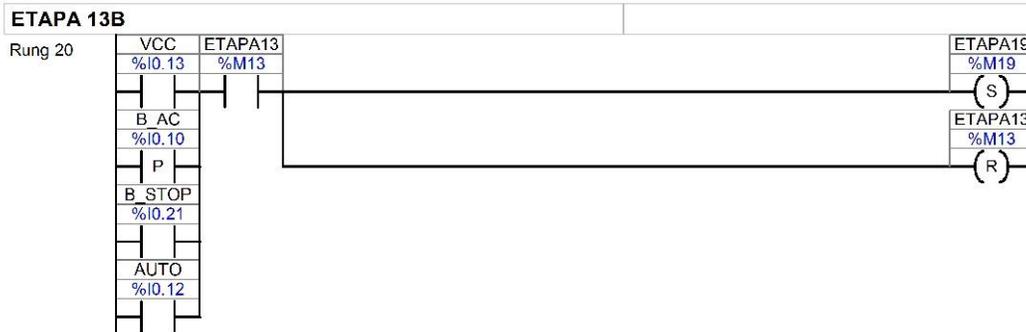
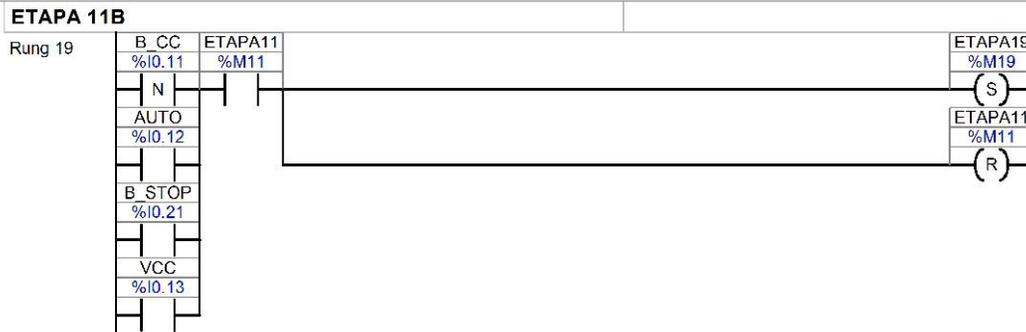
Programa listas y diagramas

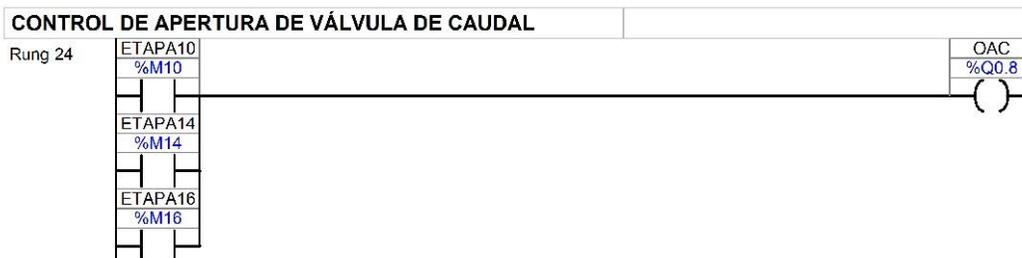
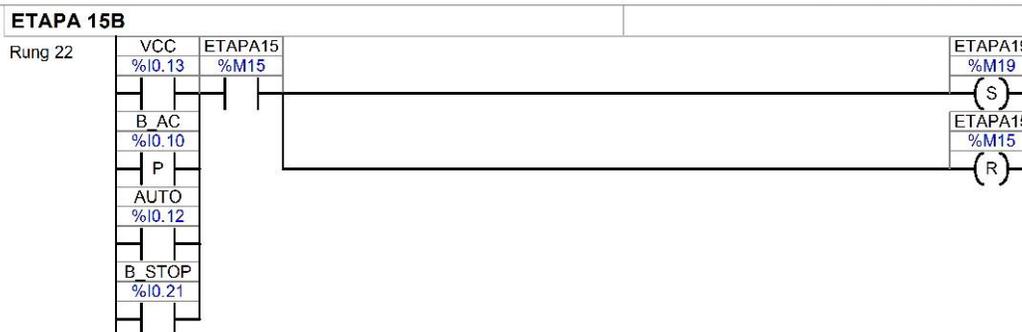


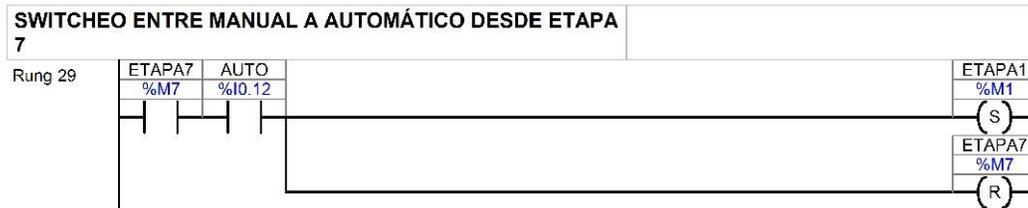
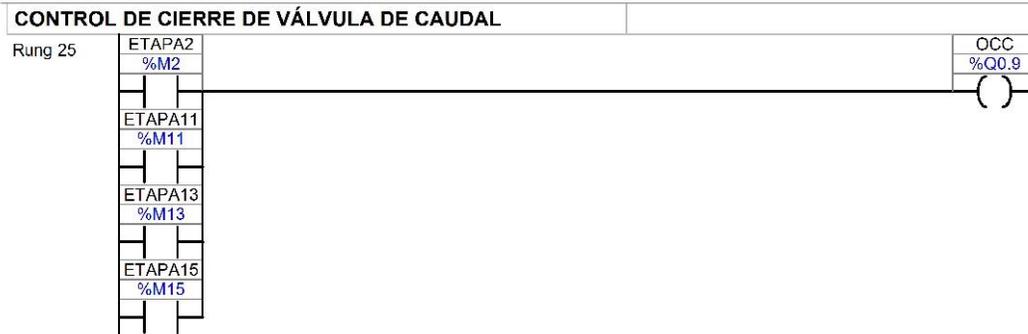


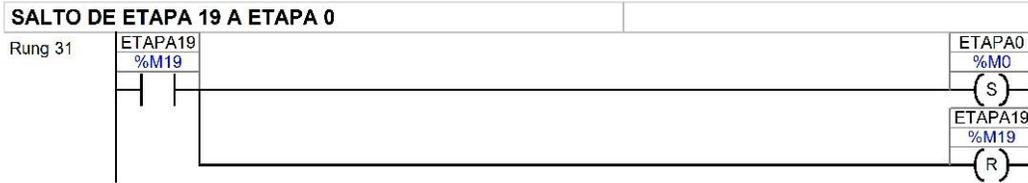


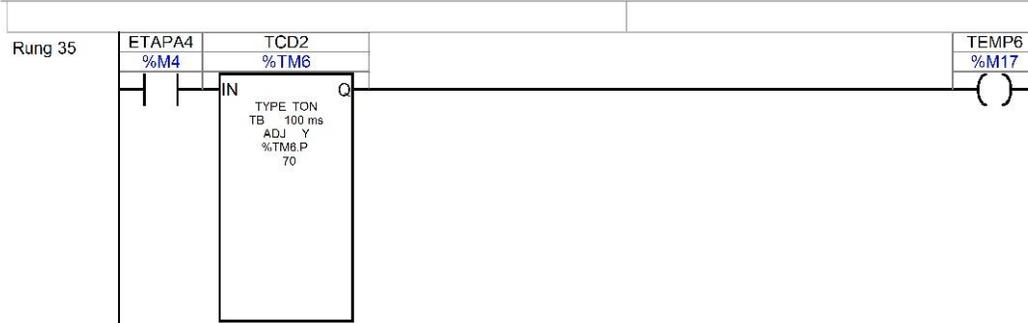




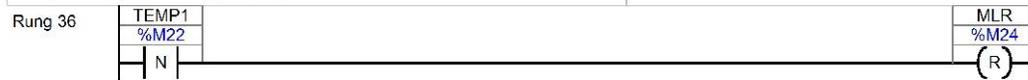




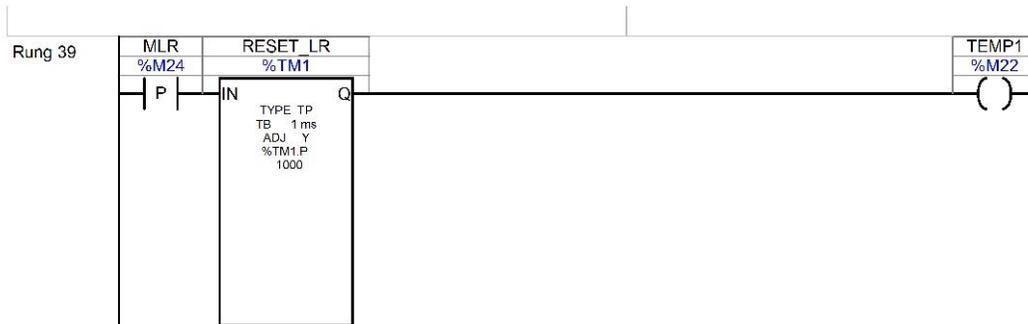


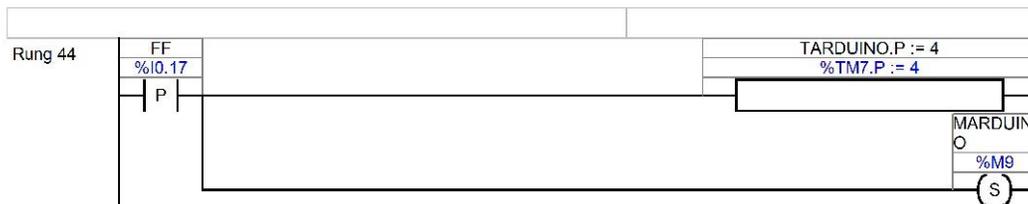
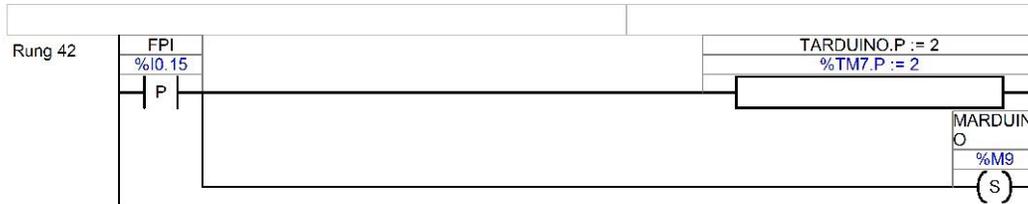
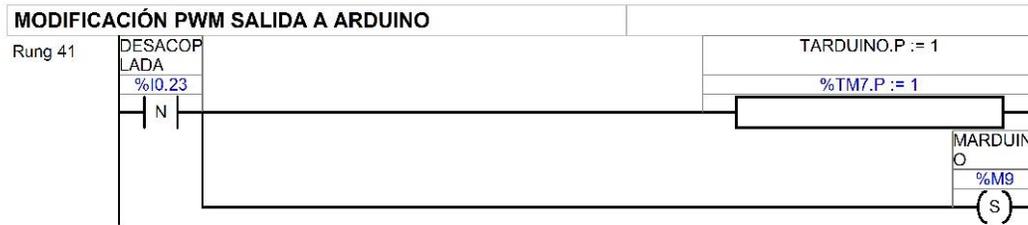


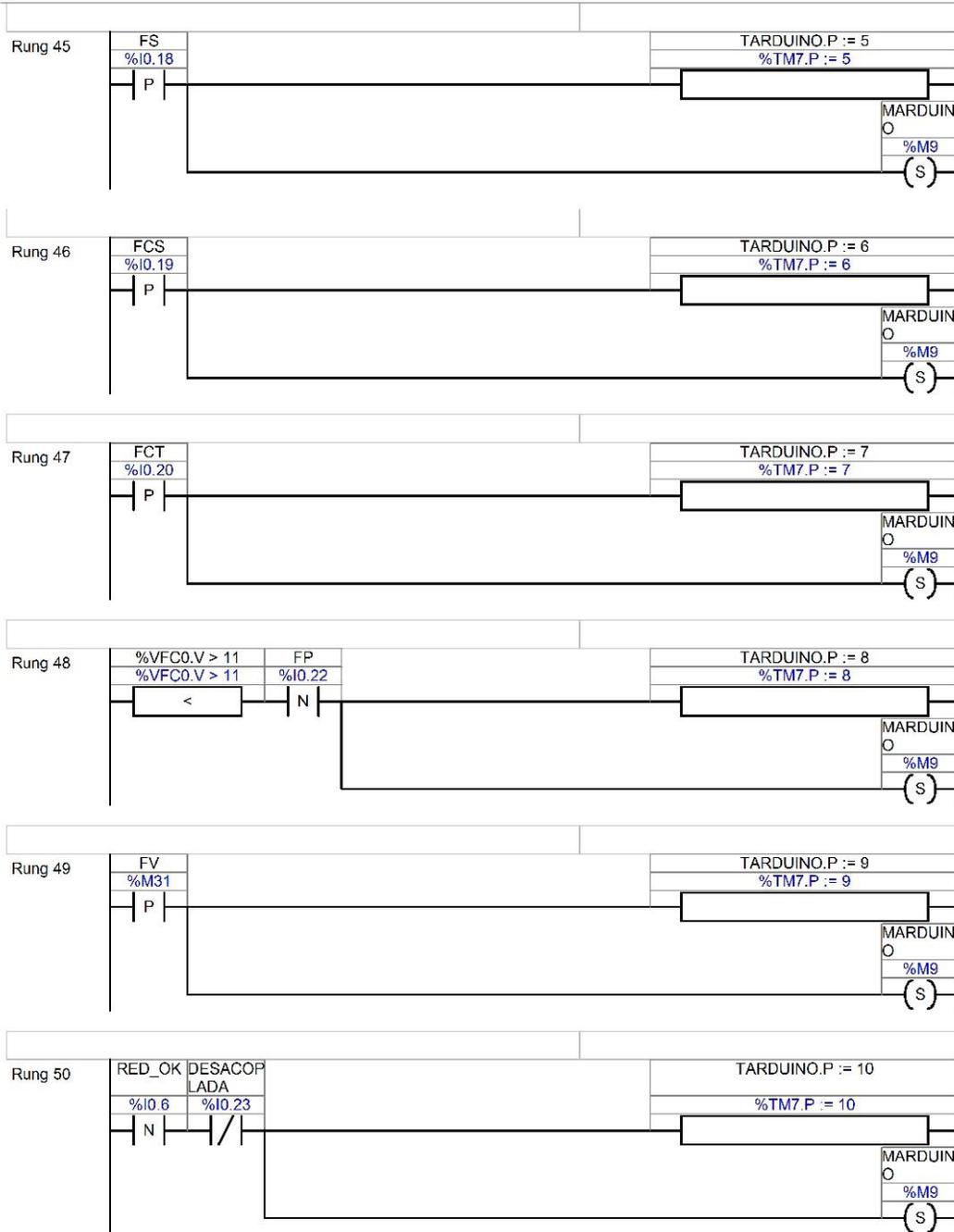
DISEÑO LUZ ROJA PARPADEANTE

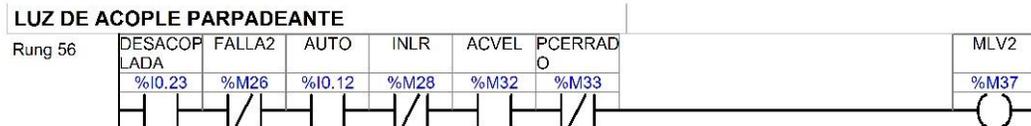
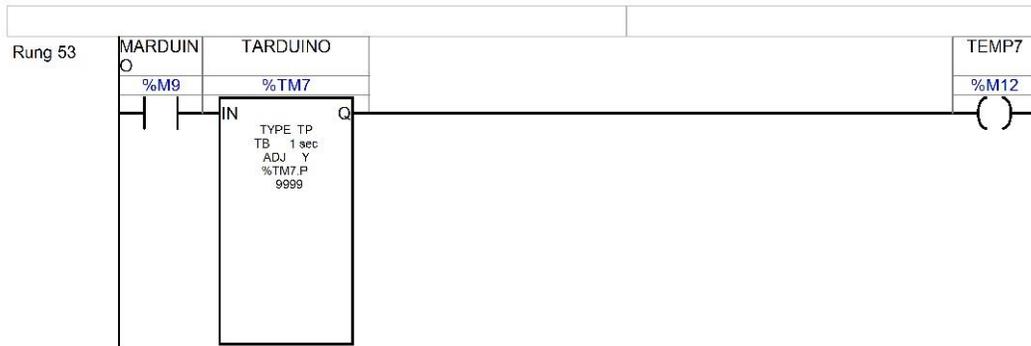
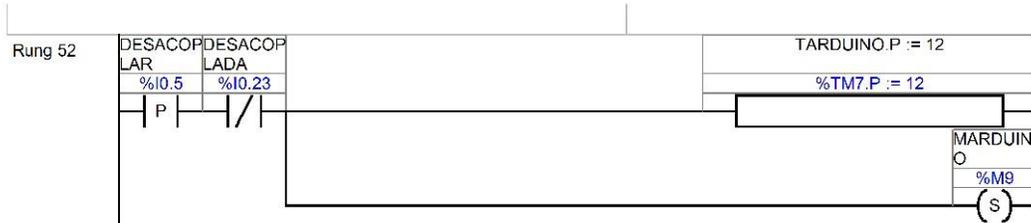
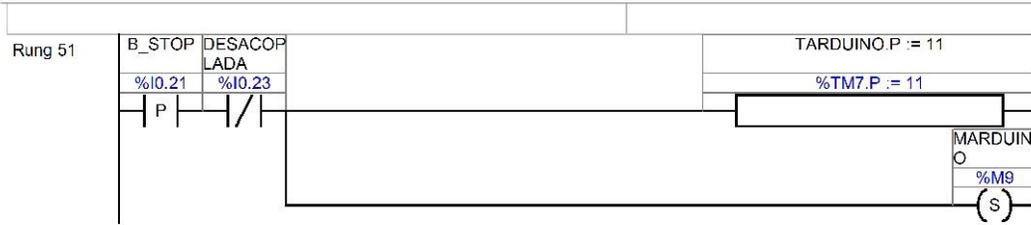


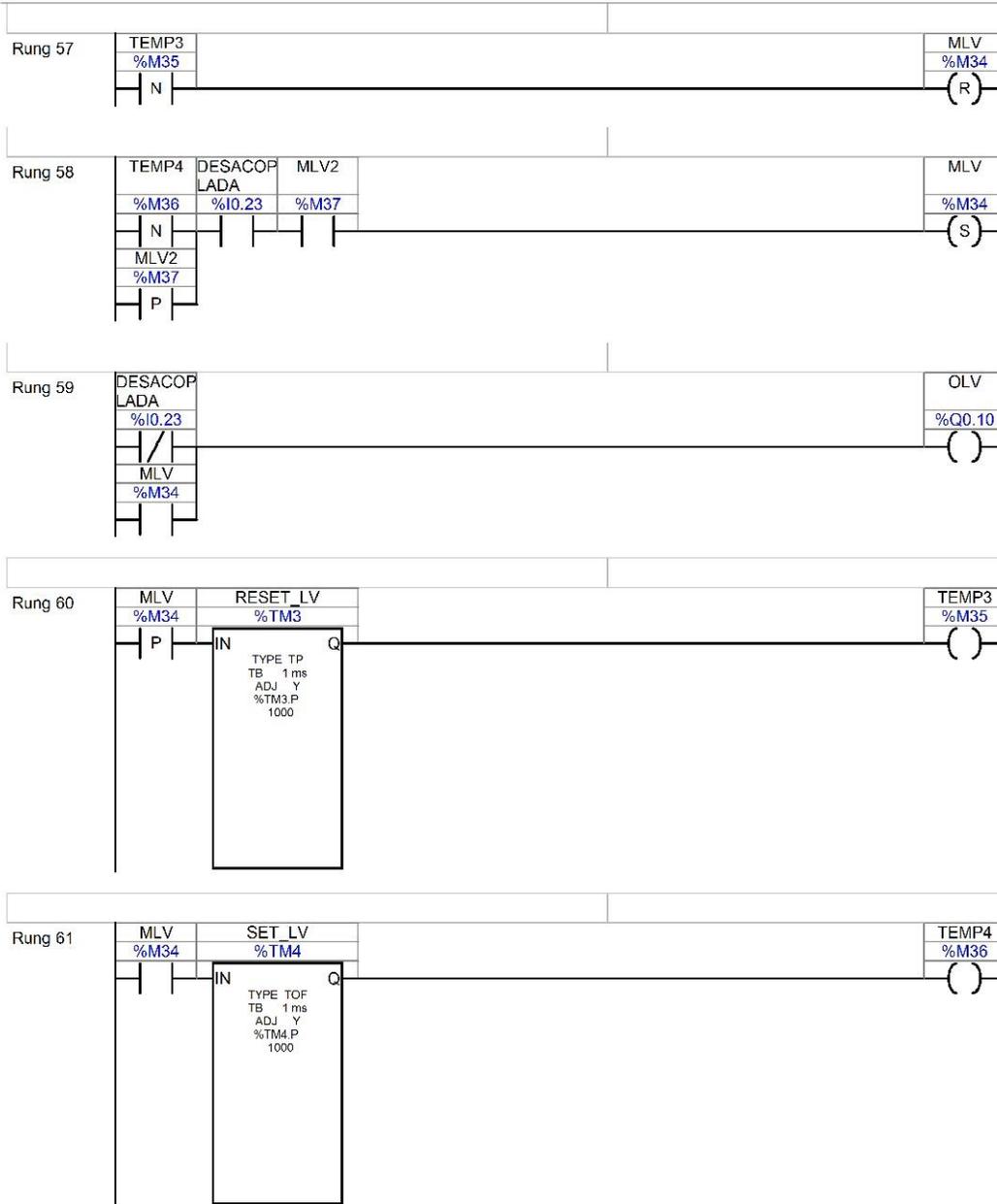
LUZ ROJA PARPADEANTE SI CAMBIA DE AUTO A MANUAL Y ESTÁ ACOPLADA

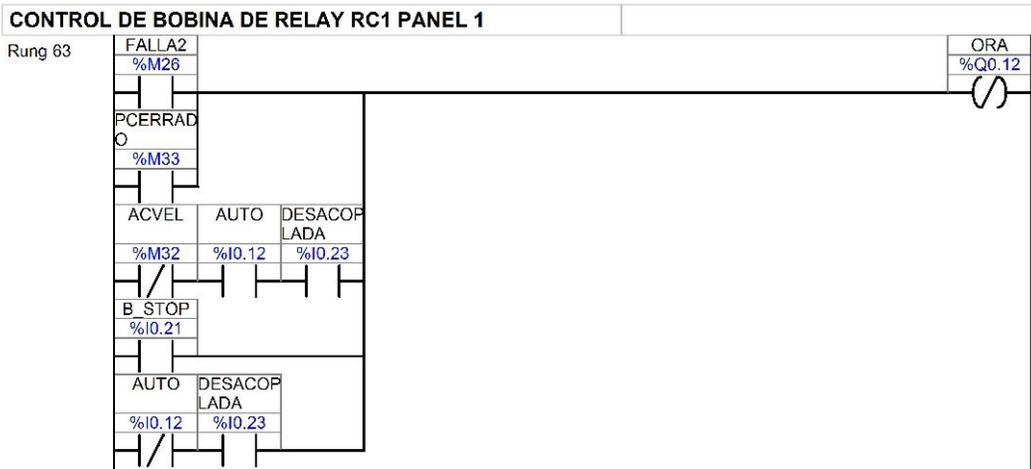
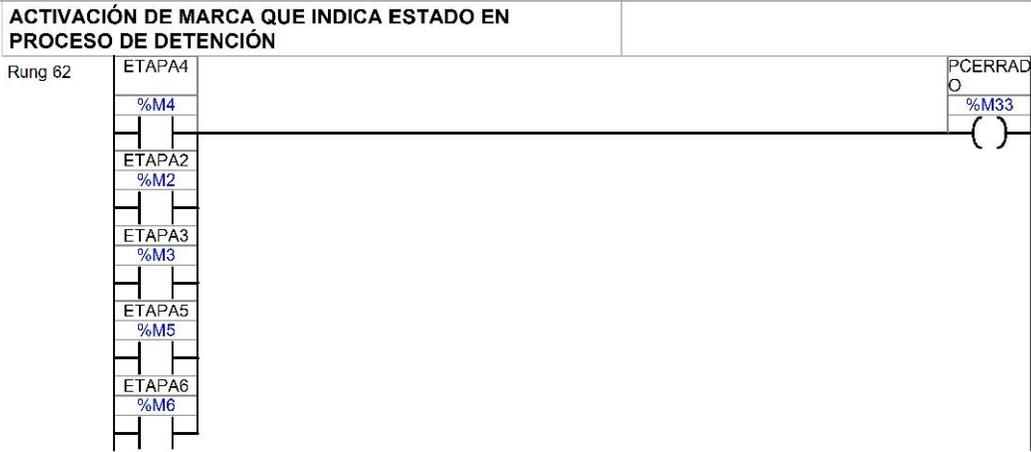


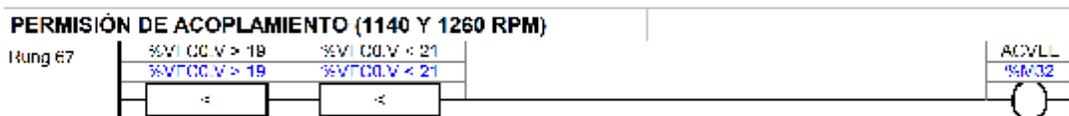
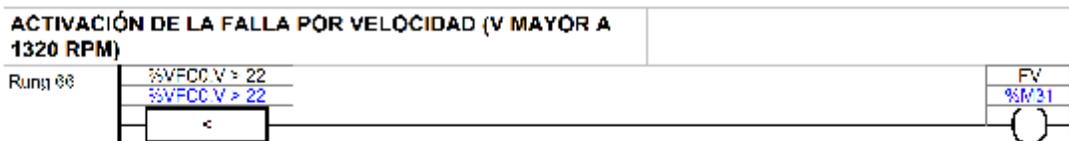
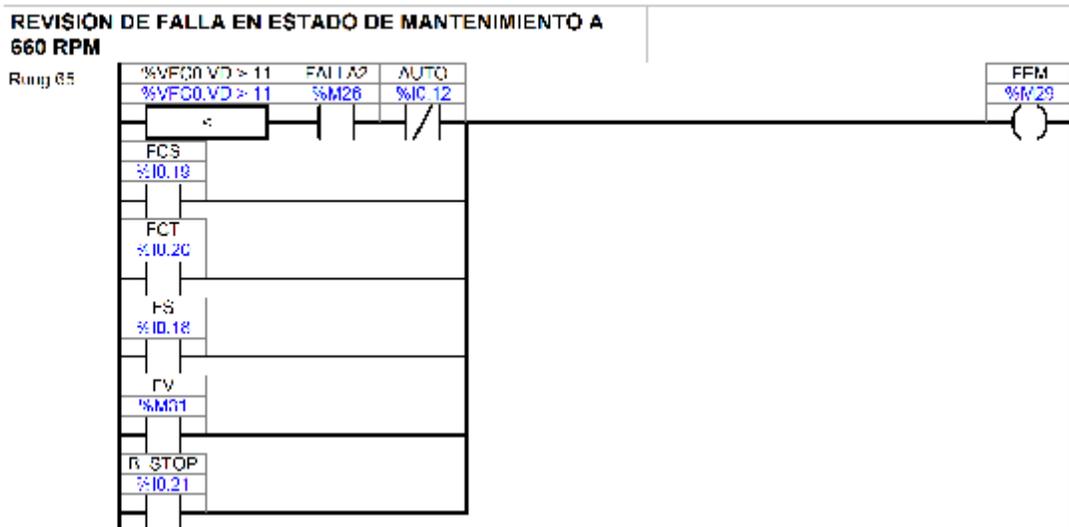
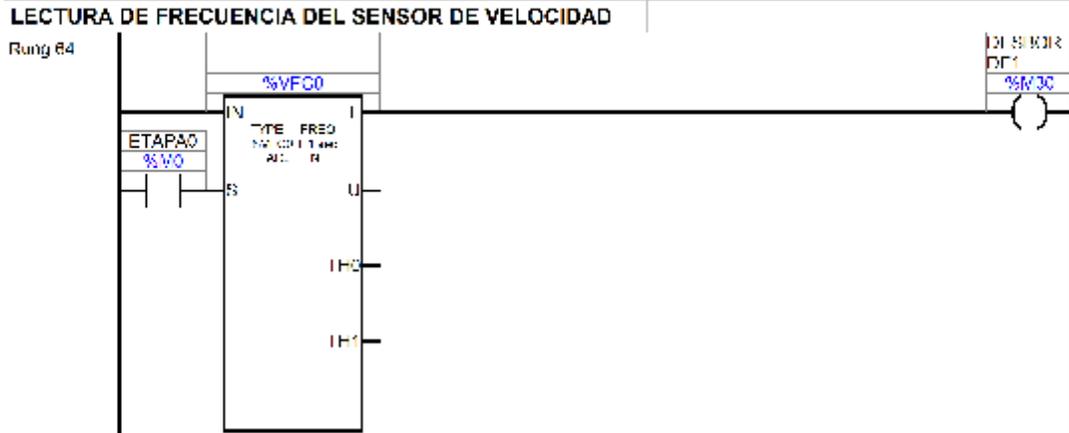












Símbolos

En uso	Dirección	Símbolo	Comentario
Sí	%M2	ACVEL	Permite acoplamiento por velocidad
Sí	%4 0. 12	AUTO	Selector Auto Negada=Manual
Sí	%4 0. 9	B_AA	Pulsador Abrir Alabes
Sí	%4 0. 10	B_AC	Selector abrir valv caudal
Sí	%4 0. 11	B_OC	Selector cerrar valv caudal
Sí	%4 0. 8	B_RESET	Pulsador Reset
Sí	%4 0. 21	B_STOP	Botón Paro de emergencia
Sí	%4 0. 23	DESACOPLADA	Planta desacoplada
Sí	%4 0. 5	DESACOPLAR	
Sí	%M0	DESBORDE1	Desborde del frecuencímetro 1
Sí	%M0	ETAPA0	
Sí	%M20	ETAPA0REP	
Sí	%M1	ETAPA1	
Sí	%M2	ETAPA2	
Sí	%M3	ETAPA3	
Sí	%M4	ETAPA4	
Sí	%M5	ETAPA5	
Sí	%M6	ETAPA6	
Sí	%M7	ETAPA7	
Sí	%M8	ETAPA8	
Sí	%M10	ETAPA10	
Sí	%M11	ETAPA11	
Sí	%M13	ETAPA13	
Sí	%M14	ETAPA14	
Sí	%M15	ETAPA15	
Sí	%M16	ETAPA16	
Sí	%M19	ETAPA19	
Sí	%M25	FALLA1	Bloque de fallas 1
Sí	%M26	FALLA2	Bloque de fallas 2
Sí	%4 0. 19	FCS	Falla por temp en cojin de soporte
Sí	%4 0. 20	FCT	Falla por temp en cojin de tope
Sí	%M29	FEM	Falla en mantenimiento
Sí	%4 0. 17	FF	Falla por sobre/baja frecuencia
Sí	%4 0. 22	FP	Presión OK
Sí	%4 0. 15	FPI	Falla por potencia inversa
No	%KF0	FRECUENCIA	
Sí	%4 0. 18	FS	Falla por sobrecorriente
Sí	%4 0. 16	FT	Falla por sobre/baja tensión
Sí	%M1	FV	Falla por velocidad
Sí	%M28	I NLR	Inicio salida luz roja continua
Sí	%M27	I NLR2	Inicio luz roja cambio de auto a manual
Sí	%M9	MARDUI NO	
Sí	%M24	MLR	Marca luz roja
Sí	%M4	MLV	Marca luz verde
Sí	%M7	MLV2	Marca luz verde 2
Sí	%Q0. 6	OAA	Salida apertura de alabes
Sí	%Q0. 8	OAC	Salida abrir valv caudal
Sí	%Q0. 7	OCA	Salida cierre de alabes
Sí	%Q0. 9	CCC	Salida cerrar valv caudal
Sí	%Q0. 11	QLR	Salida luz roja
Sí	%Q0. 10	CLV	Salida luz verde
Sí	%Q0. 12	CRA	Salida relay de acople

En uso	Dirección	Símbolo	Comentario
Sí	%M3	PCERRADO	Estado en proceso de cerrado
Sí	%Q0.13	QARDUI NO	Salida a arduino
Sí	%I0.6	RED_OK	Desconexión de la red
Sí	%TM1	RESET_LR	
Sí	%TM3	RESET_LV	
Sí	%TM2	SET_LR	
Sí	%TM4	SET_LV	
Sí	%I0.1	SVEL	Entrada sensor de velocidad (RESERVADA)
Sí	%TM5	TAD	
Sí	%TM7	TARDUI NO	
Sí	%TM0	TCD	
Sí	%TM6	TCD2	
Sí	%M21	TEMP0	Temporizador control cierre al abes
Sí	%M22	TEMP1	Temporizador TP Parpadeo Luz reset
Sí	%M23	TEMP2	Temporizador TCF Parpadeo Luz reset
Sí	%M35	TEMP3	Temporizador TP Parpadeo Luz acople
Sí	%M36	TEMP4	Temporizador TCF Parpadeo Luz acople
Sí	%M18	TEMP5	Temporizador control apertura al abes
Sí	%M17	TEMP6	Temporizador control cierre al abes 2
Sí	%M12	TEMP7	Salida temporizador Arduino
Sí	%I0.14	VCA	Límit Switch valv Caudal Abierta
Sí	%I0.13	VCC	Límit Switch valv Caudal Cerrada

Referencias cruzadas

Dirección	Símbolo	Sección	Líneas/Redes	Operador
		1	3)
		1	28)
		1	33	BLK: END
		1	33	BLK: OUT
		1	33	I N
		1	34	BLK: END
		1	34	BLK: OUT
		1	34	I N
		1	35	BLK: END
		1	35	BLK: OUT
		1	35	I N
		1	37)
		1	39	BLK: END
		1	39	BLK: OUT
		1	39	I N
		1	40	BLK: END
		1	40	BLK: OUT
		1	40	I N
		1	53	BLK: END
		1	53	BLK: OUT
		1	53	I N
		1	60	BLK: END
		1	60	BLK: OUT
		1	60	I N
		1	61	BLK: END
		1	61	BLK: OUT
		1	61	I N
		1	63)
		1	63)
		1	64	BLK: END
		1	64	BLK: OUT
		1	64	I N
		1	64	S
¼ 0. 0. 5	DESACOPLAR	1	52	LDR
¼ 0. 0. 6	RED_OK	1	4	ORF
	RED_OK	1	50	LDF
¼ 0. 0. 8	B_RESET	1	11	ANDN
	B_RESET	1	12	ANDN
	B_RESET	1	13	LD
	B_RESET	1	14	LD
	B_RESET	1	15	LD
	B_RESET	1	16	LD
	B_RESET	1	32	AND
¼ 0. 0. 9	B_AA	1	10	LDF
¼ 0. 0. 10	B_AC	1	11	LDR
	B_AC	1	14	ANDR
	B_AC	1	16	ANDR
	B_AC	1	18	LDF
	B_AC	1	20	ORR
	B_AC	1	22	ORR
¼ 0. 0. 11	B_CC	1	12	LDR
	B_CC	1	13	ANDR
	B_CC	1	15	ANDR
	B_CC	1	19	LDF
	B_CC	1	21	ORR
	B_CC	1	23	ORR
¼ 0. 0. 12	AUTO	1	2	LD

Dirección	Símbolo	Sección	Líneas/Redes	Operador
% 0. 0. 12	AUTO	1	9	LDN
	AUTO	1	17	OR
	AUTO	1	18	OR
	AUTO	1	19	OR
	AUTO	1	20	OR
	AUTO	1	21	OR
	AUTO	1	22	OR
	AUTO	1	23	OR
	AUTO	1	29	AND
	AUTO	1	30	ANDN
	AUTO	1	38	ANDN
	AUTO	1	56	AND
	AUTO	1	63	AND
	AUTO	1	63	OR/ N
	AUTO	1	65	ANDN
% 0. 0. 13	VCC	1	6	LD
	VCC	1	12	ANDN
	VCC	1	13	ANDN
	VCC	1	14	ANDN
	VCC	1	16	AND
	VCC	1	19	OR
	VCC	1	20	LD
	VCC	1	22	LD
	VCC	1	28	ORN
% 0. 0. 14	VCA	1	11	ANDN
	VCA	1	13	ANDN
	VCA	1	14	ANDN
	VCA	1	15	AND
	VCA	1	18	OR
	VCA	1	21	LD
	VCA	1	23	LD
% 0. 0. 15	FPI	1	3	LD
	FPI	1	42	LDR
	FT	1	3	OR
% 0. 0. 16	FT	1	43	LDR
	FF	1	3	OR
% 0. 0. 17	FF	1	44	LDR
	FS	1	3	OR
% 0. 0. 18	FS	1	45	LDR
	FS	1	65	OR
	FCS	1	3	OR
% 0. 0. 19	FCS	1	46	LDR
	FCS	1	65	OR
	FCT	1	3	OR
% 0. 0. 20	FCT	1	47	LDR
	FCT	1	65	OR
	B_STOP	1	4	ORR
% 0. 0. 21	B_STOP	1	6	ORR
	B_STOP	1	7	ORR
	B_STOP	1	9	ANDN
	B_STOP	1	17	OR
	B_STOP	1	18	OR
	B_STOP	1	19	OR
	B_STOP	1	20	OR
	B_STOP	1	21	OR
	B_STOP	1	22	OR
	B_STOP	1	23	OR
	B_STOP	1	30	ANDN
	B_STOP	1	51	LDR
	B_STOP	1	63	OR
	B_STOP	1	65	OR
	% 0. 0. 22	FP	1	3

Dirección	Símbolo	Sección	Líneas/Redes	Operador
%0.0.22	FP	1	48	ANDF
%0.0.23	DESACOPPLADA	1	9	AND
	DESACOPPLADA	1	30	AND
	DESACOPPLADA	1	38	LDN
	DESACOPPLADA	1	41	LDF
	DESACOPPLADA	1	50	ANDN
	DESACOPPLADA	1	51	ANDN
	DESACOPPLADA	1	52	ANDN
	DESACOPPLADA	1	56	LD
	DESACOPPLADA	1	58	AND
	DESACOPPLADA	1	59	LDN
	DESACOPPLADA	1	63	AND
	DESACOPPLADA	1	63	AND
%M0	ETAPA0	1	1	-- (S) --
	ETAPA0	1	2	-- (R) --
	ETAPA0	1	2	AND
	ETAPA0	1	9	-- (R) --
	ETAPA0	1	9	AND
	ETAPA0	1	31	-- (S) --
	ETAPA0	1	32	-- (S) --
	ETAPA0	1	64	LD
%M1	ETAPA1	1	2	-- (S) --
	ETAPA1	1	5	-- (R) --
	ETAPA1	1	5	AND
	ETAPA1	1	29	-- (S) --
	ETAPA1	1	30	-- (R) --
	ETAPA1	1	30	LD
%M2	ETAPA2	1	5	-- (S) --
	ETAPA2	1	6	-- (R) --
	ETAPA2	1	6	AND
	ETAPA2	1	25	LD
	ETAPA2	1	62	OR
%M3	ETAPA3	1	6	-- (S) --
	ETAPA3	1	8	-- (R) --
	ETAPA3	1	8	LD
	ETAPA3	1	62	OR
%M4	ETAPA4	1	5	-- (S) --
	ETAPA4	1	7	-- (R) --
	ETAPA4	1	7	AND
	ETAPA4	1	34	LD
	ETAPA4	1	35	LD
	ETAPA4	1	62	LD
%M5	ETAPA5	1	7	-- (S) --
	ETAPA5	1	8	-- (R) --
	ETAPA5	1	8	AND
	ETAPA5	1	62	OR
%M6	ETAPA6	1	8	-- (S) --
	ETAPA6	1	32	-- (R) --
	ETAPA6	1	32	LD
	ETAPA6	1	62	OR
%M7	ETAPA7	1	2	-- (R) --
	ETAPA7	1	9	-- (S) --
	ETAPA7	1	10	-- (R) --
	ETAPA7	1	10	AND
	ETAPA7	1	11	-- (R) --
	ETAPA7	1	11	AND
	ETAPA7	1	12	-- (R) --
	ETAPA7	1	12	AND
	ETAPA7	1	13	-- (R) --
	ETAPA7	1	13	AND
	ETAPA7	1	14	-- (R) --
	ETAPA7	1	14	AND

Dirección	Símbolo	Sección	Líneas/Redes	Operador
%M7	ETAPA7	1	15	-- (R) --
	ETAPA7	1	15	AND
	ETAPA7	1	16	-- (R) --
	ETAPA7	1	16	AND
	ETAPA7	1	29	-- (R) --
	ETAPA7	1	29	LD
	ETAPA7	1	30	-- (S) --
%M8	ETAPA8	1	10	-- (S) --
	ETAPA8	1	17	-- (R) --
	ETAPA8	1	17	AND
	ETAPA8	1	26	LD
	ETAPA8	1	33	LD
%M9	MARDUI NO	1	41	-- (S) --
	MARDUI NO	1	42	-- (S) --
	MARDUI NO	1	43	-- (S) --
	MARDUI NO	1	44	-- (S) --
	MARDUI NO	1	45	-- (S) --
	MARDUI NO	1	46	-- (S) --
	MARDUI NO	1	47	-- (S) --
	MARDUI NO	1	48	-- (S) --
	MARDUI NO	1	49	-- (S) --
	MARDUI NO	1	50	-- (S) --
	MARDUI NO	1	51	-- (S) --
	MARDUI NO	1	52	-- (S) --
	MARDUI NO	1	53	LD
	MARDUI NO	1	55	-- (R) --
%M10	ETAPA10	1	11	-- (S) --
	ETAPA10	1	18	-- (R) --
	ETAPA10	1	18	AND
	ETAPA10	1	24	LD
%M11	ETAPA11	1	1	ANDN
	ETAPA11	1	12	-- (S) --
	ETAPA11	1	19	-- (R) --
	ETAPA11	1	19	AND
%M12	ETAPA11	1	25	OR
	TEMP7	1	53	ST
	TEMP7	1	54	LD
%M13	TEMP7	1	55	LDF
	ETAPA13	1	1	ANDN
	ETAPA13	1	13	-- (S) --
	ETAPA13	1	20	-- (R) --
%M14	ETAPA13	1	20	AND
	ETAPA13	1	25	OR
	ETAPA14	1	1	ANDN
	ETAPA14	1	14	-- (S) --
	ETAPA14	1	21	-- (R) --
%M15	ETAPA14	1	21	AND
	ETAPA14	1	24	OR
	ETAPA15	1	1	ANDN
	ETAPA15	1	15	-- (S) --
	ETAPA15	1	22	-- (R) --
%M16	ETAPA15	1	22	AND
	ETAPA15	1	25	OR
	ETAPA16	1	1	ANDN
	ETAPA16	1	16	-- (S) --
	ETAPA16	1	23	-- (R) --
%M17	ETAPA16	1	23	AND
	ETAPA16	1	24	OR
	TEMP6	1	27	LD
	TEMP6	1	35	ST
%M18	TEMP5	1	17	LDF
	TEMP5	1	33	ST

Dirección	Símbolo	Sección	Líneas/Redes	Operador	
%M19	ETAPA19	1	1	ANDN	
	ETAPA19	1	17	-- (S) --	
	ETAPA19	1	18	-- (S) --	
	ETAPA19	1	19	-- (S) --	
	ETAPA19	1	20	-- (S) --	
	ETAPA19	1	21	-- (S) --	
	ETAPA19	1	22	-- (S) --	
	ETAPA19	1	23	-- (S) --	
	ETAPA19	1	31	-- (R) --	
	ETAPA19	1	31	LD	
%M20	ETAPA0REP	1	1	LD	
%M21	TEMP0	1	7	LD	
	TEMP0	1	34	ST	
%M22	TEMP1	1	36	LDF	
	TEMP1	1	39	ST	
%M23	TEMP2	1	37	ORF	
	TEMP2	1	40	ST	
%M24	MLR	1	28	LD	
	MLR	1	36	-- (R) --	
	MLR	1	37	-- (S) --	
	MLR	1	39	LDR	
	MLR	1	40	LD	
%M25	FALLA1	1	3	ST	
	FALLA1	1	4	LD	
%M26	FALLA2	1	4	ST	
	FALLA2	1	5	LD	
	FALLA2	1	37	AND(
	FALLA2	1	37	LDR	
	FALLA2	1	38	ANDN	
	FALLA2	1	56	ANDN	
	FALLA2	1	63	LD	
%M27	FALLA2	1	65	AND	
	I NLR2	1	37	OR	
	I NLR2	1	37	ORR	
	I NLR2	1	38	ST	
%M28	I NLR	1	5	-- (S) --	
	I NLR	1	32	-- (R) --	
	I NLR	1	37	OR	
	I NLR	1	56	ANDN	
%M29	FEM	1	18	OR	
	FEM	1	21	OR	
	FEM	1	23	OR	
	FEM	1	28	OR	
%M30	FEM	1	65	ST	
	DESBORDE1	1	64	ST	
	%M31	FV	1	4	OR
		FV	1	49	LDR
FV		1	65	OR	
%M32	FV	1	66	ST	
	ACVEL	1	56	AND	
	ACVEL	1	63	OR(N	
%M33	ACVEL	1	67	ST	
	PCERRADO	1	37	OR	
	PCERRADO	1	37	ORR	
	PCERRADO	1	56	ANDN	
%M34	PCERRADO	1	62	ST	
	PCERRADO	1	63	OR	
	MLV	1	57	-- (R) --	
%M4	MLV	1	58	-- (S) --	
	MLV	1	59	OR	
	MLV	1	60	LDR	
	MLV	1	61	LD	

Dirección	Símbolo	Sección	Líneas/Redes	Operador
%M5	TEMP3	1	57	LDF
	TEMP3	1	60	ST
%M6	TEMP4	1	58	LDF
	TEMP4	1	61	ST
%M7	MLV2	1	56	ST
	MLV2	1	58	AND
	MLV2	1	58	ORR
%Q. 0. 6	OAA	1	26	ST
%Q. 0. 7	OCA	1	27	ST
%Q. 0. 8	OAC	1	24	ST
%Q. 0. 9	CCC	1	25	ST
%Q. 0. 10	QLV	1	59	ST
%Q. 0. 11	QLR	1	28	ST
%Q. 0. 12	CRA	1	63	STN
%Q. 0. 13	QARDUI NO	1	54	ST
%TM0	TCD	1	34	BLK
%TM1	RESET_LR	1	39	BLK
%TM2	SET_LR	1	40	BLK
%TM3	RESET_LV	1	60	BLK
%TM4	SET_LV	1	61	BLK
%TM5	TAD	1	33	BLK
%TM6	TCD2	1	35	BLK
%TM7	TARDUI NO	1	53	BLK
%TM7. P	TARDUI NO. P	1	41	[:=]
	TARDUI NO. P	1	42	[:=]
	TARDUI NO. P	1	43	[:=]
	TARDUI NO. P	1	44	[:=]
	TARDUI NO. P	1	45	[:=]
	TARDUI NO. P	1	46	[:=]
	TARDUI NO. P	1	47	[:=]
	TARDUI NO. P	1	48	[:=]
	TARDUI NO. P	1	49	[:=]
	TARDUI NO. P	1	50	[:=]
	TARDUI NO. P	1	51	[:=]
	TARDUI NO. P	1	52	[:=]
%FC0		1	64	BLK
%FC0. V		1	3	OR([>]
		1	5	AND [>]
		1	28	AND([>]
		1	48	LD [>]
		1	66	LD [>]
		1	67	AND [<]
		1	67	LD [>]
%FC0. VD		1	65	LD [>]
F		1	64	LD
Q		1	33	LD
		1	34	LD
		1	35	LD
		1	39	LD
		1	40	LD
		1	53	LD
		1	60	LD
		1	61	LD
1		1	5	AND [>]
		1	28	AND([>]
		1	41	[:=]
		1	64	LD
2		1	42	[:=]
3		1	43	[:=]
4		1	44	[:=]
5		1	45	[:=]
6		1	46	[:=]

Dirección	Símbolo	Sección	Líneas/Redes	Operador
7		1	47	[:=]
8		1	48	[:=]
9		1	49	[:=]
10		1	50	[:=]
11		1	3	OR([>]
		1	48	LD [>]
		1	51	[:=]
		1	65	LD [>]
12		1	52	[:=]
19		1	67	LD [>]
21		1	67	AND [<]
22		1	66	LD [>]

A.3. Protocolo de pruebas del sistema de detención automático

A.3.1. Verificación de energía de respaldo

- Verificar que no hay indicación de falla sobre el cargador automático.
- Verificar que la UPS se encuentra cargada.

A.3.2. Encendido del sistema

- Cambiar el estado del interruptor Q0 de apagado a encendido.
- Cambiar el estado del interruptor Q1 de apagado a encendido.
- Esperar el establecimiento del PLC en modo RUN.
- Cambiar el estado del interruptor Q2 de apagado a encendido.

A.3.3. Estado del sistema “Modo manual”

Pasos preliminares

- Verificar que el sistema no se encuentra en modo espera o modo secuencia de detención.
- Verificar que la máquina no se encuentra acoplada.
- Seleccionar el control manual del sistema.

Pruebas

Mantener el selector de control de la válvula principal en estado de cierre

Resultado esperado:

- Provoca el cierre de la válvula principal.
- Deshabilita el botón del gobernador.
- Deshabilita el botón del reseteo.

Hasta que:

- Se cierre completamente la válvula principal (activación del sensor límite inferior).
 - Hasta que se suelte el selector.
 - Se cambie el selector de manual a automático.
 - Se presione el botón de paro de emergencia.
-

Presionar el botón de reseteo y luego activar el selector de cierre de válvula principal

Resultado esperado:

- Provoca el cierre memorizado de la válvula principal.
- Deshabilita el botón del gobernador.
- Deshabilita el botón del reseteo.

Hasta que:

- Se cierre completamente la válvula principal (activación del sensor límite inferior).
 - Hasta que se active el selector a estado de apertura de la válvula.
 - Se cambie el selector de manual a automático.
 - Se presione el botón de paro de emergencia.
-

Mantener el selector de control de la válvula principal en estado de apertura

Resultado esperado:

- Provoca la apertura de la válvula principal.
- Deshabilita el botón del gobernador.
- Deshabilita el botón del reseteo.

Hasta que:

- Se abra completamente la válvula principal (activación del sensor límite superior).
 - Hasta que se suelte el selector.
 - Se cambie el selector de manual a automático.
 - Se presione el botón de paro de emergencia.
-

Presionar el botón de reseteo y luego activar el selector de apertura de válvula principal

Resultado esperado:

- Provoca la apertura memorizada de la válvula principal.
- Deshabilita el botón del gobernador.
- Deshabilita el botón del reseteo.

Hasta que:

- Se abra completamente la válvula principal (activación del sensor límite superior).
 - Hasta que se active el selector en estado de cierre de la válvula.
 - Se cambie el selector de manual a automático.
 - Se presione el botón de paro de emergencia.
-

Mantener el botón de accionamiento del gobernador

Resultado esperado:

- Provoca la iluminación del mismo botón.
- Provoca la apertura del distribuidor.
- Deshabilita las funciones de los botones de control de la válvula principal.
- Deshabilita el botón de reseteo.

Hasta que:

- Transcurra un lapso de 100 ms después de la activación del botón.
 - Se cambie el selector de manual a automático.
-

- Se presione el botón de paro de emergencia.
-

Activar el botón de reseteo

Resultado esperado:

- Ninguna acción.
-

Activar el botón de acoplamiento de la planta

Resultado esperado:

- Ninguna acción.
-

Fallas de indicación

- Temperatura en el cojinete de soporte
- Temperatura en el cojinete de tope
- Sobre corriente
- Sobre velocidad
- Paro de emergencia
- Desconexión de la red a más de 660 rpm
- Presión a más de 660 rpm
- Sobre/Baja frecuencia a más de 660 rpm
- Sobre/Baja tensión a más de 660 rpm
- Potencia inversa a más de 660 rpm

Resultado esperado:

- Activa luz roja fija.
-

Velocidad menor a 1140 rpm

Resultado esperado:

- No permite acoplar la planta.
-

A.3.4. Estado del sistema “modo automático/no acoplado”

Pasos preliminares

- Verificar que el sistema no se encuentra en modo espera o modo secuencia de detención.
- Verificar que la máquina no se encuentra acoplada.
- Seleccionar el control automático del sistema.

Pruebas

Seleccionar el control manual del sistema

Resultado esperado:

- Provoca que la máquina entre a modo manual.
-

Presionar el botón de reseteo

Resultado esperado:

- Ninguna acción.
-

Presionar el botón de accionamiento del gobernador

Resultado esperado:

- Ninguna acción.
-

Mantener el selector de control de válvula principal en estado de apertura

Resultado esperado:

- Ninguna acción.
-

Mantener el selector de control de válvula principal en estado de cierre

Resultado esperado:

- Ninguna acción.
-

Fallas críticas

- Potencia inversa.
- Sobre/baja tensión.
- Sobre/baja frecuencia.
- Sobrecorriente.
- Temperatura en cojinete de soporte.
- Temperatura en cojinete de tope.
- Botón paro de emergencia.
- Presión.
- Velocidad.

Resultado esperado:

- Activa secuencia de detención automática.
 - Activa luz roja parpadeante.
-

Velocidad de operación entre 1140 rpm y 1260 rpm

Resultado esperado:

- Activación de la luz verde de acople a la red parpadeante.
-

Presionar el botón de acople

Resultado esperado:

- Acopla la planta siempre y cuando la velocidad de operación se encuentre entre 1140 rpm y 1260 rpm.
-

A.3.5. Estado del sistema “modo automático/acoplado”

Pasos preliminares

- Verificar que el sistema no se encuentra en modo espera o modo secuencia de detención.
- Verificar que la máquina no se encuentra acoplada.
- Seleccionar el control manual del sistema y ubicar la planta en la velocidad de acople (entre 1140 rpm a 1260 rpm).
- Esperar por la luz verde intermitente de acople a la red.
- Presionar el botón de acople.
- Esperar por la luz verde fija de acople a la red.

Pruebas

Verificar que se:

- Deshabilita el botón de reseteo.
 - Deshabilita el botón de accionamiento del gobernador.
 - Deshabilita el selector de apertura de la válvula principal.
 - Deshabilita el selector de cierre de la válvula principal.
-

Seleccionar el control manual del sistema

Resultado esperado:

- Enciende la luz roja parpadeante hasta que se regrese a automático.
-

Fallas críticas

- Potencia inversa.
- Sobre/baja tensión.
- Sobre/baja frecuencia.
- Sobre corriente.
- Temperatura en cojinete de soporte.
- Temperatura en cojinete de tope.
- Botón paro de emergencia.
- Presión.
- Velocidad.

Resultado esperado:

- Activa secuencia de detención automática.
 - Activa luz roja parpadeante.
-

Botón de desacoplar

Resultado esperado:

- Desacopla la planta ubicándola en modo automático/no acoplado.
-

A.3.6. Estado del sistema “modo secuencia de detención”

Pruebas

- Activa luz roja parpadeante.
 - Desacopla la planta.
 - Deshabilita botón de acople de la planta.
 - Deshabilita el botón de reseteo.
 - Deshabilita el botón de accionamiento del gobernador.
 - Deshabilita el selector de apertura de la válvula principal.
 - Deshabilita el selector de cierre de la válvula principal.
 - Deshabilita el selector de cierre de la válvula principal.
 - Deshabilita el selector de modo de operación (automático/manual).
 - Después de 7 s acciona el cierre del distribuidor por 100 ms.
 - Acciona el cierre de la válvula principal hasta que se active el sensor límite superior.
-

A.3.7. Estado del sistema “modo de falla”

Al finalizar el modo secuencia de detención se entra a modo de espera, verificando que:

- Activa luz roja parpadeante.
 - Desacopla la planta.
 - Deshabilita botón de acople de la planta.
 - Deshabilita el botón de accionamiento del gobernador.
 - Deshabilita el selector de apertura de la válvula principal.
 - Deshabilita el selector de cierre de la válvula principal.
 - Deshabilita el selector de cierre de la válvula principal.
 - Deshabilita el selector de modo de operación (automático/manual).
-

Botón de reseteo

Resultado esperado:

- Desactiva luz roja parpadeante.
 - Ingresa al modo anterior de manera desacoplada.
-

A.3.8. Alimentación de respaldo

Desconectar interruptor Q0 para simular una desconexión de la energía principal

Resultado esperado:

- El sistema de control continúa operando normalmente hasta agotar la carga de la batería.
-

A.3.9. Desconexión inmediata del panel y reanudación

Desconectar interruptor Q0 y Q1 para simular una desconexión de energía principal y descarga completa de la batería.

Resultado esperado:

- El sistema de control se apaga.

Conectar interruptor Q0 y Q1 para simular una reanudación de la energía principal y de respaldo.

Resultado esperado:

- El sistema de control inicia su operación.

A.3.10. Descripción de las luces del panel

- Activación de apertura del distribuidor, verde mantenida.
- Presencia de falla, roja mantenida.
- Modo de falla, roja intermitente.
- Estado de detención automática, roja intermitente.
- Planta acoplada, verde mantenida.
- Posibilidad de acoplar planta, verde parpadeante.

A.4. Manual de funcionamiento del sistema de detención automático

A.4.4. Modo manual

Descripción

En este modo el operador podrá manipular de forma manual el cierre o apertura de la válvula principal, abrir el distribuidor o generar un evento de paro de emergencia.

Además, se cuenta con un sistema de protección automático en el cual se toma en consideración las fallas por sobrecorriente, temperatura mayor a 45 °C en el cojinete de soporte, temperatura mayor a 45 °C en el cojinete de tope, por velocidad mayor a las 1380 rpm y falla por presión a más de 660 rpm (ir a A.4.3.). Al ocurrir una de estas fallas, el sistema de control impide la apertura de la válvula principal, solamente permite el cierre de esta, además la luz roja se enciende de forma fija.

Establecimiento del modo manual

1. Verificar que la planta no se encuentra en modo de secuencia de detención; caso contrario ir a A.4.7..
2. Verificar que la planta no se encuentra en modo de falla; caso contrario ir a A.4.8..
3. Verificar que la planta esté desacoplada.
4. Establecer el selector en modo manual.

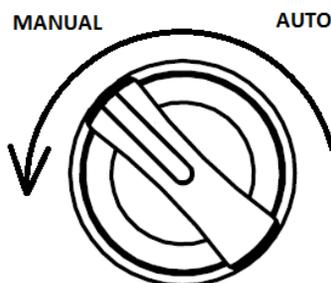


Figura A. 1. Establecimiento del selector en modo manual (Fuente: Diseño propio en Paint).

Funciones:



Figura A. 2. Apertura del distribuidor (Fuente: Diseño propio en Paint).

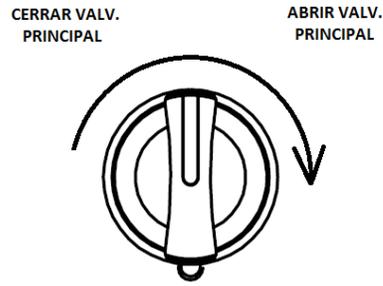


Figura A. 3. Apertura de válvula de principal (Fuente: Diseño de ingeniería).

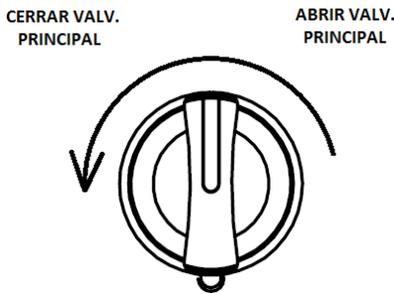


Figura A. 4. Cierre de válvula principal (Fuente: Diseño propio en Paint).

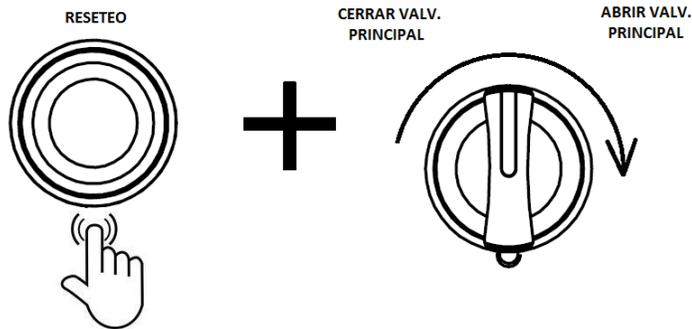


Figura A. 5. Apertura memorizada de válvula principal (Fuente: Diseño propio en Paint).

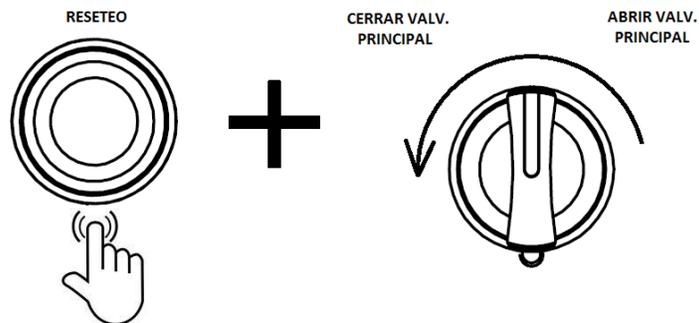


Figura A. 6. Cierre memorizado de válvula principal (Fuente: Diseño propio en Paint).

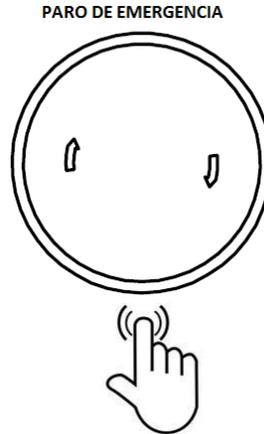


Figura A. 7. Paro de emergencia (Diseño propio en Paint).

A.4.5. Modo automático, planta desacoplada

Descripción

En el funcionamiento de moto automático, si se genera un fallo (ir a A.4.3.) la planta inicia el proceso de detención automática (ir a A.4.7.).

Establecimiento del modo automático, planta desacoplada

1. Verificar que la planta no se encuentra en modo de secuencia de detención (ir a A.4.7.).
2. Verificar que la planta no se encuentra en modo de falla (ir A.4.8).
3. Si la planta está en modo manual, ubicar el selector en modo automático.

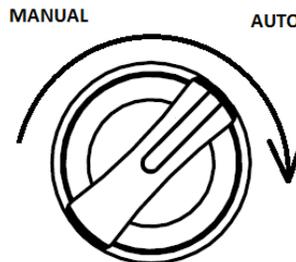


Figura A. 8. Establecimiento del selector en modo automático (Fuente: Diseño propio en Paint).

Funciones

- Posibilidad de acople de la planta (ir a A.4.10.).
- Paro de emergencia (Figura A. 7).

A.4.6. Modo automático, planta acoplada

Descripción

En el funcionamiento de moto automático, si se genera un fallo (ir a A.4.3.) la planta inicia el proceso de detención automática (ir a A.4.7.).

Establecimiento del modo automático, planta acoplada

1. Verificar que la planta no se encuentra en modo de secuencia de detención; caso contrario ir a A.4.7..
2. Verificar que la planta no se encuentra en modo de falla (ir a A.4.8.).
3. Verificar que la planta esté en modo automático y desacoplada (ir a A.4.5.).
4. Calibrar la velocidad de la planta en un rango entre 1140 rpm y 1260 rpm.
5. Esperar a que el indicador de luz verde “acople a la red” se encienda de forma intermitente.
6. Presionar el botón de acople; la luz de “acople a la red” cambiará a un estado de iluminación fija.



Figura A. 9. Botón de acople a la red (Fuente: Diseño propio en Paint).

Funciones

- Posibilidad de desacople de la planta.
- Paro de emergencia (Figura A. 7).

A.4.7. Modo secuencia de detención

Cuando se encuentra en este modo, el operador no puede ejecutar ninguna acción.

En esta etapa se acciona automáticamente el cierre del distribuidor y de la válvula principal; y termina hasta que el sensor límite superior sea accionado y hasta que haya terminado el tiempo de cierre del distribuidor.

A.4.8. Modo de falla

Cuando se encuentra en este modo, el operador no puede ejecutar ninguna acción hasta que se presione el botón de reseteo (el indicador de color rojo de este botón se encuentra parpadeando), pasando a un estado seguro (automático desacoplado o modo manual). En este punto, es de gran importancia que el operario analice la falla ocurrida antes de salir de este modo.



Figura A. 10. Botón de reseteo (Fuente: Diseño propio en Paint).

A.4.9. Informe remoto de falla

El informe remoto consiste en un módulo que emite un mensaje a una plataforma web llamada Carriots; esta plataforma archiva el mensaje e instantáneamente envía un correo electrónico a los encargados de la planta informando el tipo de falla y la fecha/hora que ocurrió el evento.

Dicha plataforma podrá ser accedida por el personal de O&M Eléctrica Matamoros con el fin de llevar un histórico acerca del tipo de falla, la fecha y hora de cada evento.

Para acceder a la página web se debe seguir los siguientes pasos:

- Ingresar a <https://www.carriots.com>.
- En la parte superior derecha ingresas los datos de usuario y contraseña.
- Ingresar haciendo click sobre la flecha.



Figura A. 11. Interfaz de acceso a la página web (Fuente: Carriots).

Para ver el histórico de fallas ir al menú ubicado a la izquierda de la pantalla, luego acceder “gestión de datos” y luego hacer click en “tramas de datos”.



Figura A. 12. Interfaz de acceso al historial (Fuente: Carriots).

El historial se mostrará en forma de tabla en la parte central de la pantalla, mostrando la fecha y hora del evento, el dispositivo que emitió la alarma y finalmente el tipo de falla ocurrida.

at	dispositivo	data	Acciones
02/08/2015 10:33:58	ARDUINO@LaRebeca.LaRebeca	('ADVERTENCIA':Falla por temperatura)	Acciones
02/08/2015 10:29:26	ARDUINO@LaRebeca.LaRebeca	('ADVERTENCIA':Falla por temperatura)	Acciones
02/08/2015 10:29:15	ARDUINO@LaRebeca.LaRebeca	('ADVERTENCIA':Falla por temperatura)	Acciones
02/08/2015 10:24:30	ARDUINO@LaRebeca.LaRebeca	('ADVERTENCIA':Falla por temperatura)	Acciones
02/08/2015 10:23:18	ARDUINO@LaRebeca.LaRebeca	('ADVERTENCIA':Falla por temperatura)	Acciones
02/08/2015 10:23:05	ARDUINO@LaRebeca.LaRebeca	('ADVERTENCIA':Falla por temperatura)	Acciones
02/08/2015 10:22:54	ARDUINO@LaRebeca.LaRebeca	('ADVERTENCIA':Falla por temperatura)	Acciones
02/08/2015 10:22:43	ARDUINO@LaRebeca.LaRebeca	('ADVERTENCIA':Falla por temperatura)	Acciones
02/08/2015 10:22:33	ARDUINO@LaRebeca.LaRebeca	('ADVERTENCIA':Falla por temperatura)	Acciones
02/08/2015 10:22:22	ARDUINO@LaRebeca.LaRebeca	('ADVERTENCIA':Falla por temperatura)	Acciones

< Anterior | 1 2 3 4 5 6 | Siguiente > Resultados | 51

Figura A. 13. Historial de eventos (Fuente: Carriots).

A.4.10. Protocolo de acople de la planta.

1. Verificar que la planta no se encuentra en modo de secuencia de detención (ir a A.4.7.).
2. Verificar que la planta no se encuentra en modo de falla (ir a A.4.8.).
3. Establecer la planta a modo manual (ir a A.4.4.).
4. Abrir la válvula principal completamente (Figura A. 3).
5. Calibrar la velocidad de la planta en el rango de 1140 rpm a 1260 rpm.
6. Calibrar la frecuencia y tensión de la energía.
7. Ubicar el selector a modo automático (Figura A. 8).
8. Esperar a que el indicador de acople a la red se encienda de forma intermitente.
9. Presionar el botón de acople; la luz de acople a la red cambiará a un estado de iluminación fija (Figura A. 9).

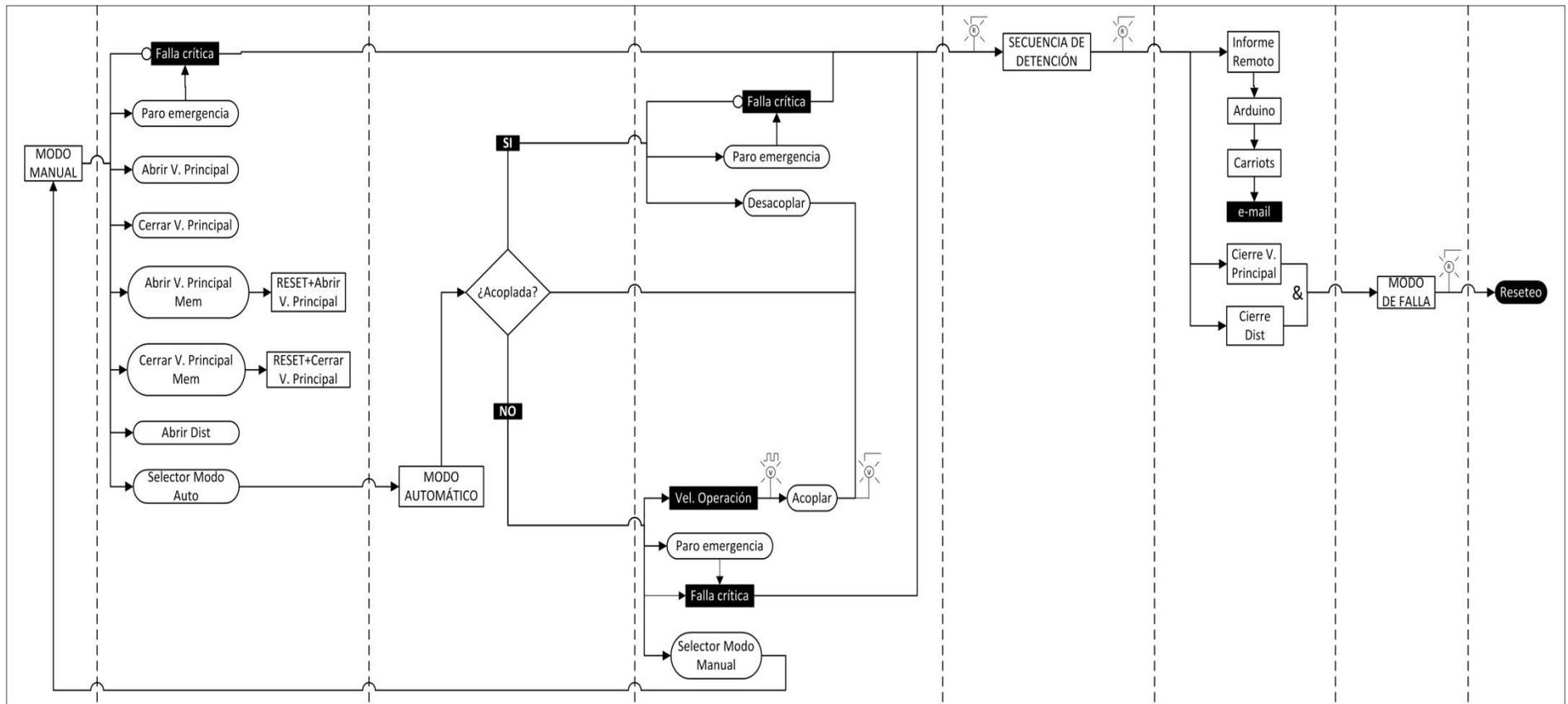


Figura A. 14. Resumen gráfico del funcionamiento del sistema de detención automático (Fuente: Diseño de ingeniería).

A.5. Cálculo del compensador de adelanto del control automático de frecuencia.

El primer paso consiste en seleccionar un polo dominante que se encargue de cumplir con las características de diseño de un sobreimpulso menor al 3% y un tiempo de estabilización no mayor a 2 segundos.

Se selecciona un polo al azar y se itera hasta obtener un controlador que brinde al sistema las características solicitadas; de manera que el polo obtenido de la iteración es el siguiente:

$$s_2 = -2.5 + 1.5j$$

Realizando la comprobación por medio del cálculo del compensador de adelanto mediante el método de la bisectriz:

$$\theta = 180 - \text{angulo} \left(\frac{1.5}{2.5} \right)$$

$$\theta = 30.9638^\circ$$

$$\varphi = 180 - \text{angulo} \left(\frac{77}{17.93 * (-2.5 + 1.5j)^2 + 27 * (-2.5 + 1.5j)} \right)$$

$$\varphi = 92.5684$$

$$p_0 = -|-2.5 + 1.5j| \cdot \frac{\cos\left(\frac{30.9638 - 92.5684}{2}\right)}{\cos\left(\frac{30.9638 + 92.5684}{2}\right)}$$

$$p_0 = -5.2935$$

$$z_0 = -|-2.5 + 1.5j| \cdot \frac{\cos\left(\frac{30.9638 + 92.5684}{2}\right)}{\cos\left(\frac{30.9638 - 92.5684}{2}\right)}$$

$$z_0 = -1.6057$$

$$k_c = \frac{1}{\left| \frac{(-2.5 + 1.5j) + 1.606}{(-2.5 + 1.5j) + 5.294} \cdot \frac{77}{17.93 * (-2.5 + 1.5j)^2 + 27 * (-2.5 + 1.5j)} \right|}$$

$$k_c = 3.2327$$

$$K_{lead} = 3.2327 \cdot \frac{s + 1.606}{s + 5.294}$$

A.6. Cálculo del regulador PID para el control automático de tensión.

A.6.1. Compensador de atraso

Se agrega un polo en el origen con el fin de eliminar el error en estado estable, y al mismo tiempo, se añade un cero a la derecha del polo más alejado del origen con el fin de reducir el sobreimpulso y el tiempo de estabilización aumentados por el efecto de incluir un polo en el origen

Como criterio de diseño, el cero s_1 se ubica al 95% del polo más alejado del origen de la función de transferencia:

$$s_1 = 0.95 * -4.863$$

$$s_1 = -4.6203$$

Obteniendo como resultado el controlador:

$$Klag = \frac{s + 4.6203}{s}$$

A.6.2. Compensador de adelanto

Se selecciona un polo al azar y se itera hasta obtener un controlador que brinde al sistema las características solicitadas; de manera que el polo que se obtiene de la iteración es el siguiente:

$$s_2 = -26.5 + 1.5j$$

Realizando la comprobación por medio del cálculo del compensador de adelanto mediante el método de la bisectriz:

$$\theta = 180 - \text{angulo}(-26.5 + 1.5j)$$

$$\theta = 3.2397^\circ$$

$$\varphi = 180 - \text{angulo}\left(\frac{19.05}{(-26.5 + 1.5j) + 4.863}\right)$$

$$\varphi = 356.0342^\circ$$

$$p_0 = -|-26.5 + 1.5j| \cdot \frac{\cos\left(\frac{3.2397 - 356.0342}{2}\right)}{\cos\left(\frac{3.2397 + 356.0342}{2}\right)}$$

$$p_0 = -26.4905$$

$$z_0 = -|-26.5 + 1.5j| \cdot \frac{\cos\left(\frac{3.2397 + 356.0342}{2}\right)}{\cos\left(\frac{3.2397 - 356.0342}{2}\right)}$$

$$z_0 = 26.5944$$

$$k_c = \frac{1}{\left| \frac{(-26.5 + 1.5j) + 26.5944}{(-26.5 + 1.5j) + 26.4905} \cdot \frac{19.05}{(-26.5 + 1.5j) + 4.863} \right|}$$

$$k_c = 1.1361$$

$$Klead = 1.1361 \cdot \frac{s + 26.5944}{s + 26.4905}$$

A.7. Información sobre la empresa

A.7.1. Descripción de la empresa

O&M Eléctrica Matamoros es una empresa dedicada al montaje, operación y mantenimiento de centrales hidroeléctricas mediante prácticas seguras, eficientes y siempre preocupado por la protección del medio ambiente. Esta empresa ha trabajado en proyectos del sector hidroeléctrico tanto en el ámbito nacional como a nivel internacional en países tales como México, Guatemala, Nicaragua, Chile y Perú, por lo que se refleja su alta confiabilidad en los temas descritos anteriormente.

A.7.2. Misión

“Brindar con nuestra experiencia, servicios de operación, mantenimiento y montaje de centrales de generación eléctrica y otros servicios afines, bajo normas de calidad, eficiencia y seguridad internacionales, en armonía con el ambiente” (O&M Eléctrica Matamoros).

A.7.3. Visión

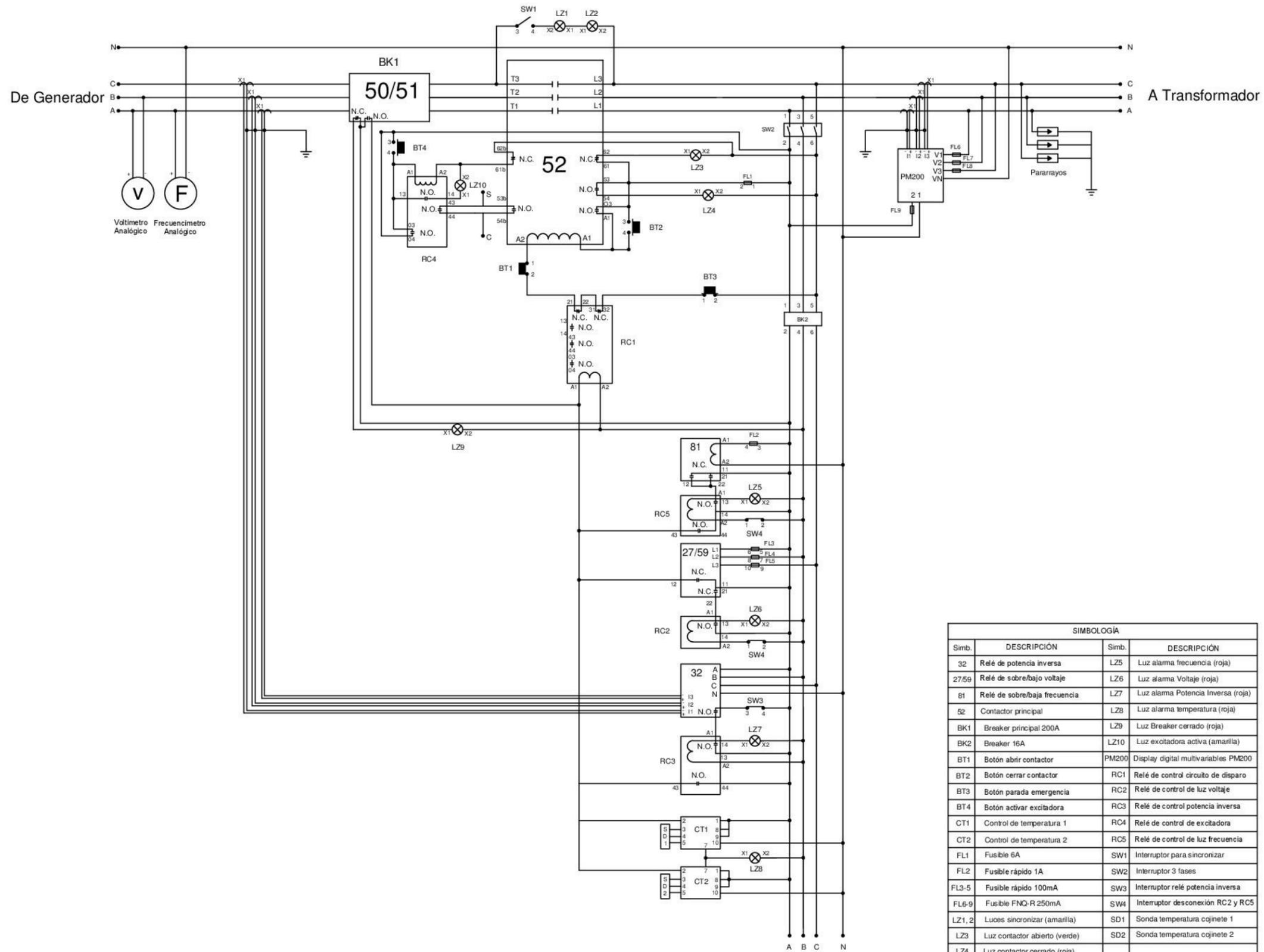
“Ser líderes de operación, mantenimiento y servicios afines de centrales de generación eléctrica en Centroamérica, con una sólida presencia a nivel Latinoamericano en proyectos de instalación y montaje” (O&M Eléctrica Matamoros).

A.7.4. Antecedentes prácticos

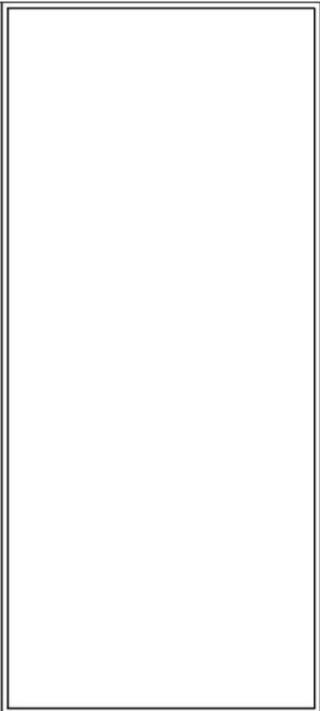
Actualmente, O&M Eléctrica Matamoros, en conjunto con ENCOsys, una empresa de carácter francés, se ha encargado de la modernización de proyectos hidroeléctricos en relación a monitoreo de fallas, regulación automática de velocidad de la turbina y control automático de la tensión generada. Algunas de las centrales más significativas involucradas en varios de estos procesos de automatización son Doña Julia, ubicada en Puerto Viejo de Sarapiquí, la cual cuenta con una capacidad de 18.5MW y la central hidroeléctrica Platanar con una capacidad de 16MW. En estos proyectos se han desarrollado sistemas que involucran la instalación de sensores y actuadores que permiten controlar las variables de generación eléctrica de una forma más eficaz. Además, se han implementado sistemas SCADA que brindan un entorno más amigable a los operadores de las centrales, generando a su vez históricos de variables críticas en las operaciones de mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo.

B. Anexos

B.1. Plano original del panel de potencia



SIMBOLOGÍA			
Simb.	DESCRIPCIÓN	Simb.	DESCRIPCIÓN
32	Relé de potencia inversa	LZ5	Luz alarma frecuencia (roja)
27/59	Relé de sobre/bajo voltaje	LZ6	Luz alarma Voltaje (roja)
81	Relé de sobre/baja frecuencia	LZ7	Luz alarma Potencia Inversa (roja)
52	Contactor principal	LZ8	Luz alarma temperatura (roja)
BK1	Breaker principal 200A	LZ9	Luz Breaker cerrado (roja)
BK2	Breaker 16A	LZ10	Luz excitadora activa (amarilla)
BT1	Botón abrir contactor	PM200	Display digital multivariables PM200
BT2	Botón cerrar contactor	RC1	Relé de control circuito de disparo
BT3	Botón parada emergencia	RC2	Relé de control de luz voltaje
BT4	Botón activar excitadora	RC3	Relé de control potencia inversa
CT1	Control de temperatura 1	RC4	Relé de control de excitadora
CT2	Control de temperatura 2	RC5	Relé de control de luz frecuencia
FL1	Fusible 6A	SW1	Interruptor para sincronizar
FL2	Fusible rápido 1A	SW2	Interruptor 3 fases
FL3-5	Fusible rápido 100mA	SW3	Interruptor relé potencia inversa
FL6-9	Fusible FNQ-R 250mA	SW4	Interruptor desconexión RC2 y RC5
LZ1, 2	Luces sincronizar (amarilla)	SD1	Sonda temperatura cajinete 1
LZ3	Luz contactor abierto (verde)	SD2	Sonda temperatura cajinete 2
LZ4	Luz contactor cerrado (roja)		



PROYECTO: PH REBECA II
 AREA:

PROPIETARIO: REBECCA ALFARO
 CEDULA:

PROVINCIA	CANTÓN	DISTRITO
01 SAN JOSE		

INGENIERO: DANIEL LÓPEZ MARIN
 Nº REG:

DIBUJANTE: ISAAC CRUZ MENA

PROFESIONAL RESPONSABLE
 DIRECCION TÉCNICA
 NOMBRE: ISMAEL LÓPEZ JIMÉNEZ
 FIRMA: Nº REG:

PROFESIONAL RESPONSABLE
 DISEÑO ESTRUCTURAL
 NOMBRE:
 FIRMA: Nº REG:

INFORMACIÓN REGISTRO PÚBLICO
 PROPIETARIO:
 Nº CATASTRO:
 FOLIO REAL:

CONTENIDO:
 DIAGRAMA ALAMBRADO

ESCALA	FECHA	LÁMINA
INDICADAS	DIC 2011	1 DE 1

7. Referencias bibliográficas

- [1] *Cross reference guide for AWG (American Wire Gauge) to mm2*. (2001). Recuperado el 27 de Julio de 2015, de MARYLAND METRICS:
<http://mdmetric.com/elect/straintech.pdf>
- [2] *Sinking vs. Sourcing*. (2010). Recuperado el 25 de Julio de 2015, de Motion Engineering: http://support.motioneng.com/hardware/io/slice-io/topic_sink_source.htm
- [3] *American Wire Gauge (AWG) Cable / Conductor Sizes*. (11 de Setiembre de 2011). Recuperado el 27 de Julio de 2015, de DIY Audio Projects:
<http://diyaudioprojects.com/Technical/American-Wire-Gauge/>
- [4] *Sink/Source*. (16 de Abril de 2014). Recuperado el 25 de Julio de 2015, de AUTOMATION DIRECT:
<https://www.automationdirect.com/static/specs/sinksource.pdf>
- [5] *What Is the Difference Between the Terms Sinking and Sourcing?* (2014). Recuperado el 25 de Julio de 2015, de National Instruments:
<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/A10122C63A7F5CFE86256B4C007491DD>
- [6] *Wire Gauge and Current Limits*. (2015). Recuperado el 27 de Julio de 2015, de Earth Observing Laboratory:
https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isff/LOCAL_access_only/Wire_Size.htm
- [7] Basler Electric. (2015). *Automatic Voltage Regulator Selection Chart*. Recuperado el 26 de Setiembre de 2015, de Basler Electric:
<https://www.basler.com/ResourceDownload.aspx?id=124>
- [8] Bin Ng, T., Walker, G., & Sargison, J. (Diciembre de 2004). *Modelling of Transient Behaviour in a Francis Turbine Power Plant*. Recuperado el 17 de Setiembre de 2015
- [9] Castaño, C., Giraldo, E., Ortiz, R., & Bernal, A. (s.f.). *Automatización y control de un sistema de generación hidroeléctrico didáctico y modular*. Recuperado el 26 de Junio de 2015, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9372/1/P24.pdf>
- [10] *Current Carrying Capacity of Cables*. (s.f.). Recuperado el 27 de Julio de 2015, de ELECSA: <http://www.elecsa.co.uk/Technical-Library/Wiring-Regulations/Inspection-and-Testing/Current-Carrying-Capacity-of-Cables.aspx>
- [11] Dorf, R., & Bishop, R. (2008). *Modern Control Systems*. Singapore: Pearson Prentice Hall.
- [12] Exide Technologies. (2014). *How to Select, Install and Maintain a Marine Battery*. Recuperado el 03 de Agosto de 2015, de EXIDE:
<http://www.exide.com/Media/files/Downloads/TransAmer/Transportation%20Americas%20Brochures%20for%20Download/Nautilus%20Marine%20Brochure%202011-14.pdf>

- [13] Fernández Díez , P. (13 de Enero de 2014). *Turbínas Hidráulicas*. Recuperado el 16 de Setiembre de 2015, de Facultad de Ingeniería:
http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf
- [14] García Vicente, J. F. (s.f.). *Prefijos numéricos*. Recuperado el 12 de Setiembre de 2015, de Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado: http://platea.pntic.mec.es/jfgarcia/dudas_ortograficas/prefijos.pdf
- [15] Instituto Nacional de Aprendizaje. (1997). Generadores de corriente continua. En *Máquinas Eléctricas* (págs. 77-89). San José.
- [16] (1994). Prime Movers and Energy Supply Systems. En P. Kundur, *Power System Stability and Control* (págs. 377-418). McGraw-Hill, Inc.
- [17] Lleó , A., & Lleó, L. (13 de Setiembre de 2007). *Gran manual de magnitudes físicas y sus unidades*. Recuperado el 09 de Setiembre de 2015, de Ediciones Díaz de Santos: <http://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479787677.pdf>
- [18] MCRHidro. (s.f.).
Sistema de Monitorización y Control del Rendimiento de Centrales Hidroeléctricas. Recuperado el 25 de Junio de 2015, de SIN AIS:
<http://www.sinais.es/Hoja%20de%20especificaciones%20MCRHidro.pdf>
- [19] O&M Eléctrica Matamoros. (s.f.). *O&M Eléctrica Matamoros*. Recuperado el 15 de Setiembre de 2015, de <http://www.electricamatamoros.com>
- [20] OMRON. (2008). *MOUSER*. Recuperado el 29 de Julio de 2015, de Cylindrical Proximity Sensor E2A: http://www.mouser.com/ds/2/307/e2a_dsheets_d100-e1-01b-349137.pdf
- [21] Rashid, M. (2004). *Electrónica de Potencia*. México: Pearson Educación.
- [22] Rivera Chávez, E. (10 de Mayo de 2010). *TURBINAS DE REACCIÓN*. Recuperado el 05 de Setiembre de 2015, de Universidad Técnica de Ururo:
http://docentes.uto.edu.bo/eriverac/wp-content/uploads/turbinas_de_reacci%C3%B3n.pdf
- [23] Shigley, J. E., Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica*. México: Mc Graw Hill.
- [24] Suay Belenguer, J. M. (2015). *Apéndice IV. Ecuación de Euler de las turbobombas*. Recuperado el 28 de Setiembre de 2015, de Oil Production.net:
http://www.oilproduction.net/cms3/files/euler_turbobombas.pdf
- [25] Telemecanique. (Abril de 2000). *XML-F Telemecanique*. Recuperado el 28 de Julio de 2015, de Schneider Electric: <http://static.schneider-electric.us/docs/Machine%20Control/Pressure-Float-Vacuum%20Switches/Pressure%20Switches-Industrial/XML/W916340040111A02.pdf>
- [26] Wildi, T. (2007). *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. México: PEARSON EDUCACIÓN.