

Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.  
Facultad de Ingeniería Eléctrica.  
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales.



Trabajo de Diploma



**Diseño del sistema de control para el arranque y protección de la turbina de contrapresión del central "Elpidio Gómez"**

Autor: Fidel Benítez Hidalgo



Tutores: Dr.C José Rafael Abreu García  
Ing. Guillermo Artílez Jaramillo.

Santa Clara  
2015

"Año 57 de la Revolución"

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Automática y Sistemas Computacionales**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Diseño del sistema de control para el arranque y  
protección de la turbina de contrapresión del central  
“Elpidio Gómez”**

**Autor: Fidel Benítez Hidalgo**

E-mail: [fbenitez@uclv.edu.cu](mailto:fbenitez@uclv.edu.cu)

**Tutores: Dr. C. José Rafael Abreu García**

Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV

E-mail: [abreu@uclv.edu.cu](mailto:abreu@uclv.edu.cu)

**Ing. Guillermo Artílez Jaramillo**

Dpto. de Proyecto y Puesta en Marcha. ZETI Villa Clara

E-mail: [guillermo.artilez@zetivc.azcuba.cu](mailto:guillermo.artilez@zetivc.azcuba.cu)

**Santa Clara**

**2015**

**"Año 57 de la Revolución"**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## PENSAMIENTO

*“Hay quien observa la realidad así como es, y se pregunta por qué, y hay quien imagina la realidad como nunca ha sido, y se pregunta por qué no.”*

*George Bernard Shaw*

## DEDICATORIA

*A Nany por ser la esencia,  
disfruta el premio mayor.  
A Elizabeth por tanto amor.  
A Pipo por la paciencia.  
Para conquistar la ciencia,  
ningún esfuerzo es pequeño.  
Cada cual puso su empeño,  
cada cual a su manera,  
para que al final pudiera  
hacer realidad mi sueño.*

## AGRADECIMIENTOS

***“... El verdadero agradecimiento es aquel que no se puede expresar con palabras; pero que constituye el compromiso callado y firme de todo hombre en devolver a otro el bien recibido. ”***

El mayor agradecimiento a mis padres, sin los cuales no hubiera podido alcanzar tantas metas en mi vida y por la educación, que de ellos, he recibido. A Elizabeth por su apoyo y comprensión durante estos cinco años, sin ella todo hubiese sido más difícil.

A mi hermano por ser mi mejor amigo. A mi tía Laly y a mis primos Claudia y Eduardito por estar ahí siempre incondicionalmente. A mis abuelos, en especial a Dora la cual ha puesto toda su fe en mí. A mis suegros los cuales me han acogido como un hijo más.

A todos los profesores del departamento de Automática y Sistemas Computacionales por haberme formado como profesional, en especial al profesor Izaguirre por su ayuda durante la enfermedad del profesor Abreu (para quien quisiera una pronta recuperación). A mis tutores, guías importantes en el desarrollo de este trabajo de diploma, al Guille, muchas gracias.

A mis amigos, los de siempre y los que hice durante este trayecto: Tatico, Keincy, Raidán, Jorge, Sami, Obrayan, Kiki y Dany.

A todos aquellos que de alguna forma han ayudado a cumplir este sueño: Los trabajadores del departamento de Automática del ZETI (Norge, Jorge, Bexy, Claudio y Nery), a Vladimir, a Mari, a la profesora Maricel y a los que no menciono pero estuvieron ahí, a ellos muchas gracias.

A todos: mi eterna Gracitud.

Junio, 2015.

## TAREA TÉCNICA

Para cumplir con el objetivo de la investigación y dar solución al problema científico se desarrollaron las siguientes tareas de investigación:

- Realización de un estudio bibliográfico sobre el funcionamiento y automatización de las turbinas SG 49/3/6 en Cuba y el resto del mundo.
- Diseño del sistema de protección y control del arranque de acuerdo con las especificaciones de la Tarea Técnica.
- Selección del equipamiento a utilizar y que el mismo cumpla con los requisitos técnico/económicos impuestos por el proceso y por la entidad.
- Programación del autómata escogido, valorar la necesidad de módulos de expansión, así como el uso eficiente de sus entradas y salidas tanto analógicas como digitales.
- Diseño de la interfaz hombre máquina (HMI) que permita visualizar los parámetros del proceso.
- Análisis económico e impacto medioambiental.
- Hacer pruebas que demuestren la efectividad del trabajo realizado.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## RESUMEN

Este trabajo de diploma se desarrolló en la Unidad Básica Empresarial “Elpidio Gómez”, perteneciente al municipio de Palmira en la provincia de Cienfuegos. Intervinieron en el mismo la Empresa de Servicios Técnicos Industriales, sucursal Villa Clara y el Departamento de Automática de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

El trabajo presentado es parte del proyecto de modernización de la planta de generación eléctrica del central. En específico abarca el diseño del sistema de control de arranque y protección de una de las turbinas de contrapresión, ya que ésta cuenta con una tecnología obsoleta y no cumple con las exigencias necesarias para su correcto funcionamiento.

Se realizó un análisis bibliográfico del proceso tecnológico y del estado actual de las técnicas de automatización, luego se sucedió a la selección de la instrumentación, así como a la programación y configuración del PLC M340 y el HMI *Magelis*, a través de los *softwares Unity Pro* y *Vijeo Designer* respectivamente.

Finalmente se realizó un análisis de la factibilidad económica para conocer los costos y beneficios de la inversión, así como los resultados alcanzados, pudiendo ser aplicados, en todo el país, a turbinas de este tipo que requieran ser modernizadas.

## SIGLAS

**CPU:** *Central Processing Unit* (Unidad de Procesamiento Central)

**DCS:** *Distributed Control System* (Sistema de Control Distribuido)

**E/S:** Entradas y Salidas

**FS:** *Full Scale* (Escala Completa)

**FTP:** *File Transfer Protocol* (Protocolo de transferencia de archivos)

**HMI:** *Human-Machine Interface* (Interface hombre-máquina)

**PLC:** *Programmable Logic Controller* (Controlador lógico programable)

**RAM:** *Random Access Memory* (Memoria de Acceso Aleatorio)

**SCADA:** *Supervision Control And Data Acquisition* (Sistema de Control y Adquisición de Datos)

**TA:** Turbina de Aire

**TCP/IP:** *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (Protocolo de control de transmisión/protocolo de Internet)

**TG:** Turbina de Gas

**TH:** Turbina Hidráulica

**TV:** Turbina de Vapor

**UEB:** Unidad Empresarial Básica

**USB:** Universal Serial Bus (Bus de serie universal)

**VCA:** Voltaje de Corriente Alterna

**VCD:** Voltaje de Corriente Directa

## TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TAREA TÉCNICA.....	iv
RESUMEN .....	v
SIGLAS .....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO 1. ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS TURBINAS DE VAPOR Y SU AUTOMATIZACIÓN .....</b>	<b>6</b>
Introducción.....	6
1.1 Resumen Histórico del Desarrollo de las Turbinas.....	6
1.2 Tipos de Turbinas de Acuerdo con el Flujo de Trabajo.....	8
1.3 Ciclo Termodinámico Asociado al Funcionamiento de las TV .....	10
1.4 Clasificación de las Turbinas de Vapor .....	12
1.4.1 Según el Número de Etapas .....	12
1.4.2 Según la Energía Contenida en el Flujo de Vapor.....	13
1.4.3 De Acuerdo con la Presión de Salida del Vapor.....	14
1.4.4 Otras Clasificaciones .....	14
1.5 Elementos Estructurales y Mecánicos de una Turbina de Contrapresión. ....	15
1.6 Principales Aplicaciones y Proveedores de las Turbinas de Vapor .....	18
1.7 Control y Protección de las Turbinas de Vapor .....	19
1.7.1 Supervisión y Protecciones.....	20
1.7.2 Sistemas de Automatización.....	21
1.8 Consideraciones Finales del Capítulo .....	23
<b>CAPÍTULO 2. CONTROL DEL ARRANQUE Y PROTECCIÓN DE LA TURBINA.....</b>	<b>24</b>
Introducción.....	24
2.1 Descripción General de la Propuesta de Modernización .....	24
2.2 Características Específicas de la Turbina.....	26
2.2.1 Calentamiento y Arranque .....	26
2.3 Equipamiento Empleado .....	27

2.3.1	Autómata y Terminal Táctil.....	28
2.3.2	Instrumentación de Campo .....	32
2.4	Estructura y Herramientas Para la Modernización de la Turbina .....	34
2.4.1	Comunicación Modbus en el Perfil TCP/IP .....	36
2.4.2	<i>Software</i> Empleado en la Programación del PLC M340 .....	37
2.4.3	<i>Software</i> a Utilizar Para la Programación del Terminal Táctil Magelis .....	39
2.4.4	<i>Software</i> Empleado en el Diseño de los Planos de Conexión y Montaje del Panel.....	41
2.5	Programación de la Secuencia de Arranque y Protección .....	43
2.5.1	Lectura y Escalado de las Variables .....	44
2.5.2	Programación de una Secuencia de Alarmas .....	45
2.5.3	Programación de una Secuencia de Protección .....	46
2.6	Presentación de las Variables en el HMI .....	47
2.7	Consideraciones Finales del Capítulo .....	48
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....		50
Introducción .....		50
3.1	Planos Elaborados en el Proceso de Modernización.....	50
3.2	Procedimientos y Pruebas del Panel de Control .....	51
3.3	Análisis del Funcionamiento del Sistema Diseñado .....	53
3.4	Normas de Protección e Higiene del Trabajo .....	56
3.5	Análisis Técnico Económico.....	57
3.6	Análisis del Impacto Medioambiental .....	59
3.7	Consideraciones Finales del Capítulo .....	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		62
Conclusiones .....		62
Recomendaciones .....		63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		64
ANEXOS .....		69
Anexo A-1	Turbina Alemana de Tercera Generación .....	69
Anexo A-2	Datos de Operación de la Turbina Alemana de Tercera Generación Según el Fabricante .....	70
Anexo A-3	Características Técnicas de la Instrumentación de Campo .....	72
Anexo A-4	Listado de Variables.....	76
Anexo A-5	Características Técnicas de los Módulos que Conforman el Autómata .....	80
Anexo A-6	Configuración de la Comunicación PLC-HMI .....	87
Anexo A-7	Programas de Protección y Arranque.....	90
Anexo A-8	Vincular Variables .....	93
Anexo B-1	Planos del Proyecto .....	95
Anexo B-2	Instrumentos de Medición que Intervinieron en el Proceso de Ensamblaje y Prueba del Panel.....	103
Anexo B-3	Panel Para el Control del Arranque y Protección de la Turbina .....	104

Anexo B-4	Equipos Empleados en la Verificación del Funcionamiento del Diseño ..	105
Anexo B-5	Precios (CUP) de los Automatas y Terminales Táctiles de MITSUBISHI, SCHNEIDER y SIEMENS .....	106
Anexo B-6	Promedio de Fallas Eléctricas y Tiempo en Resolverlas .....	107

## INTRODUCCIÓN

La producción de azúcar es muy compleja, desde la siembra, la recolección y el proceso, cuidadosamente diseñado, para obtener el refino; aunque es un producto vital para la dieta cotidiana del ser humano, es probable que se desconozca del proceso complejo que lleva la extracción del azúcar de caña (Santamaría García, 2012). Una vez que se tiene idea de la diversidad de factores que influyen en la producción de la sustancia, se torna necesaria la existencia de los sistemas automatizados para mejorar la eficiencia y calidad de la producción.

El proceso de automatización se ha ido renovando con el avance de la tecnología con el objetivo de disminuir los costos de producción y crear un producto de mayor calidad. Monitorear y realizar diversas acciones sobre los procesos productivos es una necesidad vital en cualquier segmento de la industria. La electrónica ha permitido automatizarlos, al incluir “inteligencia” en equipamientos que pueden decidir sobre un conjunto de reglas definidas por el usuario, como por ejemplo, los pequeños y poderosos controladores, autómatas y procesadores, utilizados en los más diversos sectores de la industria (Cangás and Hipólito, 2010).

Actualmente los ingenios en el mundo tienen un sistema totalmente automatizado, haciendo uso de simuladores en cuartos de control desde donde se monitorea el proceso (Aguilera and Chang, 2010). En otros ingenios, como en el caso de Cuba, solo se ha automatizado parte del proceso, lo que trae aparejado la necesidad de frecuentes mantenimientos y modificaciones en los componentes de los equipos.

El acelerado desarrollo de la economía moderna impone nuevos retos a los países, exigiéndoles competitividad e implementación de tecnologías de alta eficiencia y fiabilidad que permitan reducir los costos e incrementar el rendimiento de los procesos. En los

centrales cubanos, esta modernización se desarrolla bajo la premisa de que las inversiones sean recuperables en al menos cinco períodos de zafra (Romero, 2014). Un área de relevancia a considerar para estas inversiones es el área de generación eléctrica, parte indispensable en la obtención del azúcar. Sin energía eléctrica el central quedaría incapacitado en su funcionamiento, pues este solo se conecta a la red nacional durante su arranque inicial producto del elevado consumo y luego se autoabastece además de entregar energía al sistema eléctrico nacional.

La presente tesis se desarrolló en el central “Elpidio Gómez” de la provincia de Cienfuegos, que tiene como objetivo principal la producción de azúcar refino, para el consumo nacional y exportar a varias zonas de la región. Dicho central se encuentra inmerso en el perfeccionamiento empresarial en cumplimiento de los lineamientos aprobados en el Sexto Congreso del Partido.

A medida que las máquinas operan más allá de su vida útil esperada, se requiere de un sistema de control y protección más preciso y confiable. Tal es el caso de las turbinas existentes en la UEB azucarera del municipio de Palmira. La automática presente funciona de forma cableada por medio de contactores y relés. Este tipo de control es utilizado ampliamente en el central, y tiene como principal inconveniente que cualquier variación en el proceso supone modificar físicamente gran parte de las conexiones de los montajes, con un gran esfuerzo técnico y un mayor desembolso económico.

Actualmente el sistema de control y protección de la turbina SG de tercera generación presenta de manera frecuente fallas que limitan su trabajo, lo cual disminuye la operabilidad y capacidad de entrega de potencia a los procesos productivos. Como resultado se puede parar de forma parcial o total el central. Por esta razón es necesario reemplazar la obsoleta tecnología existente, por una que garantice una elevada confiabilidad y explotación; determinando el siguiente **problema científico**: Carencia de un sistema de control y protección, para la operación confiable de la turbina de contrapresión, actualmente existente en el central “Elpidio Gómez”.

Para dar solución al problema científico se determinó por **objeto de la investigación** el sistema de control de turbinas de contrapresión, definiendo el **campo de la investigación** como el control para el arranque y el sistema de protección de la turbina alemana, modelo

SG 49/3/6. En cuanto a lo planteado, se propone como **objetivo principal**: Diseñar el sistema de control para el arranque y protección de la turbina de contrapresión, existente en la UEB azucarera “Elpidio Gómez”, empleando técnicas modernas.

**Objetivos específicos:**

1. Estudiar el funcionamiento de las turbinas de vapor y su automatización.
2. Seleccionar el equipamiento adecuado para la protección y control de la turbina.
3. Programar el autómeta (PLC) de acuerdo con el algoritmo de protección y control desarrollado.
4. Diseñar una interfaz (Hombre-Máquina) que permita al operador realizar con seguridad el manejo del proceso.
5. Confeccionar los planos y supervisar la fabricación del panel para el control del arranque y protección de la turbina.

Existen varios proyectos realizados con anterioridad, en los cuales se han combinado el uso de técnicas modernas de instrumentación con turbinas cuya automática estaba obsoleta. Tal es el caso del central “5 de Septiembre” en el año 2004 bajo tecnología Siemens, con autómeta S7-300 y OP-77A, automatizándose la turbina rusa de 4 MW existente en el mismo (Teico, 2004). Otro proyecto implementado para la protección y control, corresponde en el año 2012 a las turbinas de fabricación rusas presentes en el central “Uruguay”, utilizándose autómetas y terminales gráficas Mitsubishi (ZETI, 2012). Con esta misma tecnología se modernizaron en el 2013, las turbinas rusas de la planta eléctrica del ingenio “Melanio Hernández” (ZETI, 2013).

En México, a partir del 2010, existe un programa diseñado para normalizar el sistema de control y protección de turbinas donde se definen el uso de PLC y otras herramientas de automatización (Gutiérrez, 2010). La empresa *Emerson Process Management* usa la tecnología *SCADA Ovation* diseñada para el control de turbinas y otros controles de planta, como control de calderas o de recuperadores de calor etc. (EMERSON, 2014). Mientras ABB dispone de servicios para implementar sistemas de control distribuidos encaminados al control de turbos (ABB, 2008).

El desarrollo del proyecto es viable en nuestro país, pues se dispone del equipamiento y conocimientos técnicos para la ejecución del mismo. Con el desarrollo de este se aprovecha una unidad tecnológica de más de 30 años de explotación, dotándola de un equipamiento moderno y haciéndola competitiva con unidades a las que hoy el país no puede acceder por razones económicas. Se espera obtener un considerable ahorro, traducido en una disminución de las paradas por mal funcionamiento eléctrico y un aumento del tiempo entre cada mantenimiento que se le realiza a la unidad.

### **Organización del informe**

El informe final está estructurado de la siguiente manera: la presente introducción, a la que siguen, capitulario, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

Los temas abordados en cada uno de los capítulos son:

En el Capítulo 1 se abordan los temas reflejados en la bibliografía relacionados con el funcionamiento y descripción de las turbinas, en particular las de contrapresión. Se refieren los aspectos fundamentales recogidos en la literatura en cuanto a las aplicaciones, fabricantes y clasificaciones de las mismas; así como las técnicas modernas empleadas en los procesos de automatización. También se describe la situación que existe en el central “Elpidio Gómez” respecto a la turbina alemana de tercera generación SG 49/3/6 según la automática que la acompaña.

El Capítulo 2 es el escenario donde se propone la solución específica para la modernización de la turbina. Se selecciona la instrumentación adecuada según las características del equipo tecnológico y las necesidades del cliente. Además se define la estructura que tendrá el sistema propuesto dentro de la pirámide de automatización y la comunicación empleada para el enlace de todos los elementos. Se presentan los *softwares* para la programación del PLC, el diseño del HMI y la elaboración de los planos de conexión y montaje. A continuación se muestran algunas de las secuencias programadas y la interfaz gráfica desarrollada.

En el Capítulo 3 se presenta el panel de control del arranque y protección. Se somete el sistema diseñado a pruebas para comprobar que funcione correctamente y se particularizan algunos de los planos diseñados. También se realiza un análisis técnico/económico con el

---

fin de determinar la rentabilidad del proyecto, así como una valoración del impacto medioambiental que puede tener este.

# **CAPÍTULO 1. ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS TURBINAS DE VAPOR Y SU AUTOMATIZACIÓN**

## **Introducción**

En el presente capítulo quedan abordados los aspectos fundamentales, relacionados con el funcionamiento de las turbinas de vapor disponibles en la literatura. Adicionalmente, se realiza un resumen del desarrollo histórico de los tipos fundamentales que existen, atendiendo a su principio de funcionamiento. Se clasifican las turbinas de vapor y se describen las partes principales que componen específicamente las de contrapresión, así como su aplicación. Finalmente, se exponen los problemas que se presentan con mayor frecuencia en la industria, con respecto al equipo tecnológico en cuestión y se hace referencia a los sistemas de automatización modernos.

### **1.1 Resumen Histórico del Desarrollo de las Turbinas**

Se entiende por turbina a la máquina motora capaz de absorber energía de una corriente de agua, aire, vapor de agua o gas y restituirla en energía mecánica, o del mismo tipo pero transformada (Valamin et al., 2012). El elemento básico de la turbina es la rueda o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de un compresor, un generador eléctrico o una hélice (Baskakov, 1985).

La turbina como toda máquina, es el resultado de las experiencias y conocimientos acumulados por el hombre. Ejemplo de ello son las turbinas hidráulicas, las cuales tuvieron sus precursoras en Asia, China y la India hace unos 2200 años, cuando para regar los

cultivos el ser humano empleaba las ruedas hidráulicas con paletas. En la misma época surgen en Persia hoy República Islámica de Irán los molinos de viento, con el fin de aprovechar la energía eólica o cinética del aire para producir trabajo (Retuerto et al., 1998).

En la historia, la primera turbina de vapor de la que se tiene constancia fue construida por Herón de Alejandría alrededor del año 175 A.C., la cual consistía en un esfera metálica con dos toberas en sus polos y orientadas en el mismo sentido por donde se escapaba el vapor. La esfera giraba diametralmente, apoyada sobre la caldera por los conductos de entrada del vapor, esta idea fue la base a posteriores intentos de aprovechamiento del vapor en la obtención de energía mecánica (Faires, 1975).

Otro aparato que comparte época fue el precursor de las turbinas de gas. Este consistía en una corriente de aire caliente circulando por un tubo vertical, que inducía otra de aire frío en tubos dispuestos radialmente y encorvados en sus extremos, produciendo así, por reacción, el giro de una plataforma.

Demoró tiempo desde la aparición de estas máquinas hasta que se consiguen significativos avances. A finales del siglo XVII el francés Parent estudia por vez primera el funcionamiento de las ruedas hidráulicas, mientras Euler en 1754 en Berlín desarrolló la primera ecuación fundamental de las turbomáquinas. A comienzos del siglo XIX se usa por primera vez en el vocabulario técnico la palabra “Turbina” de manos del francés Claude Burdin y dentro de este mismo siglo aparecen las turbinas Pelton, Francis y Kaplan (Retuerto et al., 1998).

En la construcción de las turbinas de vapor tuvo participación más de una persona, como ocurre en casi todas las grandes invenciones. A lo largo del siglo XIX, se presentaron varias proposiciones para transformar la energía térmica en energía mecánica, utilizando la altura de velocidad del chorro de vapor saliente.

Anteriormente sobre los años treinta del siglo XVIII se tiene constancia del empleo de las turbinas de vapor, bajo el principio de la rueda hidráulica de Segner. Pero no es hasta el año 1883 que Gustaf Laval en Suecia presenta un modelo en el cual el vapor entra en una o varias toberas, adquiere allí una considerable velocidad y se dirige a las paletas receptoras, dispuestas en la llanta del disco acoplado en el árbol de la turbina (Schegliaev, 1978).

En 1884 Charles Person en Inglaterra defiende una idea diferente a Laval; consistía en la expansión del vapor sobre varios escalones consecutivos, compuestos por paletas fijas y móviles. Las paletas directrices están en el cuerpo de la turbina, mientras que las receptoras se disponen formando filas en el tambor.

Luego en el año 1912 los hermanos Ljunstrom dan lugar a las turbinas radiales, las que difieren de la construcción corriente puesto que estas no presentan paletas fijas, sino dos discos que giran en sentido inverso el uno al otro. Este principio propició la construcción compacta y económica de las turbinas de vapor, aunque poseen el inconveniente de necesitar dos generadores y producir grandes tensiones en las paletas, lo que frena así su explotación (Schegliaev, 1978).

Con el desarrollo de los conocimientos de los metales y la impecable necesidad del hombre de obtener más potencia y mejorar la eficiencia de las turbinas, ocurre un desenfrenado auge a partir de la década de 1920 de la construcción de estos equipos y su mejoramiento. En la actualidad podemos encontrar turbinas de diversos proveedores del mundo que son capaces de alcanzar potencias desde 0.75 KW hasta 1300 MW. Además de contar estas con características específicas de acuerdo con su principio de funcionamiento, lo que las hace apropiadas para distintos ambientes de trabajo y necesidades estratégicas del lugar geográfico de explotación.

## **1.2 Tipos de Turbinas de Acuerdo con el Flujo de Trabajo**

El funcionamiento de las turbinas se basa en el principio mecánico que establece: si un cuerpo en movimiento cambia la dirección, la velocidad, o ambas a la vez, se halla sometido a la acción de una fuerza o un sistema de fuerzas. Por definición rotativa, si cambia la velocidad al actuar una fuerza, la cantidad de movimiento cambiará simultáneamente.

Otro aspecto importante en el funcionamiento es la variación de la cantidad de movimiento del fluido de trabajo, que se produce junto con la variación de presión y volumen específico, afectando la producción de trabajo sobre alguna carga exterior (Lasalle et al., 1981).

En la actualidad se definen cuatro importantes familias de turbinas dentro de las que podemos encontrar:

#### a) Turbinas de Gas

Las turbinas de gas son equipos capaces de transformar la energía química contenida en un combustible en energía mecánica, ya sea para su aprovechamiento energético o como fuerza de impulso de aviones, automóviles o barcos.

Una TG simple está compuesta de tres secciones principales: un compresor, un quemador y una turbina de potencia. Estos equipos operan en base al principio de Brayton<sup>1</sup>, en donde el aire comprimido es mezclado con combustible y quemado bajo condiciones de presión constante. El gas caliente producido por la combustión se le permite expandirse a través de la turbina y hacerla girar para llevar a cabo trabajo (Boyce, 2012).

#### b) Turbinas Hidráulicas

Consisten esencialmente, en un distribuidor con palas o toberas que guían el agua y la dirigen, convenientemente hacia un rodete móvil provisto de álabes, sobre los cuales el agua ejerce una fuerza motriz, es decir, se transforma la energía del movimiento de las aguas en trabajo mecánico para generar electricidad a través de un generador. Existen una gran variedad de instalaciones clasificándose en tres grupos: centrales de agua fluyente, de pie de presa y de canal de riego o abastecimiento (Li and Zhou, 2011).

#### c) Turbinas de Viento o Aire

En las TA se transforma la energía del viento en energía mecánica, que aplicada a un alternador convierte esta en electricidad. Las máquinas empleadas para transformar la fuerza cinética del viento en electricidad reciben el nombre de turbinas eólicas o aerogeneradores. Estos se dividen en dos grupos: los de eje horizontal y los de eje vertical (Hau and Von Renouard, 2013).

#### d) Turbinas de Vapor

Entre las máquinas en las que el vapor actúa por su fuerza viva, se encuentran las turbinas de vapor (Ferrer, 1974). Estas son elementos mecánicos consideradas como motores

---

<sup>1</sup> Ciclo termodinámico que describe el funcionamiento de las turbinas de gas.

primarios (Severns et al., 1966), donde se aprovecha la energía termodinámica del vapor a elevada temperatura y presión, produciéndose un salto de entalpía, teniendo el proceso comportamiento adiabático e isoentrópico<sup>2</sup> (Mastrapa, 2006).

La forma en la que se produce trabajo en una TV está dado primero: por la expansión del vapor en las toberas desde la presión de admisión alta hasta una de escape baja, durante lo cual se genera energía cinética. El diseño de las toberas y diafragmas permiten dirigir el flujo de vapor a chorros bien formados y a alta velocidad, pasando por las paletas o álabes solidarios al eje de la turbina, que están diseñados para cambiar la cantidad de movimiento de la corriente. Dicho cambio produce una fuerza impulsora (Faires, 1975) o trabajo mecánico aprovechable para accionar, a través de un reductor, otros elementos motrices.

### **1.3 Ciclo Termodinámico Asociado al Funcionamiento de las TV**

Un ciclo de potencia de vapor es el proceso que tiene lugar en los dispositivos destinados a la obtención de trabajo a partir de dos fuentes de calor a distinta temperatura, o de manera inversa, los cuales aportan trabajo con el paso del calor de la fuente de menor temperatura a una de alta temperatura.

El ciclo de Carnot es el más eficiente de los que operan entre dos niveles de temperatura especificados. Debido a esto, es natural considerarlo como el ciclo ideal para las plantas de energía de vapor; pero no se considera un ciclo apropiado para los de potencia pues cualquier intento para incrementar la temperatura implicará la transferencia de calor al fluido de trabajo en una sola fase, la cual no es fácil realizar en un proceso isotérmico y la turbina tendrá que manejar un vapor de baja calidad, es decir, con un alto contenido de humedad (Ladino Luna, 2010).

Existe un ciclo que trabaja bajo el mismo principio de Carnot, pero con mayor eficiencia que este, esto se logra sobrecalentando el vapor de la caldera y condensándolo por completo en un condensador. El resultado es el ciclo Rankine, ideal para las plantas de

---

<sup>2</sup>Entropía constante, magnitud física que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo. Baskakov, A. P. 1985. Termotecnia. pp 35

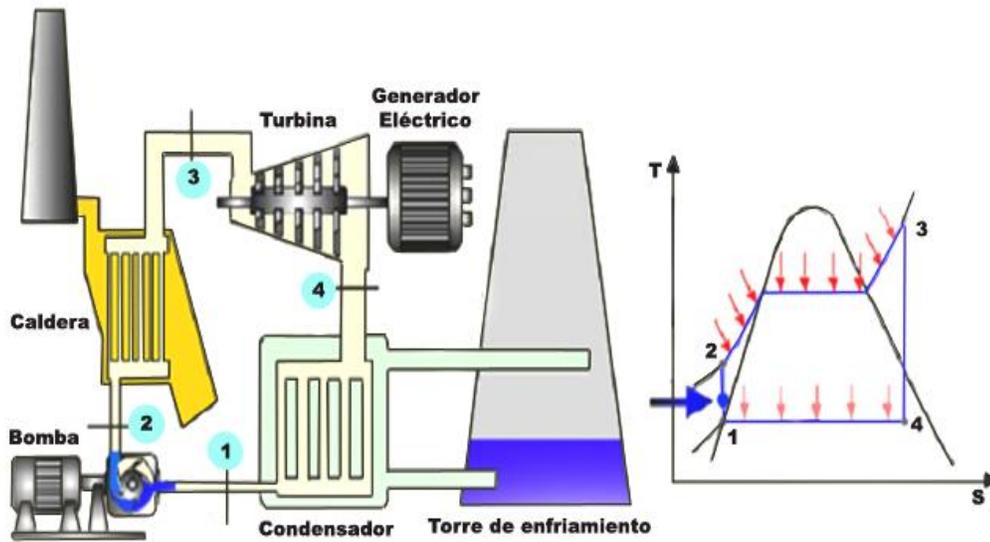
cogeneración térmicas y está compuesto por los siguientes cuatro procesos (Ver **Figura 1.1**):

**Proceso 1-2:** Compresión isoentrópica en una bomba

**Proceso 2-3:** Adición de calor a presión constante en una caldera

**Proceso 3-4:** Expansión isoentrópica en una turbina

**Proceso 4-1:** Rechazo de calor a presión constante



**Figura 1.1:** Ilustración del Ciclo Rankine Ideal

El agua entra a la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se le aplica una compresión isoentrópica hasta la presión de operación en la caldera. La temperatura del agua aumenta un poco durante este proceso de compresión debido a una ligera disminución en el volumen específico del agua.

El agua entra a la caldera como un líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. La caldera intercambia calor originado por los gases de combustión, reactores nucleares u otras fuentes al agua a presión constante.

El vapor es sobrecalentado en el estado 3 donde entra en una turbina, se expande isoentrópicamente y produce trabajo al hacer girar un eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen durante este proceso hasta que llegan al estado 4, donde el vapor se empieza a condensar. En este estado la mezcla suele ser líquido-vapor con una calidad alta, por lo que se requiere rechazar el calor a presión

constante en un condensador, el cual es un intercambiador de calor. El vapor abandona el condensador como líquido saturado y entra a la bomba completando y reiniciando un nuevo ciclo.

El área bajo la curva del proceso 2-3 representa el calor transferido al agua en la caldera y el área bajo la curva del proceso 4-1 representa el calor rechazado en el condensador. La diferencia entre ambas es el trabajo neto producido durante el ciclo (Silgado Correa and Ojeda Delgado, 2013).

Además existen otras adaptaciones como el ciclo Rankine ideal con recalentamiento (Chávez Ruíz, 2014), el cual consiste en expandir el vapor en la turbina en dos etapas y recalentarlo entre cada una de ellas y el ciclo Rankine ideal regenerativo; donde un calentador transfiere el calor de las extracciones de parte del vapor que se expande en la turbina al agua de alimentación, luego se introduce en la caldera para poder transformarla en vapor sobrecalentado y ser ingresado nuevamente en el turbo.

## **1.4 Clasificación de las Turbinas de Vapor**

Las turbinas dependiendo del criterio a tener en cuenta se pueden clasificar de múltiples formas. Las clasificaciones más importantes y reconocidas que tipifican a estos equipos suelen ser:

### **1.4.1 Según el Número de Etapas**

#### **a) Multietapa**

El objetivo de los escalonamientos en la turbina de vapor es disminuir la velocidad del rodete, conservando una velocidad de los álabes próxima al valor óptimo con relación a la velocidad del chorro de vapor. Si la presión de vapor es muy elevada sin las etapas necesarias, sería necesario que la turbina girase a una velocidad muy alta, que no sería viable mecánicamente por las dimensiones que debería tener el reductor (caja de engranajes que ajustaría la velocidad final del eje a la deseada).

#### **b) Monoetapa**

Se utilizan para turbinas de hasta 2 MW de potencia, al ser las más simples de construir son las más robustas y seguras, además de acarrear menores costos de instalación y mantenimiento que las multietapa.

#### 1.4.2 Según la Energía Contenida en el Flujo de Vapor

##### a) De Reacción

En la turbina de reacción la energía mecánica se obtiene de la aceleración del vapor en expansión. Las turbinas de este tipo cuentan con dos grupos de palas, unas móviles y las otras fijas. Las palas fijas están colocadas de forma que cada par actúa como una boquilla a través de la cual pasa el vapor mientras se expande, llegando a las palas de las turbinas de reacción, que se montan en un tambor que actúa como eje de la turbina.

En la turbina de reacción se produce un escalonamiento de velocidad. Este consiste en producir una gran caída de presión en un grupo de toberas y utilizar la velocidad resultante del vapor, en tantos grupos de álabes como sea necesario, mediante un juego de enderezadores reorientando el vapor de salida de la primera etapa para que entre en un segundo rodete.

##### b) De Acción

Una turbina de vapor de acción con un escalonamiento de velocidad consta fundamentalmente de:

-**Un distribuidor fijo**, compuesto por una o varias toberas, cuya misión es transformar la energía térmica del vapor puesta a su disposición, total (acción), o parcialmente (reacción), en energía cinética.

-**Una corona móvil**, fija sobre un eje, cuyos álabes situados en la periferia tienen por objeto transformar en energía mecánica de rotación, la energía cinética puesta a su disposición.

Su funcionamiento consiste en impulsar el vapor a través de las toberas fijas hasta alcanzar las palas, que absorben una parte de la energía cinética del vapor en expansión, lo que hace girar el rotor y con ella el eje al que está unida. Las turbinas de acción habituales tienen varias etapas, en las que la presión va disminuyendo de forma escalonada en cada una de ellas.

### 1.4.3 De Acuerdo con la Presión de Salida del Vapor

#### a) De Condensación

El vapor sale a una presión inferior a la atmosférica, en este diseño existe un mayor aprovechamiento energético que a contrapresión, se obtiene agua de refrigeración de su condensación. Este diseño se utiliza en turbinas de gran potencia que buscan un alto rendimiento.

#### b) De Escape Libre

El vapor de escape va hacia la atmósfera. Este tipo de turbinas despilfarra la energía pues no se aprovecha el vapor de escape en otros procesos como calentamiento. No son muy usadas.

#### c) Con Extracción de Vapor

Se realiza en etapas de alta presión, enviando parte del vapor de vuelta a la caldera para sobrecalentarlo y reenviarlo a etapas intermedias. En algunas ocasiones el vapor también puede ser extraído de alguna etapa para derivarlo a otros procesos industriales.

#### d) De Contrapresión

La presión del vapor a la salida de la turbina es superior a la atmosférica, suele estar conectado a un condensador inicial que condensa el vapor, obteniéndose agua caliente o sobrecalentada, que permite su aprovechamiento térmico posterior.

### 1.4.4 Otras Clasificaciones

#### a) Según el Paso del Vapor

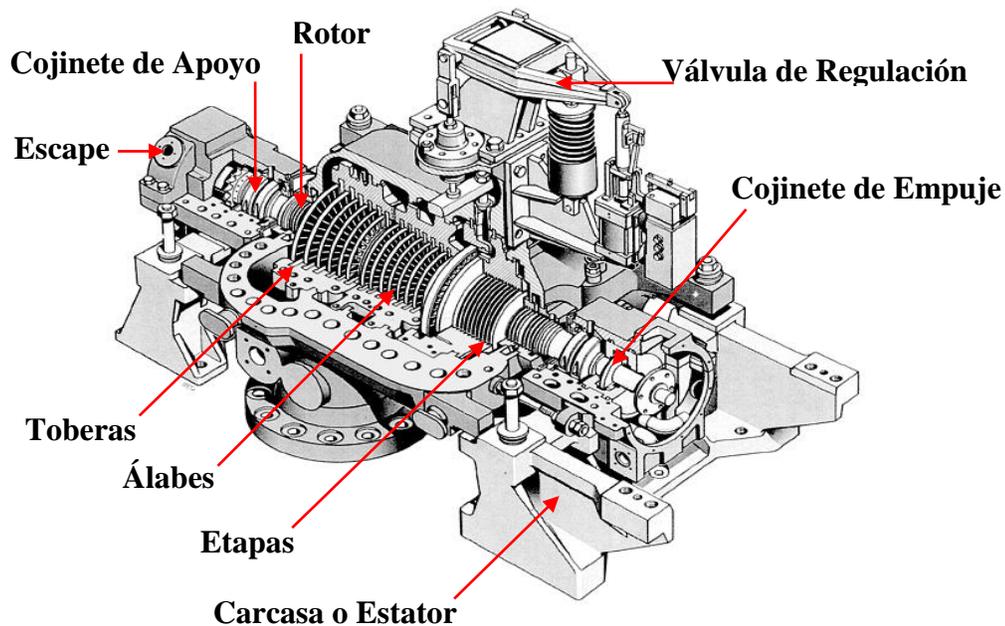
Pueden ser axiales cuyo método es el más utilizado. El paso de vapor se realiza siguiendo un cono que tiene el mismo eje que la turbina. La circulación de vapor transcurre paralelamente al mismo. Mientras en las radiales, el paso se realiza siguiendo todas las direcciones perpendiculares al eje.

#### b) Según el Modo de Inyección

Cuando las toberas se encuentran distribuidas por toda la circunferencia descrita por los álabes son de inyección total; si las toberas están repartidas sobre un arco de la circunferencia que describen los álabes son de inyección parcial.

### 1.5 Elementos Estructurales y Mecánicos de una Turbina de Contrapresión.

Las turbinas de vapor están constituidas por dos partes principales; la parte giratoria conocida por rotor y la parte estacionaria como estator (Lostaunau, 2007). Este último está compuesto por pedestales, cargadores, bloques de toberas, diafragmas, sellos y en ocasiones por el sistema de distribución de vapor. También, tiene una serie de elementos estructurales, mecánicos y auxiliares, como son los cojinetes, las válvulas de regulación, el sistema de lubricación, el sistema de refrigeración, etc.; mientras el rotor de una turbina suele ser de acero fundido con ciertas cantidades de níquel o cromo para darle tenacidad, y tiene un diámetro aproximadamente uniforme. Ver **Figura 1.2**.



**Figura 1.2:** Partes fundamentales de una turbina de contrapresión. (Díez, 2005)

Los álabes fijos y móviles se colocan en ranuras alrededor del rotor y la carcasa. Se pueden asegurar solos o en grupos, fijándolos a su posición por medio de un pequeño seguro, en forma de perno, o mediante remaches. Los extremos de los álabes se fijan en un anillo

donde se remachan, y los más largos, a menudo, se amarran entre sí para darles rigidez con alambres o barras en uno o dos lugares intermedios (Uribe Gutiérrez, 2010).

Otro elemento importante son las toberas, conductos por los cuales circula el vapor hasta los álabes de la máquina sufriendo un cambio de expansión. Estas pueden ser de forma convergente-divergente para expansiones amplias, y de forma convergente para una expansión relativamente baja.

Usualmente se fabrican de aleaciones de acero y bronce y se agrupan formando segmentos de círculos, los cuales se montan y disponen en el casco de la turbina guardando cierta separación entre ellos. Las toberas ocupan el espacio circunferencial suficiente para permitir en el área de paso la circulación del vapor. A la combinación de una fila de toberas y un disco con álabes móviles se le conoce por etapa.

Los cojinetes comúnmente usados en el turbogenerador son de tipo hidrodinámico dentro de los cuales hay dos diseños básicos: los rígidos y los autoalineables. Estos diseños son utilizados para los cojinetes de soporte como para los de empuje. En los cojinetes de apoyo gira el rotor y suelen ser de un material blando, recubiertos de una capa lubricante que disminuye la fricción. Son elementos de desgaste, que deben ser sustituidos periódicamente. Por su parte los cojinetes de empuje impiden el desplazamiento del rotor en la dirección del eje, evitando que repercuta en el reductor, dañándolo seriamente (Alejandro et al., 2010).

La válvula de regulación mantiene uniforme el caudal de entrada a la turbina, siendo de los elementos más importantes de la misma. Es accionada hidráulicamente con la ayuda de un grupo de presión de aceite o neumáticamente. Forma parte de dos lazos de control: el lazo que controla la velocidad de la turbina y del lazo que controla la carga o potencia. Conjuntamente con la anterior se emplea una válvula de cierre rápido, encargada de impedir el paso del vapor ante cualquier eventualidad que suceda en el funcionamiento del turbo.

El lugar por donde se retira el vapor o se extrae, recibe el nombre de escape. La cantidad de vapor que puede pasar por el anillo de escape depende del volumen específico del vapor a la salida y de su velocidad (Stępczyńska et al., 2012). Si se fijan las condiciones de presión del vapor queda fijado su volumen específico, pero la velocidad de este depende del

porcentaje de pérdidas que se señale como admisible. Como estos factores limitan la potencia de la turbina, en ocasiones, se propone el escape doble, triple y hasta séxtuple, con el objetivo de proporcionar una superficie de escape mayor sin aumentar las dimensiones del cilindro (Xu et al., 2010).

El sistema de lubricación proporciona el fluido lubricante, generalmente aceite. Para asegurar la circulación del óleo en todo momento, el sistema suele estar equipado con varias bombas: la principal y las de emergencia o auxiliares. La bomba principal está acoplada al eje de la turbina de forma que siempre giran juntos, asegurándose así la presión de bombeo. No obstante, en los arranques esta bomba no da presión suficiente, por lo que es necesario que el equipo tenga al menos una bomba auxiliar, utilizada exclusivamente en los arranques y que sirva para asegurar la correcta presión de aceite hasta que la bomba mecánica pueda realizar este servicio. Estas bombas pueden ser eléctricas o accionadas por vapor extraído del suministro de entrada (Barrios Baqueiro, 2013).

El depósito de aceite suele estar a presión inferior a la atmosférica para facilitar la extracción de vapores de aceite y dificultar una posible fuga de aceite al exterior. Para conseguir este vacío, el sistema de lubricación suele ir equipado con un extractor.

El aceite en su recorrido de lubricación se calienta modificando su viscosidad, y por tanto, sus características lubricantes, llegando a degradarse si el calor es excesivo. Para evitarlo, el sistema de lubricación dispone de unos intercambiadores que enfrían el aceite, estos intercambiadores pueden ser aire-aceite, de forma que el calor del aceite se evacua a la atmósfera, o agua-aceite, de forma que el calor se transfiere al circuito cerrado de refrigeración con agua de la planta (Martínez Sánchez, 2010).

Cuando la válvula de regulación se acciona óleo- hidráulicamente, el conjunto de turbina va equipado con un grupo de presión para el circuito de aceite de control. Este debe mantener la presión en los rangos especificados por el fabricante. El sistema de control gobierna la válvula de salida del grupo, que hace llegar el aceite hasta la válvula de regulación de entrada de vapor con la presión adecuada.

Las turbinas de vapor están equipadas con sellos de carbón, que se ajustan al eje, y/o con laberintos de vapor. Con esto se consigue evitar que el vapor salga a la atmósfera y disminuya la eficiencia térmica de la turbina (Milla Lostaunau, 2014).

## 1.6 Principales Aplicaciones y Proveedores de las Turbinas de Vapor

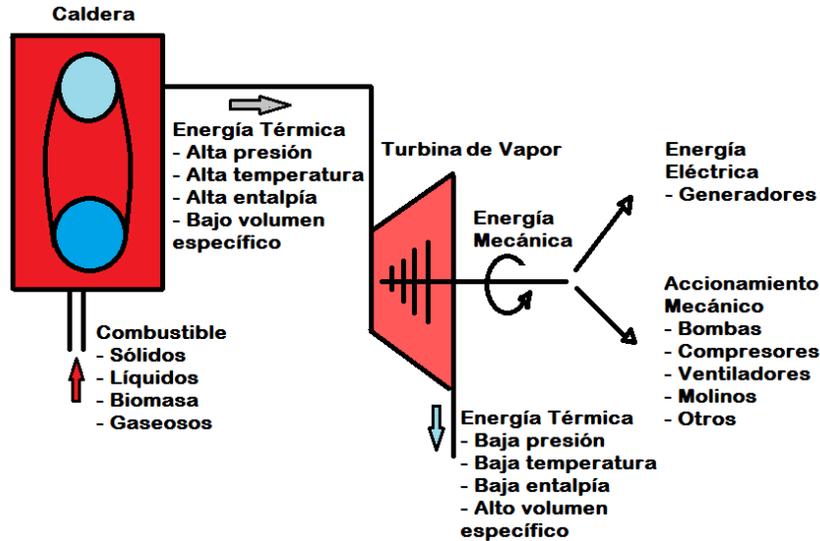
El descubrimiento de la energía eléctrica (base de la tecnología y la civilización moderna) ha jugado un papel determinante en el desenvolvimiento de la sociedad, destacándose el progreso económico y social.

La TV es un elemento importante en todo ello; tanto en las termoeléctricas, termonucleares como en las plantas geotérmicas se produce vapor de agua bajo distintos principios de funcionamiento, sin embargo, este gas es suministrado a la casa de turbinas, donde un conjunto de estas accionan generadores eléctricos capaces de producir corriente. Conociéndose como turbogenerador la combinación anteriormente mencionada (Leão, 2009).

En los centrales azucareros las turbinas son empleadas en la cogeneración simultánea de fuerza motriz (FM) o energía eléctrica (EE) y vapor (**Figura 1.3**), a partir de una misma fuente de energía primaria (combustible) para el funcionamiento de otros procesos (Fernández et al., 2009). Cuando se produce fuerza motriz se accionan bombas centrífugas, ventiladores, compresores y molinos, mientras que el vapor de escape es utilizado como medio de calefacción en intercambiadores de calor, calentadores, evaporadores, cocimiento, digestores, etc. (Agüero et al., 2011). Estos usos son frecuentes en Brasil, Perú, Chile, México y otros países de América.

La experiencia en los ingenios cubanos, es únicamente la de producir energía eléctrica para alimentar motores encargados de accionar los elementos anteriormente mencionados. Por otra parte, el vapor que se extrae de las turbinas de contrapresión se explota en otros procesos tecnológicos.

La ventaja de la cogeneración es su mayor eficiencia energética, ya que se aprovecha tanto el calor como la energía mecánica o eléctrica de un único proceso, en vez de utilizar una central eléctrica convencional para los requerimientos eléctricos y una caldera convencional para las necesidades de vapor (Jacobs and Schneider, 2009). Es además una tecnología que aporta capacidad de generación previsible y garantizada, ya que no depende de agentes externos como el viento o la radiación solar, y tiene una disponibilidad casi total (G.Garrido, 2011).



**Figura 1.3:** Transformación de la energía en un proceso de cogeneración.

Los ciclos combinados suelen ser otras aplicaciones en las que se puede encontrar a las TV y a TG acopladas en un ciclo termodinámico, en el cual se reutilizan los gases de escape producidos en el proceso de combustión de la turbina de gas (Analysis, 2008). La idea es utilizar la temperatura de estos gases, para lo cual se utiliza un intercambiador de calor, capaz de calentar agua y producir vapor utilizable por una turbina de vapor (Sepulveda, 2011).

Dentro de los sectores con mayor empleo de turbos de vapor se encuentran: las empresas energéticas, centrales, productores independientes de electricidad, industria química, petroquímica/refinerías, papeleras, minería, metalúrgica y siderurgia, industria de etanol e industria de alimentos y bebidas. Mientras que algunos de los principales proveedores son Siemens en Alemania ([www.siemens.com/energy](http://www.siemens.com/energy)), TGM de Brasil ([www.tgmturbinas.com.br](http://www.tgmturbinas.com.br)), Mitsubishi en Japón ([www.mhicompressor.com](http://www.mhicompressor.com)), Alstom de Suiza ([www.alstom.com](http://www.alstom.com)), Doosan de Corea ([www.doosanheavy.com](http://www.doosanheavy.com)) y Triveni Turbines ([www.triveniturbines.com](http://www.triveniturbines.com)) de la India, entre otros.

### 1.7 Control y Protección de las Turbinas de Vapor

Los sistemas de control en las turbinas alemanas hacia los años 70 usaban gran número de técnicas de relé y sensores on/off, y no abarcaban la totalidad de parámetros que deberían controlarse. En los lugares donde aún se utilizan estos sistemas, detectar y solucionar

cualquier avería lleva bastante tiempo, con las consecuentes pérdidas económicas por paradas no programadas del ingenio.

La propuesta original del fabricante para la operación y control de este tipo de turbina se basa en presostatos, manómetros y termómetros de contactos eléctricos como elementos primarios de medición. Se implementa una compleja y extensa lógica de relés para desarrollar las diferentes protecciones y regulaciones que garantizan el funcionamiento de la máquina. El panel puede tener alrededor de 50 relés y una conexión de cableado sumamente compleja. La situación anteriormente mencionada es el estado actual de la turbina de contrapresión ubicada en el Central “Elpidio Gómez”, de ahí la necesidad de una modernización de todo lo antes expuesto, para garantizar una eficiente y segura operación de este equipo.

Sin embargo la incorporación de novedosas tecnologías en el desarrollo de la automatización, permite un avance notorio en la sustitución de los controles y automatismos de las turbinas convencionales, hacia los equipos electrónicos, permitiendo una operación más flexible, así como redundar en la seguridad y disponibilidad de los equipos mecánicos. El sistema de control de las turbinas de forma general se compone por controles secuenciales y binarios, analógicos, medidas y protecciones (Leandro et al., 2007).

### **1.7.1 Supervisión y Protecciones**

Las medidas de protección suelen ser simples, dobles o triples redundantes, para así garantizar el correcto funcionamiento de la máquina según el grado de confiabilidad necesario. En ocasiones se generan paradas seguras en el caso de actuar alguno de ellos o se informa al operador de algún evento erróneo, permitiéndole tomar medidas para evitar un daño mayor (Villafranca and Sabugal, 2005).

Los riesgos más frecuentes a los que está expuesta una turbina son: sobre velocidad, falla del aceite de lubricación, agua en el escalón de regulación, vibraciones excesivas, alta temperatura de los cojinetes del generador y la turbina, baja presión y temperatura del vapor de admisión y funcionamiento del alternador como motor, etc. (Belin, 2012). Para impedir la operación de la turbina bajo alguna de las condiciones mencionadas se emplean una serie de dispositivos protectores, presostatos, termostatos, PLCs, entre otros. En

algunos casos descargan la máquina (dispositivos de descarga) y en otros provocan su disparo (dispositivos de disparo) en consecuencia con la falla que se produzca.

La misión de los dispositivos de descarga es la de limitar la potencia producida por la turbina cuando las condiciones de entrada o salida de la misma son anormales. Los dispositivos de disparo, por su parte, son los encargados de originar la parada inmediata (Prieto and Alonso, 2002).

Otro elemento importante es la supervisión de los parámetros según los cuales opera el equipo. Conocer de forma visual y concentrada el estado de las variables ayuda en gran medida, a que el operador pueda tomar con claridad las decisiones ante cualquier evento. El empleo de pantallas o terminales táctiles es un recurso muy usado hoy en día, por su versatilidad y forma de presentar la información. Las señales de aviso se pueden representar en forma de alarmas, las cuales se registran en el SCADA de la planta eléctrica, para un posterior análisis de las causas que les dieron origen.

### **1.7.2 Sistemas de Automatización**

Los sistemas de automatización comprenden el conjunto de los dispositivos orientados a la adquisición de datos, visualización, registro, actuación y regulación que permiten el control integral de un proceso. El sistema engloba a todos los dispositivos que sirven de interfaz con el usuario y a todo el conjunto de componentes que median de puente entre los distintos elementos de campo (Sanso, 2007).

Uno de los sistemas modernos empleado con este propósito suele ser el SCADA. Es un *software* de aplicación diseñado especialmente para ejecutarse sobre ordenadores destinados al control y supervisión de la producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo: controladores digitales autónomos, autómatas programables e instrumentación inteligente (David and Edwin, 2003).

El mismo permite realizar a distancia operaciones de control, supervisión y registro de datos del proceso industrial, provee de toda la información que se genera en el proceso productivo a los diversos usuarios, tanto desde el propio nivel de campo como de otros niveles supervisores superiores que pueden llegar hasta nivel de empresa, abarcando aspectos tan importantes como el control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc. De forma general, los SCADAs permiten al cliente conocer en todo momento (tiempo real) el

estado de una instalación, centralizando toda la información de los emplazamientos remotos en uno o varios puestos de control (Izaguirre, 2012).

Un uso importante de estos sistemas tiene lugar en las Termoeléctricas y Termonucleares donde las casas de turbinas, calderas, reactores, condensadores etc. necesitan de un control integral que muestre el estado general del funcionamiento de la planta.

Otro sistema digital empleado en la automatización de turbinas es el sistema de control distribuido, el cual está compuesto por un conjunto de elementos de hardware y paquetes de *software* que de forma conjunta permiten lograr toda la funcionalidad requerida, para realizar el control y la adquisición de datos de una planta o proceso dado. Algunos módulos manipulan las entradas y las salidas, realizan la conversión de las señales, ejecutan funciones lógicas, entre otros. Estos módulos están referidos como módulos controladores. Otros módulos pueden encargarse de mostrar datos y permitir al operador controlar e interactuar con funciones lógicas, estos son los referidos como consolas de operación (Izaguirre, 2012).

Los sistemas enfocados en autómatas lógicos programables, por su parte, están orientados al control de operaciones continuas, secuenciales y on/off, se conciben desde una óptica más limitada para atender sistemas locales englobados o no jerárquicamente en otros más complejos, por ejemplo, sistemas con varios PLCs encuadrados en un SCD o un SCADA (Pérez, 2010).

Junto a la característica de la distribución, los sistemas de control modernos, tanto los SCDs como los PLCs basan su hegemonía en las siguientes características:

Funcionamiento digital frente a los sistemas de relés y los controladores analógicos, características configurables dado por la utilización de microprocesadores que permite el diseño de sistemas basados en tarjetas universales cuyas características se definen en cada caso mediante programación, la distribución de las tareas de control entre diversos elementos disminuye el riesgo de caída global del sistema completo, facilidad de ampliación al ser fundamentalmente modulares y futura compatibilidad con sus nuevas generaciones.

Las PCs industriales o personales también se han incorporado al control basado en PLC. Permite la visualización de las señales de múltiples transmisores, el diagnóstico de cada

lazo de transmisión, el acceso a los datos básicos de calibración y a los datos de configuración de los transmisores.

En lugar de disponer de pulsadores y relés para los circuitos de enclavamiento y accionamiento de la turbina; además de paneles o cuadros de mandos con cables de conexión voluminosos y caros. Es factible emplear en la modernización alguna de las variantes de automatización, ya que aportan soluciones versátiles y prácticas ocupando menor espacio, menor margen de error y mayor autonomía.

### **1.8 Consideraciones Finales del Capítulo**

Las ventajas brindadas por la cogeneración no se aprovechan debidamente en el Central “Elpidio Gómez”, producto del deterioro de los sistemas de protección y control existentes en una de las turbinas de contrapresión. Ello se refleja en pérdidas económicas y paradas no programadas en el ingenio.

Para lograr la modernización de la turbina se justifica el empleo de nuevas tecnologías como los autómatas lógicos programables dada su robustez y modularidad. Sin embargo es preciso un correcto diseño y selección de la instrumentación acorde a las necesidades reales del proceso.

## CAPÍTULO 2. CONTROL DEL ARRANQUE Y PROTECCIÓN DE LA TURBINA

### **Introducción**

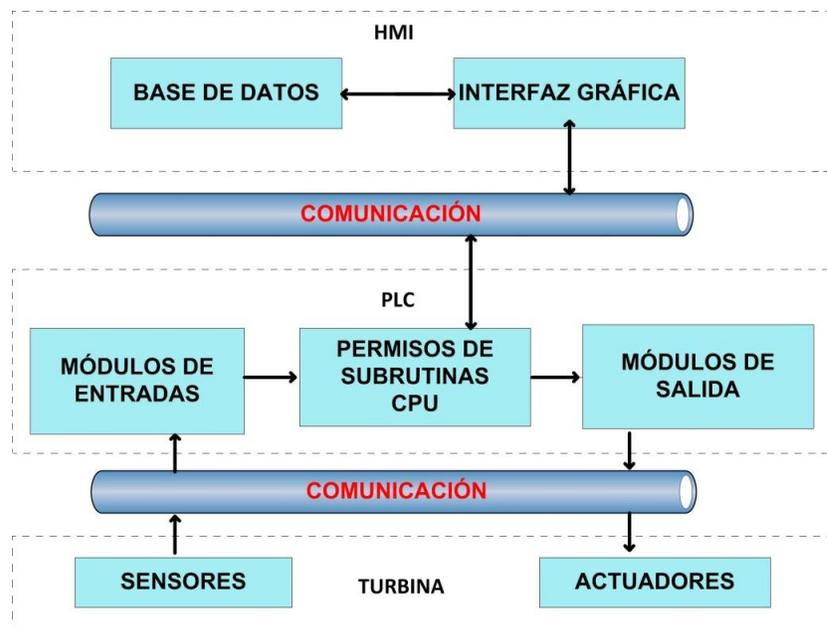
El capítulo en sus inicios propone una visión general del proyecto para lograr el control del arranque y la protección de la turbina, así como las características de las principales variables. Además se presenta la instrumentación seleccionada y sus características técnicas. También se realiza un resumen de las herramientas disponibles en los *softwares* empleados para la programación del autómatas, diseño de los planos y presentación de la información en el HMI. Por último se muestran las secuencias y configuraciones implementadas en el PLC y en la interfaz gráfica, así como las conclusiones parciales de este capítulo.

### **2.1 Descripción General de la Propuesta de Modernización**

Este trabajo es parte del proyecto de modernización de la planta eléctrica del central “Elpidio Gómez”. Por razones prácticas y atendiendo a las necesidades de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas; se llevará a cabo parte de la modernización del sistema de protección y control, de una de las turbinas que conforma el grupo de generación.

En la fase de proyecto se seleccionará la instrumentación de campo, de acuerdo con las especificaciones técnicas que garantizan el correcto funcionamiento del equipo. Otra importante decisión es la selección del PLC y el HMI, respetando los compromisos comerciales del Taller de Automática de la empresa ZETI, con sus suministradores habituales.

En el proceso de modernización se conservarán todas las protecciones mecánicas e hidráulicas originales, incorporando redundancias electrónicas, capaces de actuar en instantes de tiempos inferiores a las diseñadas por el fabricante de la turbina. Estas protecciones electrónicas serán las encargadas de evitar cualquier daño y permitir la recuperación del sistema. Por su parte el control del arranque debe implementarse de acuerdo con los estándares y petición del cliente. Además deberá existir la posibilidad de una conexión bien definida entre la instrumentación de campo, el autómatas y la interfaz de usuario (Ver **Figura 2.1**). Al mismo tiempo existirá la comunicación entre los datos procesados por el PLC y el sistema SCADA de la planta eléctrica a través de un conmutador.



**Figura 2.1:** Estructura general de la modernización

En el PLC seleccionado se programarán las lecturas de las señales de campo y su escalado, la secuencia de arranque, protección y alarmas. En el HMI se diseñará la pantalla de presentación de las variables y el procesamiento de las alarmas. El personal de operación y de mantenimiento tendrá de esta forma la información necesaria en tiempo real, de una serie de parámetros indispensables para la correcta, eficiente y segura operación del equipo tecnológico.

## 2.2 Características Específicas de la Turbina

Las turbinas instaladas en “Elpidio Gómez” son de procedencia alemana, pertenecientes a la tercera generación y con capacidad de 1,5 MW (Ver **Anexo A-1**). Estos equipos son reconocidos por su robustez mecánica y buen desempeño. Todas las protecciones a las que se somete el equipo son de tipo mecánicas e hidráulicas.

Según los datos ofrecidos por el fabricante y las condiciones tecnológicas del proceso, en el **Anexo A-2** se muestran las principales mediciones a las que se somete el equipo. También se muestran los valores de operación, según los cuales existirán las señales de alarma y disparo.

Las bombas de rechazo e inyección del agua refrigerante tienen una potencia de 11 KW, con un voltaje nominal de 440 VCA trifásico. Conjuntamente la bomba auxiliar de aceite opera con igual voltaje nominal pero con una potencia de 8 KW.

### 2.2.1 Calentamiento y Arranque

El procedimiento de arranque de la turbina “SG 49/3/6” comienza con una verificación del nivel de aceite, en el cárter de la misma a través de la mirilla de cristal que tiene el recipiente. Luego se abren todos los *by-pass* de las trampas y purgas de vapor directo y escape, además de purgar el cuerpo de la turbina. Es necesario llevar a cabo este procedimiento el mayor tiempo posible, para aumentar la temperatura del vapor directo en la línea de vapor a la planta eléctrica.

La bomba auxiliar de aceite a vapor debe ponerse en funcionamiento, aunque con anterioridad se pudiese estar trabajando con la bomba auxiliar de aceite eléctrica, para tener presión de aceite en la turbina y poder comprobar el funcionamiento de las válvulas de regulación y cierre rápido. Se sugiere que el arranque siempre debe producirse con la bomba auxiliar de aceite a vapor, aunque podría hacerse con la bomba eléctrica comprobándose las presiones de trabajo. Al unísono se debe comprobar que el variador de velocidad manual debe estar en su posición de mínima velocidad y la válvula de escape esté abierta para el sistema del central.

Otro paso es abrir las válvulas de *by-pass* de la válvula de vapor directo y comenzar a calentar la tubería hasta la válvula de cierre, posteriormente se abre la válvula de vapor

directo a la turbina. Habiendo cumplido con las condiciones anteriores ya el equipo está listo para proceder al arranque y aceleración del mismo.

Con el aceite de lubricación a temperatura ambiente o algo mayor, puede impulsarse el turbo abriendo lentamente la válvula de cierre rápido. Esta debe tener una apertura que permita mantener durante 10 minutos una velocidad aproximadamente de 300 rpm. Después de transcurrido ese tiempo, la velocidad puede subirse a 600 rpm y mantenerla por un período de 15 minutos. En este tiempo el aceite de lubricación debe alcanzar la temperatura de 35°C, de no cumplirse esto la máquina tiene que continuar girando a 600 rpm. Cuando la turbina comienza a girar y la presión de aceite es la requerida entra en función la bomba principal de aceite y se puede desconectar la bomba auxiliar.

Luego de alcanzados los 35°C la velocidad se sube gradualmente hasta llegar a la velocidad mínima ajustada de 1600 o 1650 rpm al ir abriendo la válvula de cierre rápido, la cual se abre completamente durante 2 minutos. Entonces a través del variador de velocidad manual la rapidez de giro se eleva a 1800 rpm y se cierran los *by-pass* de las trampas de vapor directo y escape así como las purgas de vapor directo.

Con la turbina en funcionamiento, cuando la temperatura del aceite de lubricación alcance los 45°C a la entrada de los cojinetes, hay que poner en funcionamiento el agua refrigerante. La temperatura del aceite se controlará con la apertura de las válvulas de entrada y salida del agua al enfriador de aceite. Después de realizada esta puesta en funcionamiento se está en condiciones de proceder a dar carga a la turbina.

Cuando la puesta en marcha de la turbina se realiza después de paradas cortas estando la máquina caliente, se permite disminuir el tiempo de puesta en funcionamiento. Si la parada es prolongada, hay que observar todos los requisitos como para una puesta en marcha (Abella et al., 1998).

### **2.3 Equipamiento Empleado**

Los equipos seleccionados pertenecen a más de un proveedor, siempre respetándose la total compatibilidad entre los distintos elementos que conforman el proyecto. Los sensores trasmisores de presión forman parte de la reconocida marca alemana Siemens, líder en el mundo en este campo. La instrumentación encargada de la medición e indicación local

dígase manómetros, sondas Pt100, termómetros y sensores ON-OFF responden a la tutela de Wika e ITEC. Mientras el sensor de velocidad pertenece a Jaquet. Ver **Anexo A-3**.

Es preciso aclarar que en el mercado existen otras empresas competitivas cuyas ofertas dan solución a las necesidades del proyecto. Sin embargo, producto de la experiencia de trabajo, orden económico y de las exigencias comerciales impuestas por AZCUBA, quedaron determinados los proveedores. Ejemplo de ello fue la selección del PLC y del HMI, cuyas variantes eran amplias como se muestra en la **Tabla 2.1**.

FABRICANTES	PLC	HMI
MITSUBICHI	Serie Q	GOT serie 16
SIEMENS	S7-300	TP 177A
SCHNEIDER	Modicon M340	Magelis XBT GT 6340

**Tabla 2.1:** Variantes de autómatas y paneles táctiles

Dentro de las estrategias de automatización de la empresa ZETI existe un programa de estandarización y se ha decidido como norma para el control y supervisión de las turbinas usar la combinación ofertada por Schneider. Las propuestas anteriormente mencionadas pertenecen a las gamas medias ofertadas por los fabricantes. No se justifica el uso de una serie de gama alta pues las exigencias del proceso no lo requieren y encarecería el costo del proyecto.

### 2.3.1 Autómata y Terminal Táctil

Para la modernización de la automática del equipo tecnológico se precisa del uso de un HMI y un PLC, este último que lleve a cabo la recolección de toda la información que llegue desde los diferentes sensores. Además debe actuar sobre las variables manipuladas, detectar estados de alarmas, ejecutar las instrucciones lógicas secuenciales del arranque, parada y estado de emergencia. También debe transmitir toda la información a través de una red hacia un terminal táctil, para efectuar la supervisión del proceso.

Entre las gamas de autómatas de Schneider se encuentra la serie M340, escogida para el desarrollo de este proyecto por ser el equipamiento con que se cuenta en los almacenes de la empresa ZETI. En la **Figura 2.2** se muestra la arquitectura general del mismo, determinada por los diferentes módulos seleccionados de acuerdo con las características de

las señales que intervienen en el proyecto (Ver **Anexo A-4**). Los datos técnicos de cada componente de E/S, comunicación, alimentación y CPU se muestran en el **Anexo A-5**.



**Figura 2.2:** Arquitectura general del PLC seleccionado

#### Bastidores *BMX XBP 1200*

Los bastidores *BMX XBP* constituyen un elemento fundamental de las estaciones del PLC M340 de Modicon. Desarrollan funciones mecánicas donde se encargan de fijar todos los módulos de la estación del autómatas (módulo de alimentación, procesador, módulos de E/S binarias/analógicas y módulos específicos de la aplicación). Otra función es la eléctrica facilitando la alimentación necesaria para cada módulo en un solo bastidor y ofrece las señales de servicio y datos para la estación del PLC en su totalidad. Además, pueden fijarse en varias instalaciones como armarios, carcasas y paneles (Schneider, 2014l). Ver **Anexo A-5**.

#### Fuente de alimentación *BMX CPS 2010*

Los módulos de alimentación están diseñados para abastecer cada rack *BMX XBP* y a sus unidades. El dispositivo de alimentación se selecciona de acuerdo a la distribución de la red (continua o alterna) y de la potencia requerida. Están provistas de un fusible de protección conectado a la entrada de 24/48 V, situado dentro del módulo y es inaccesible (Schneider, 2014f). Ver **Anexo A-5**.

#### Unidad Central *BMX P34 2020*

Las CPUs Modicon M340 son procesadores de la plataforma de automatización, diseñados para controlar módulos de entradas/salidas binarias, módulos de entradas/salidas analógicas, otros módulos expertos y módulos de comunicación. Este procesador brinda rendimiento y capacidad creciente, que permite dar una respuesta correcta ante exigentes

necesidades. Se insertan en el conjunto del bastidor *BMX XBP*, gestionando toda la estación del PLC (Schneider, 2014j). Ver **Anexo A-5**.

#### Tarjetas de memoria *BMX RMS 008MPF*

Las tarjetas de memoria Schneider son las únicas compatibles con los procesadores *BMX P34*. Estas tarjetas pueden almacenar alrededor de 100000 ciclos de escribir/borrar (típico) y no necesitan batería para su operación. *BMX RMS 008MPF* se utiliza para guardar aplicaciones, páginas web y para almacenar archivos de usuarios, creados mediante bloques de funciones de gestión de archivos o archivos transferidos por FTP (Schneider, 2014k). Ver **Anexo A-5**.

#### Módulo de comunicación Ethernet *BMX NOE 0100.2*

*BMX NOE 0100.2* es un módulo de red para las comunicaciones en los sistemas Ethernet, con plataformas modulares de E/S basadas en el conjunto Modicon M340. Estos pueden insertarse en cualquier ranura del bastidor del componente de la estación *BMX XBP*. Transfiere datos entre dispositivos de red y permite a una CPU leer y escribir datos con regularidad en los dispositivos explorados. El explorador de E/S está configurado con *Unity Pro* (Schneider, 2014i). Ver **Anexo A-5**.

#### Módulo de entradas analógicas *BMX AMI 0810*

Es un módulo analógico de entrada de alta densidad con 8 canales aislados. Se utiliza junto con sensores o emisores; realiza funciones de vigilancia, medición y control continuo. *BMX AMI 0810* proporciona el rango para cada entrada, según la selección que se realice durante la configuración, funcionando con entradas de tensión y resistencias de lectura conectadas al bloque de terminales para posibilitar las entradas de corriente (Schneider, 2014c). Ver **Anexo A-5**.

#### Módulo de entradas para sensores de temperatura *BMX ART 0814*

Es un dispositivo multirango de adquisición con ocho entradas, las que disponen de separación de potencial entre ellas. Esta unidad proporciona varios rangos para cada entrada, según la selección que se realice durante la configuración. *BMX ART 0814* es un módulo de entradas diseñado para leer señales de los sensores de temperatura (Schneider, 2014e). Ver **Anexo A-5**.

### Módulo de salidas analógicas *BMX AMO 0410*

Es un módulo analógico de salidas de alta densidad con cuatro canales aislados. La naturaleza de las salidas ya sea por tensión o por corriente se configura por *software*. *BMX AMO 0410* proporciona el rango para cada salida, según la selección que se realice durante la configuración, funcionando con salidas de tensión y resistencias de escritura, conectadas al bloque de terminales para posibilitar las salidas de corriente. Este módulo queda de reserva para las señales de bajar y subir carga desde el panel de planta eléctrica (Schneider, 2014d). Ver **Anexo A-5**.

### Módulo de entradas digitales *BMX DDI 3202*

Es un módulo binario de 24 VCD conectado a través de un conector de 40 pines. Es un dispositivo de lógica positiva o común positivo. Los 32 canales de entrada reciben corriente de los sensores. Cuenta con un fusible de acción rápida de 0,5 A por cada grupo de 16 canales (Schneider, 2014g). Ver **Anexo A-5**.

### Módulo de salidas digitales *BMX DDO 3202*

Es un módulo binario de 24 VCD conectado a través de un conector de 40 pines. Es un módulo de lógica positiva o común positivo. Los 32 canales de salida proporcionan corriente a los preactuadores. Además tiene incorporado un fusible de acción rápida de 2 A por cada grupo de 16 canales externo (Schneider, 2014h). Ver **Anexo A-5**.

### Panel de operador táctil *XBT GT 6340*

Máquinas táctiles de destino sumamente flexibles, se configuran y controlan según sus necesidades. Especialmente diseñados para utilizarse en entornos severos, proporcionan una sensación de control óptima en la pantalla táctil. Programable de forma sencilla a través del *software Vijeo Designer* (Schneider, 2015). Ver **Anexo A-5**.

### Conmutador *TCS ESM 083F23F1*

Conmutador gestionable de ocho puertos para par trenzado. El espejo de puertos está deshabilitado de manera predeterminada. El puerto 8 se define como el puerto de destino y los puertos del 1 al 7 se seleccionan como puertos de origen. Se puede habilitar el espejo de puertos y cambiar la selección de origen que se desee reflejar (Schneider, 2014m). Ver **Anexo A-5**.

Fuentes monofásicas *ABL8RPS24100* y *ABL8REM24030*

La gama *Phaseo* con su oferta de fuentes de alimentación *ASI ABL* está diseñada para suministrar la tensión constante necesaria para sistemas de cableado *AS-Interface*. Son de tres tipos y cumplen todos los requisitos de recinto y gabinete que se encuentran en las aplicaciones industriales (Schneider, 2014b), (Schneider, 2014a). Ver **Anexo A-5**.

### 2.3.2 Instrumentación de Campo

La instrumentación de campo constituye un elemento fundamental en el proceso de modernización, ya que facilitan la recolección de la información para su procesamiento posterior. Por lo tanto de la correcta selección de los instrumentos dependerá, en gran medida, la calidad del resultado final.

Antes de seleccionar el equipamiento de campo, se tuvo en cuenta las características del proceso vistas en el epígrafe 2.2. Los instrumentos escogidos cumplen con los rangos de mediciones y seguridad de las variables. Al mismo tiempo soportan las condiciones de operación de la turbina. A continuación se presentan los equipos seleccionados:

Sensores transmisores de presión *SITRANS P DS III*

Los modelos de la serie *SITRANS P DS III*, son transmisores de presión digitales disponibles en diversas variantes para la medida de presión relativa, presión absoluta, presión diferencial, nivel, nivel de masa, nivel volumétrico, caudal volumétrico y caudal de masa. Pueden montarse dentro de zonas con riesgo de explosión y en sectores industriales con altas exigencias mecánicas y químicas. Cuentan con varios parámetros ajustables localmente: principio y final del rango de medida, amortiguación eléctrica, ajuste del cero, función como generador de corriente de valor fijo, corriente de fallo, bloqueo de los botones y protección de escritura. El rango de la medición es ajustable localmente o a distancia dentro del margen de medida. Los sensores trasmisores de presión diferencial 7MF4433 y presión relativa 7MF4033 fueron los seleccionados (Siemens, 2013a), (Siemens, 2013b). Ver **Anexo A-3**.

Conexión distribuidora de 2 vías 7MF9401-2F

El *manifold* de 2 vías 7MF9401-2F se utiliza para cerrar y purgar la tubería de fluido y para controlar el manómetro o el transmisor de presión conectado. Disponible para líquidos y

gases corrosivos. Con conexión por boquilla para el montaje adosado a manómetros y transmisores de presión relativa (Siemens, 2014b). Ver **Anexo A-3**.

#### Conexión distribuidora de 3 vías 7MF9411-5BA

Los *manifolds* de 3 vías 7MF9411-5BA están diseñados para transmisores de presión absoluta o diferencial. Estos se utilizan para cerrar las tuberías de medida y para controlar el cero del transmisor de presión. Están diseñados para líquidos y gases (Siemens, 2014a). Ver **Anexo A-3**.

#### Multiplexor MUX8PT-PTO

Este multiplexor es un conmutador electrónico (sin desgaste mecánico) de ocho canales para Pt-100, que permite seleccionar estáticamente las mismas, convirtiendo la temperatura captada en una señal de salida de corriente o voltaje según se seleccione. La familia de MUX8pt se puede interconectar mediante módulos expansores de hasta 96 canales a 24 VCD y 40 canales a 230 VCA. Aporta un considerable ahorro, tanto en convertidores de Pt-100 como en entradas analógicas del PLC. Dispone de configuración del rango de temperatura y la salida está aislada galvánicamente (Krenel, 2014b). Ver **Anexo A-3**.

#### Expansión MUX8PT-PTE

Es un módulo para expandir los multiplexores **MUX8PT-PTO** con sus mismas características técnicas y alimentación a través del bus de expansión (Krenel, 2014a).

#### Presostato PSD-30

Presostato electrónico con indicador LCD de 14 segmentos modelo PSD-30. La presión aplicada deforma una membrana convirtiendo dicha presión en una señal de conmutación o una señal eléctrica estandarizada y amplificada. Esta señal cambia proporcionalmente en función de la presión, permitiendo así su análisis (Wika, 2014a). Ver **Anexo A-3**.

#### Tacómetro universal 383Z-05318 de JAQUET

Rueda polar, partida y abrochable mediante tornillos a modo de brida de material ferromagnético y tratamiento superficial electro-galvanizado de acuerdo con el plano constructivo 120216 de JAQUET. Incluye un convertidor tacométrico con visualización (Jaquet, 2014). Ver **Anexo A-3**.

### Termómetros a dilatación de gas

Esta serie de termómetros está prevista para la utilización en construcciones de máquinas, de plantas de proceso y de recipientes. Los termómetros a dilatación de gas con capilar se utilizan sobre puntos de medición de acceso difícil y para medidas a distancia. Para una adaptación óptima al proceso existen variadas longitudes de inmersor al proceso. Los termómetros tienen un alto grado de protección y pueden instalarse al aire libre, también con temperaturas bajo cero. Es posible su utilización en condiciones de altas vibraciones (Wika, 2014c). Ver **Anexo A-3**.

### Sondas Pt100

Se emplean para medir la temperatura con termorresistencias, se basa en la característica que tienen todos los materiales de cambiar su resistencia según la temperatura. Conexión a tres hilos (Wika, 2013). Ver **Anexo A-3**.

### Termómetro bimetalico combinado

Los termómetros de esta serie son adecuados para el uso en tuberías, depósitos, instalaciones y máquinas. Reúnen dos sistemas de medición en un instrumento. Permite visualizar el valor de medida *in situ* sin alimentación auxiliar y la resistencia Pt100 incorporada entrega una señal eléctrica para que sea procesada. Es recomendable para aplicaciones de seguridad crítica (Wika, 2014b). Ver **Anexo A-3**.

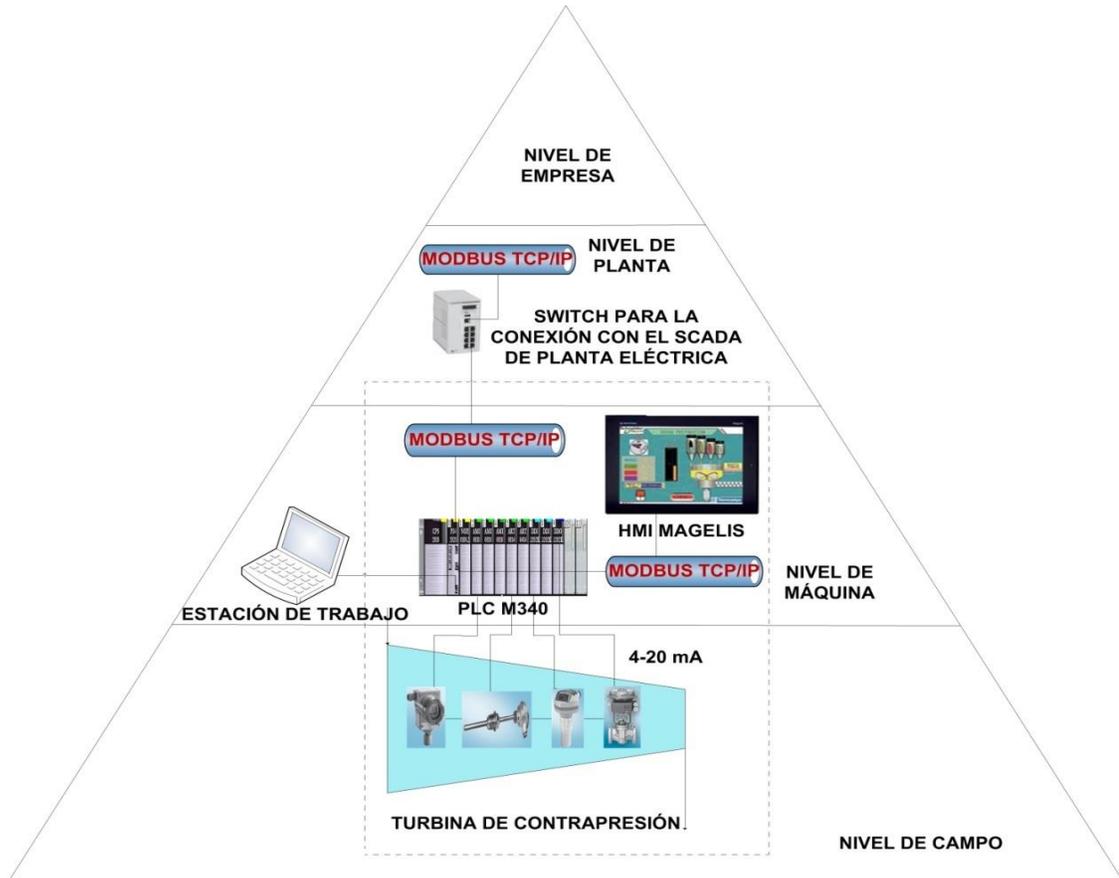
### Manómetro

El P-600 encuentra su aplicación en cualquier sitio donde se debe realizar una indicación *in situ*. Manómetro de alta calidad diseñado para usos generales en aplicaciones extremas para indicar presión de fluidos corrosivos y donde las condiciones atmosféricas sean agresivas (Itec, 2013). Ver **Anexo A-3**.

## 2.4 Estructura y Herramientas Para la Modernización de la Turbina

La arquitectura para el sistema de protección y control según las necesidades reales en la modernización de la turbina, es una combinación de red a partir de PLC y HMI. Este último es el responsable de ejecutar la supervisión y la presentación de los datos a nivel de máquina. En la **Figura 2.3** se muestra de forma esquemática la pirámide de automatización.

La interconexión de los actuadores, los sensores, el PLC y el sistema de supervisión a través del terminal táctil requieren del uso de sistemas de comunicación a partir de una red industrial. La red es la que garantiza que el intercambio entre sus componentes se realice de forma rápida y eficiente, cumpliendo con los niveles de la estructura de la pirámide de automatización.



**Figura 2.3:** Pirámide de Automatización

Entre los elementos de campo y el autómatas la recopilación de la información se lleva a cabo por medio de hilos de dos vías apantallados de 4 a 20 mA y señales on-off. La transferencia de datos entre la estación de trabajo y el PLC es por medio USB. Opcionalmente también se puede ejecutar vía Ethernet, mientras que la interacción PLC-HMI es por vía Modbus sobre TCP/IP.

### 2.4.1 Comunicación Modbus en el Perfil TCP/IP

El protocolo de comunicación se seleccionó teniendo en cuenta la capacidad del autómatas y del panel para comunicarse bajo las condiciones Modbus. La serie M340 y Magelis presentan compatibilidad a partir de los estándares definidos por dicho protocolo.

Modbus es un protocolo de mensajes de la capa de aplicación. Proporciona comunicaciones de cliente y servidor entre dispositivos conectados a diferentes tipos de buses o redes. Ofrece servicios específicos mediante códigos de función (Song-feng, 2010). Existen dos tipos de transmisión, basados en la información de la capa física:

MB/serie: tipo Modbus que transmite datos a través de las series RS-232 y RS-422/485

MB/TCP: tipo Modbus que transmite datos a través de Ethernet, variante a utilizar.

Desde 1979, Modbus ha sido el estándar de la industria de los protocolos de conexión serie. Millones de dispositivos de automatización lo utilizan en las comunicaciones (Chumbiauca Cabezas, 2013). En Ethernet, el puerto TCP 502 está reservado para Modbus.

Los mensajes Modbus se pueden usar para intercambiar datos de automatización en TCP/IP Ethernet e Internet, también para el resto de las aplicaciones (intercambio de archivos, páginas web, correo electrónico, etc.). La sencilla estructura permite descargar las especificaciones y el código fuente de muchos dispositivos que usan el protocolo TCP/IP (Ruiz Olaya et al., 2011). Estos elementos están disponibles en el sitio web Modbus-IDA ([www.modbusida.org](http://www.modbusida.org)).

La conexión puede abrirse mediante el PLC local o por una estación remota que desea comunicarse con el PLC local. Las conexiones se caracterizan por el par: (puerto TCP local, dirección IP local; puerto TCP remoto, dirección IP remota). La gestión de conexiones es transparente al usuario (Correa and Manjarres, 2013). Ver **Anexo A-6**.

La transmisión se realiza según el estándar 10/100 Base-T, que es una adaptación del estándar IEEE 802.3 Ethernet, utiliza conductores de par trenzado con una longitud máxima de segmento de 100 m y termina en un conector RJ45. Una red 10/100 Base-T es capaz de transmitir datos en redes Ethernet normales (10 Mbit/s) y Fast Ethernet (100 Mbits/s).

### 2.4.2 *Software* Empleado en la Programación del PLC M340

*Unity Pro* es un *software* común de programación, puesta a punto y explotación para la plataforma Modicon. Recoge todas las ventajas de los *software* PL7 y Concept ofreciendo un conjunto completo de nuevas funciones para obtener más productividad y apertura hacia otros *software*. Según la norma IEC61131-3 proporciona varios lenguajes de programación para crear los programas de usuario: Diagrama de bloques de funciones (FBD), Lenguaje de diagrama de contactos (LD), Lista de instrucciones (IL), Texto estructurado (ST) y Control secuencial *Grafcet* (SFC).

Gracias a las variables independientes de la memoria, a los datos estructurados y a los bloques de función de usuario, los objetos de la aplicación son un reflejo directo de los componentes específicos del procedimiento automatizado. A partir de bibliotecas gráficas, las pantallas del operador de *Unity Pro* se pueden configurar por el usuario en la aplicación.

La puesta a punto y el mantenimiento se facilitan gracias a los objetos gráficos animados. Para el diagnóstico una ventana de visualización muestra, de forma clara y cronológicamente, con fechado en la fuente, todos los fallos del sistema y de la aplicación. La función de navegación para buscar la causa del fallo permite volver a la fuente de las condiciones que faltan (Schneider, 2013a).

Algunas de las características básicas requeridas por el *software* para su instalación son:

- **Sistema operativo:** Microsoft Windows / Windows 7 Profesional de 32/64 bits.
- **Procesador:** 2.4 GHz o mayor. Se recomienda 3.0 GHz.
- **RAM:** 2 GB mínimo; recomendado 3 GB.
- **Espacio en disco:** Mínimo 8 GB. Se recomienda 20 GB.
- **Explorador Web:** Microsoft Internet Explorer 6.0. Se recomienda la versión 7 o superior.

El ambiente de trabajo en *Unity* responde a una interfaz de usuario estructurada y funcional, capaz de facilitar el desarrollo de múltiples proyectos cualesquiera que fuese su complejidad (Ver **Figura 2.4**). La ventana principal contiene los elementos:

**Barra de menú (1):** Ofrece una lista de operaciones o procedimientos como Guardar y Abrir un proyecto. Existen tres tipos específicos: principales o desplegables, submenús y contextuales o emergentes.

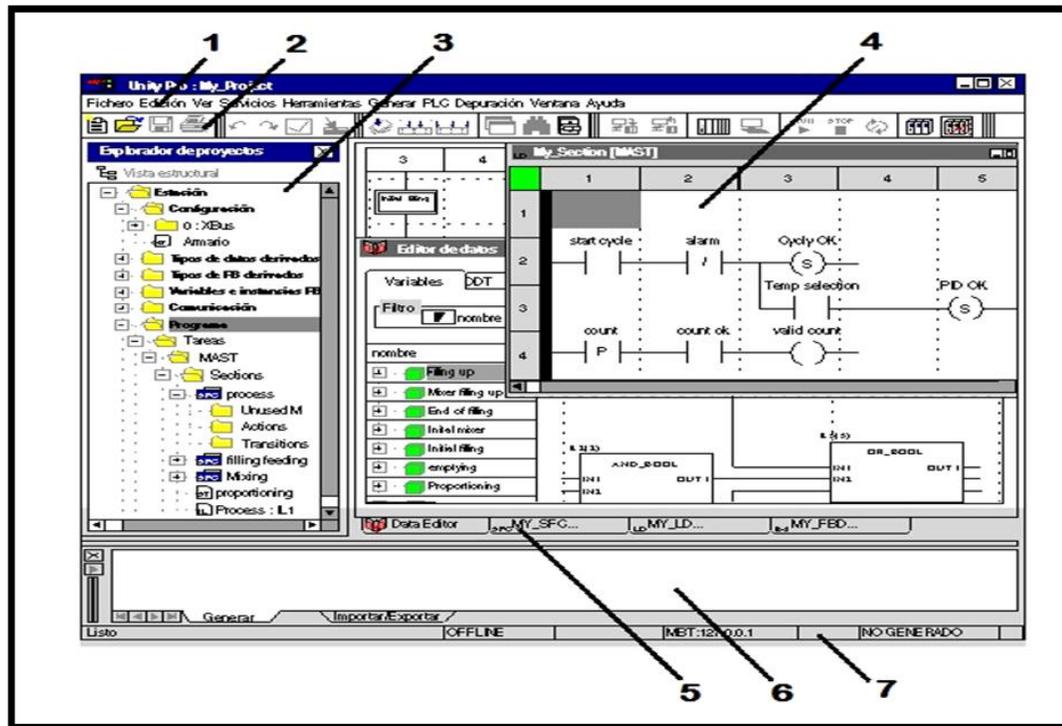


Figura 2.4: Ventana ilustrativa del entorno de desarrollo *Unity Pro*

**Barra de herramientas (2):** Sirve para facilitar la localización y ejecución de las funciones más frecuentes. En lugar de desplegar un menú y seleccionar el comando correspondiente, en las barras de herramientas basta con hacer clic sobre el símbolo pertinente para ejecutar el comando deseado. El *software* pone a su disposición diversas barras de herramientas estándar. Además, es posible crear barras de herramientas propias.

**Explorador de proyectos (3):** Permite desplazarse por el proyecto a través de la vista estructural o funcional del árbol de directorios. El navegador de proyectos permite visualizar el contenido de un proyecto *Unity Pro* y desplazarse por los distintos elementos: configuración, datos, programa, etc. Para hacerlo, puede visualizar el proyecto de dos maneras distintas: la vista estructural o la vista funcional.

**Ventana de editor (4):** Editores de lenguajes de programación, editor de datos, etc.

**Fichas (5):** Facilita el acceso directo a la ventana del editor.

**Ventana de resultados (6):** Proporciona información acerca de los errores producidos, del seguimiento de señales, de las funciones de importación, etc. Muestra información sobre los diferentes procesos (generar, importar/exportar, error de usuario, buscar/reemplazar). Es

una ventana anclada y de manera predeterminada aparece en la parte inferior de la ventana de *Unity Pro*.

**Barra de estado (7):** Brinda información sobre el proyecto actual en la PC, el PLC y el estado del *software*.

### 2.4.3 *Software a Utilizar Para la Programación del Terminal Táctil Magelis*

*Vijeo Designer* es un *software* para crear proyectos de interfaz hombre-máquina (IHM) desarrollado por Schneider Electric. Las versátiles funciones de animación de *Vijeo Designer* facilitan la creación de pantallas. De esta forma, proporciona una amplia gama de componentes multiusos, objetos gráficos y animaciones que se puede configurar rápidamente, con los que se trabaja de forma segura en el desarrollo de la interfaz gráfica. También se puede crear con facilidad paneles estándares para operaciones, control, monitoreo, paneles de ventanas emergentes y paneles de alarmas (Schneider, 2013b).

Algunas de las características básicas requeridas por el *software* para su instalación y correcto funcionamiento son:

- **Plataforma:** PC
- **CPU:** Se recomienda Pentium 4 a 2 GHz o más rápido.
- **Memoria:** Mínimo de 1 GB. Se recomienda 2 GB o más.
- **Espacio disponible en el disco:** 2 GB o más en el disco duro.
- **Sistema operativo:** Microsoft Windows XP Profesional, Service Pack 2 o superior; Microsoft Windows 7, 64 bits.
- **Explorador Web:** Microsoft Internet Explorer 6.0. Se recomienda la versión 7 o superior.

Para crear proyectos de forma eficaz, *Vijeo Designer* (Ver **Figura 2.5**) usa varias ventanas llamadas herramientas. Cada ventana muestra información relacionada con el proyecto y los objetos con los que se está trabajando. Además se puede cambiar el tamaño, desplazarlas, mostrarlas u ocultarlas. Estas suelen ser:

**Ventana navegador:** Muestra la información sobre el proyecto seleccionado en una estructura de árbol. Esta herramienta se utiliza, principalmente, durante el desarrollo de un proyecto. Puede definir los valores para la máquina de destino, el equipo, la operación de descarga, las alarmas y las variables.

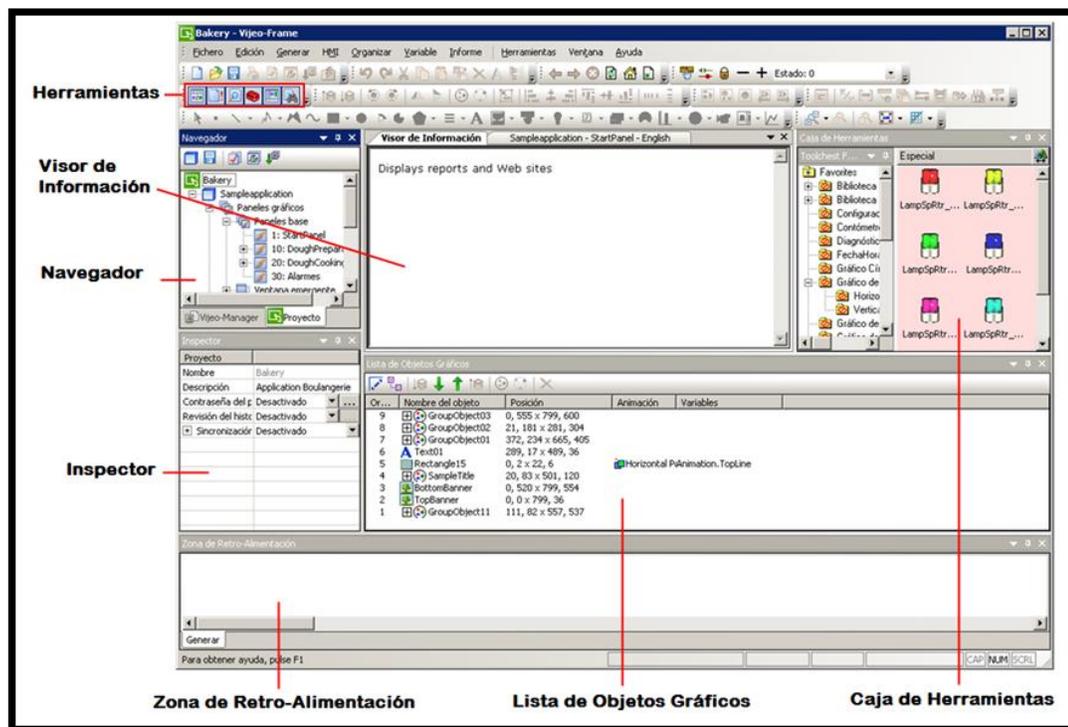


Figura 2.5: Ventana ilustrativa del entorno de desarrollo *Vijeo Designer*

**Ventana inspector de propiedades:** Muestra las propiedades de un objeto seleccionado y permite editar las mismas. Si se seleccionan varios objetos al mismo tiempo, la ventana de herramientas solo muestra los valores comunes a todos los objetos seleccionados.

**Ventana visor de información:** Muestra los informes cuando se usa la función Informes y para navegar por la Web.

**Ventana caja de herramientas:** Muestra los objetos y los gráficos. En la caja de herramientas se almacena cualquier objeto creado, como gráficos, paneles, scripts, grupos de alarmas y cadenas de caracteres. Se puede importar o exportar todas las carpetas de la Caja de Herramientas para compartirlas con otros diseñadores.

**Ventana lista de gráficos:** Muestra una lista de los gráficos en el panel actual con la información siguiente: orden del dibujo, nombre del objeto, coordenadas x;y, animación y variables. Un objeto seleccionado aparecerá resaltado en la Lista de objetos gráficos. Si se agrupan los objetos, la Lista de objetos gráficos mostrará el grupo de objetos y los objetos individuales del grupo.

**Ventana zona de retroalimentación:** Muestra los mensajes de error y el progreso de las operaciones de validación, compilación y descarga. Si sucede algún problema, la ventana mostrará los errores en rojo y las advertencias en amarillo.

#### 2.4.4 *Software* Empleado en el Diseño de los Planos de Conexión y Montaje del Panel

*AutoCAD* es un paquete de diseño asistido por computadora que permite analizar y ver acabados los proyectos en dos dimensiones y tres dimensiones, paso a paso, por secciones, y a diferentes escalas antes de realizarlos definitivamente. Cualquier arquitecto, eléctrico, mecánico e ingeniero en general, puede ver y desarrollar instantáneamente, tal como se les vaya ocurriendo las nuevas ideas, conceptos y posibilidades de mejorar un proyecto mediante el uso del *AutoCAD* (López Lucas and Breña Calvo, 2014).

En la confección de los planos se empleó la versión 2013 del *software* en cuestión, así como las bibliotecas destinadas al desarrollo de esquemas eléctricos. La empresa ZETI tiene definida una plantilla conformada por el cajetín con el nombre del plano, el número identificador del proyecto, el número del plano, el autor y la fecha de realización.

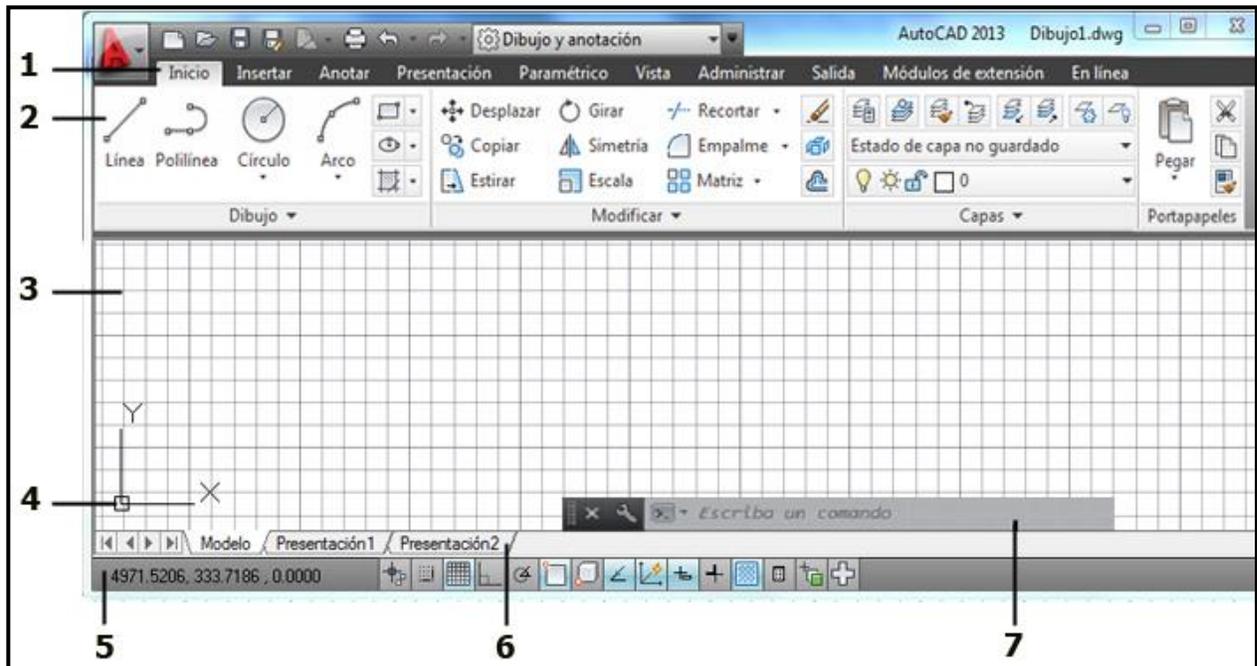
Para la instalación del *software* se requiere de:

- **Sistema operativo:** Microsoft Windows / Windows 7 Profesional 32/64 bits.
- **Procesador:** Intel Pentium4 o Doble Núcleo a 1.6 GHz o superior. Se recomienda 3.0 GHz.
- **RAM:** 2 GB, se recomienda 4 GB.
- **Espacio en disco:** Mínimo 6 GB de espacio libre en disco para la instalación.
- **Navegador web:** Microsoft Internet Explorer 7.0 o posterior.

El ambiente de trabajo está determinado por varias regiones dispuestas para facilitar el desarrollo de los proyectos (Ver **Figura 2.6**). Algunas de estas son:

**Barra de menú (1):** En esta barra aparecen una serie de menús desplegables que contienen la mayoría de los comandos y utilidades de *AutoCAD*.

**Barras de herramientas (2):** Estas barras son flotantes y el usuario las puede situar en cualquier parte de la pantalla. En las mismas aparecen los comandos más importantes para el trazado y para modificar los dibujos. Igualmente que el resto de los botones si el usuario sitúa el puntero encima del botón se activa el nombre del mismo.



**Figura 2.6:** Ventana principal del entorno de desarrollo *AutoCAD*

**Área de trabajo (3):** Espacio donde se desarrollan los proyectos, cuyo color de fondo por defecto es negro pero puede ser modificado.

**Sistema de coordenadas (4):** Representa la posición de cada punto sobre el plano o entorno de trabajo.

**Barra de estado (5):** Esta barra ofrece las coordenadas del cursor en todo momento además ofrece la posibilidad de con determinados botones ver y controlar el estado de ciertos modos de trabajo tales como el forzado del paso del cursor (SNAP), la forma y tamaño de la rejilla o (GRID) la forma ortogonal de trazado (ORTHO) o movimientos del cursor etc. Mediante un clic derecho sobre cualquiera de estos botones se accede a una ventana mediante la cual se pueden personalizar los valores de los parámetros que controlan estos modos de trabajo.

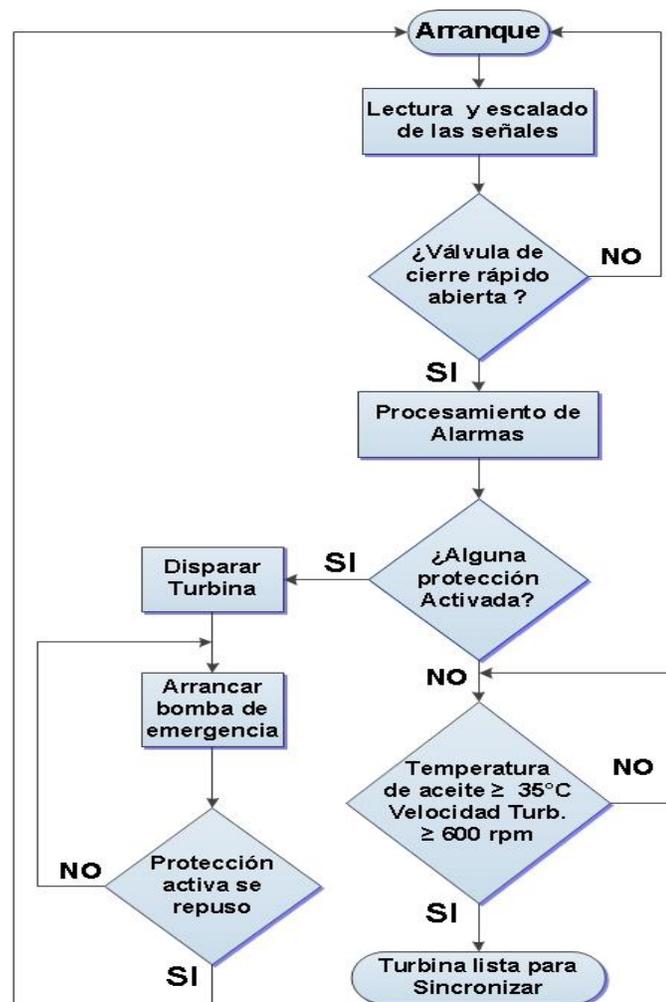
**Fichas (6):** Facilita el acceso directo a las distintas capas que conforman el proyecto.

**Barra de comandos (7):** Mediante esta barra el usuario interactúa con el sistema tecleando los datos necesarios para la ejecución de los comandos.

## 2.5 Programación de la Secuencia de Arranque y Protección

El equipo tecnológico tiene particularidades específicas que determinan la operación del mismo. Mantiene muchos elementos mecánicos por diseño e interés del cliente que deben ser respetados; lo que no permite un arranque de la turbina completamente automático y por tanto requiere de la intervención del ser humano. Un ejemplo de ello es la válvula de cierre rápido que luego de alcanzar la presión de aceite de seguridad tiene que ser abierta manualmente.

La programación del arranque de la turbina en el autómatas se realiza de acuerdo con el diagrama de flujo mostrado en la **Figura 2.7**. Con anterioridad se deben haber cumplido todas las operaciones previas por parte del operador descrito en el subepígrafe 2.2.1.



**Figura 2.7:** Diagrama de flujo del arranque

Una vez lista la turbina para el arranque el autómata lee y procesa las señales que vienen del campo y si la válvula de cierre rápido está cerrada no permite el arranque, pero por el contrario si la válvula está abierta vela la existencia de alarmas y chequea que no exista ninguna condición de falla. Cuando el resultado es favorable, la temperatura del aceite de lubricación debe exceder los 35°C y la velocidad ser mayor-igual a las 600 rpm para permitir sincronizar la turbina con el generador. En caso de que la temperatura o la velocidad necesaria no sean alcanzadas, el sistema se mantendrá operando a la velocidad definida hasta que se cumpla esta condición y se pueda aumentar.

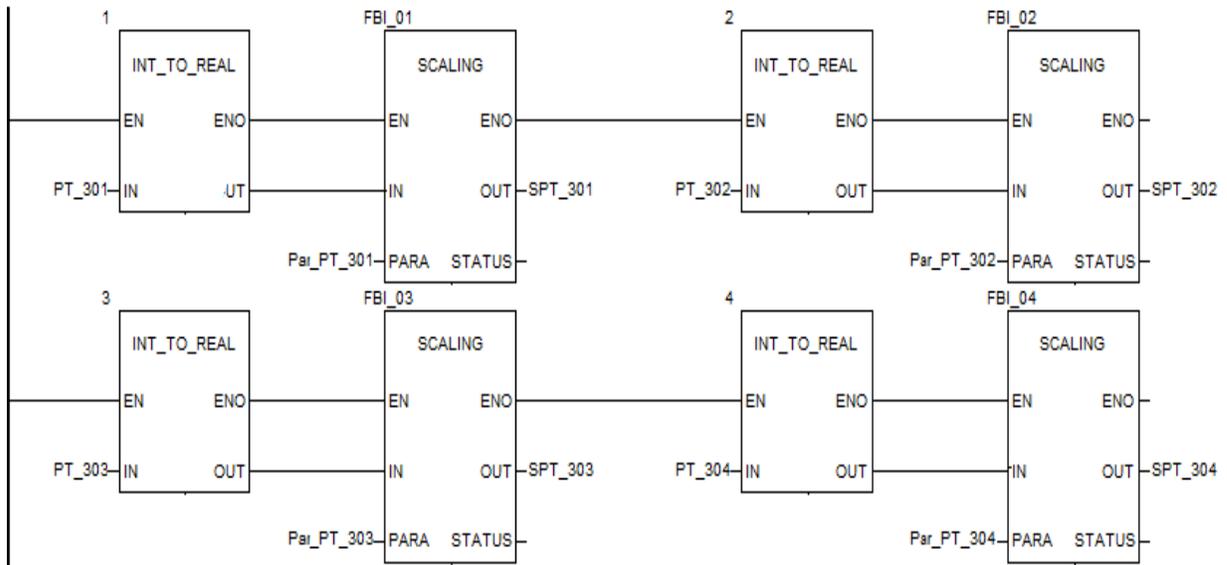
En caso de que alguna protección se encuentre activa la turbina será disparada al instante, activando la bomba de aceite de emergencia. Si la protección que fue activada se repone transcurrido un tiempo la turbina quedará libre para un nuevo arranque, si no, se mantiene la bomba auxiliar de aceite encendida.

### 2.5.1 Lectura y Escalado de las Variables

En la secuencia de lectura y escalado de las variables de medición, se convierten los valores enteros a reales según el bloque IN\_TO\_REAL para tener un mayor grado de exactitud. Luego se escalan las mediciones coincidiendo con el dato del sensor que lo genera a través del bloque de función SCALING. Este bloque se rige por la ecuación:

$$Salida = (IN - in_{mín}) * \left( \frac{out_{máx} - out_{mín}}{in_{máx} - in_{mín}} \right) + out_{mín} \quad (1)$$

Tomando como ejemplo la presión del vapor directo PT-301; el transmisor que genera dicha señal es calibrado de 0-40 Kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup> y la variable es manejada y presentada en el PLC y HMI respectivamente dentro del rango 0.00-40.00 y no en unidades del conversor. Este proceso se le realiza a cada una de las señales analógicas que intervienen en el proyecto, considerando la conexión de los bloques funcionales que se ilustran en la sección del programa en esquema de contactos, de la **Figura 2.8**.



**Figura 2.8:** Sección de programa para la lectura y escalado de señales

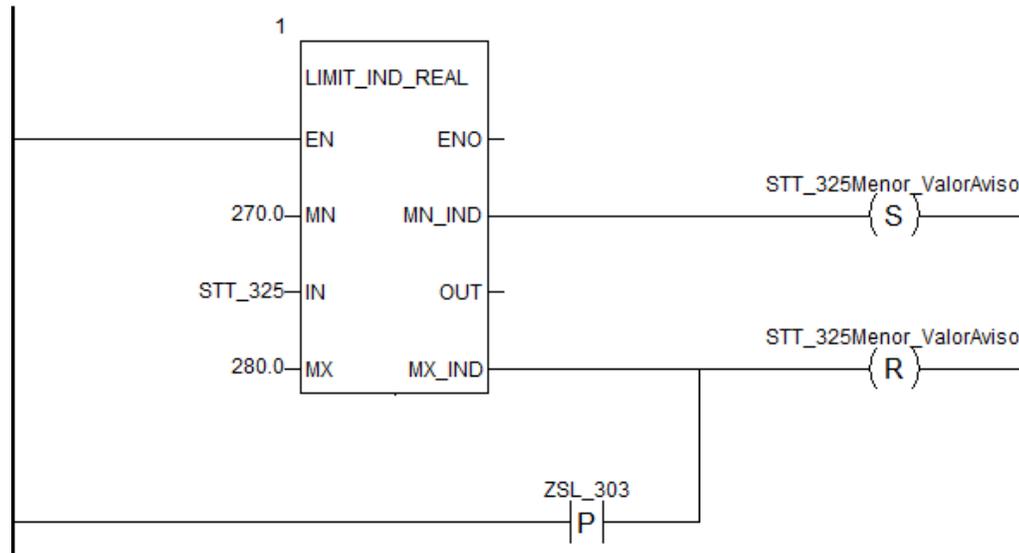
### 2.5.2 Programación de una Secuencia de Alarmas

Cuando los parámetros de operación de la turbina se alejan de los valores nominales, tienen que ser informados al operador con un margen suficiente que permita tomar decisiones correctivas. El aviso se produce como una medida que anticipa a los disparos, con el objetivo de impedir la ocurrencia de estos o solo para informar de algún mal funcionamiento. Algunas de las principales advertencias a tener en cuenta son las temperaturas de los cojinetes tanto de la turbina como del generador, el nivel del tanque de aceite, la baja presión del agua refrigerante y todas las variables que producen disparos, entre otras.

Las alarmas tanto por alta como por baja deben garantizar una banda de tolerancia para el restablecimiento, esto debe realizarse para garantizar un funcionamiento continuo del equipo. En la aplicación se ha decidido utilizar bloques de limitación con indicación de máximo y mínimo, como los que se usan en la programación de las secuencias de protección en el subepígrafe 2.5.3.

La alarma por baja temperatura de vapor directo a la entrada de la turbina, se genera cuando al introducir en un bloque de limitación la variable STT-325, se encuentra por debajo del rango establecido para generar el aviso (Ver **Figura 2.9**). Este rango es previamente acordado con el cliente final y permite que el personal de operación tenga tiempo suficiente

para ejecutar acciones que eviten el disparo. Todas las advertencias se presentarán a través de un generador de caracteres en la parte inferior de las pantallas del HMI. El mensaje de alerta es retirado por la reposición de la condición que lo generó o porque se encuentre cerrada la válvula de cierre rápido.



**Figura 2.9:** Programación de la alarma por baja temperatura de vapor directo

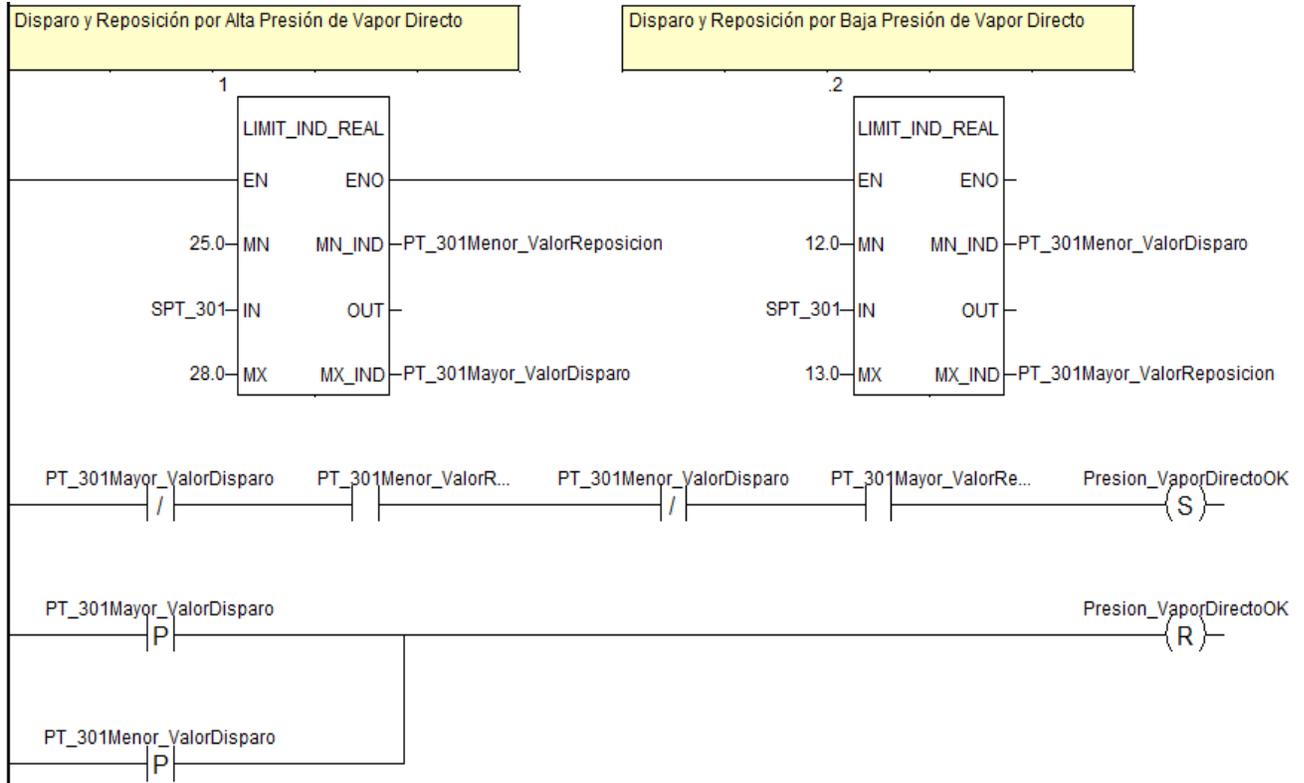
### 2.5.3 Programación de una Secuencias de Protección

Según los requerimientos técnicos del fabricante la turbina debe ser protegida por alta y baja presión del vapor directo, alta y baja temperatura del vapor directo y baja presión de aceite de lubricación. También por alta temperatura del aceite de lubricación, sobre-velocidad y baja temperatura del aceite de lubricación durante el arranque.

Todas las protecciones tanto por alta que por baja deben garantizar una banda de tolerancia para la reposición después que se produzca un disparo por alguna de las señales antes mencionadas. Para la aplicación se ha decidido utilizar un bloque de limitación con indicación de máximo y mínimo llamado LIMIT\_IND\_REAL.

La protección por alta presión de vapor directo consiste en introducir a un bloque de limitación la variable escalada SPT-301 y chequear si se sale del rango establecido. Este coincide con el límite de presión admitido por el proceso como máximo y como mínimo el valor de reposición. Luego a través de una lógica de contactos se define el estado de funcionamiento correcto e incorrecto. Ver **Figura 2.10**. Esta misma lógica se sigue para

todas las protecciones restantes. Ver **Anexo A-7** donde además se muestra el resumen de las condiciones de protección antes mencionadas y la lógica de disparo según la cual se protege la turbina.



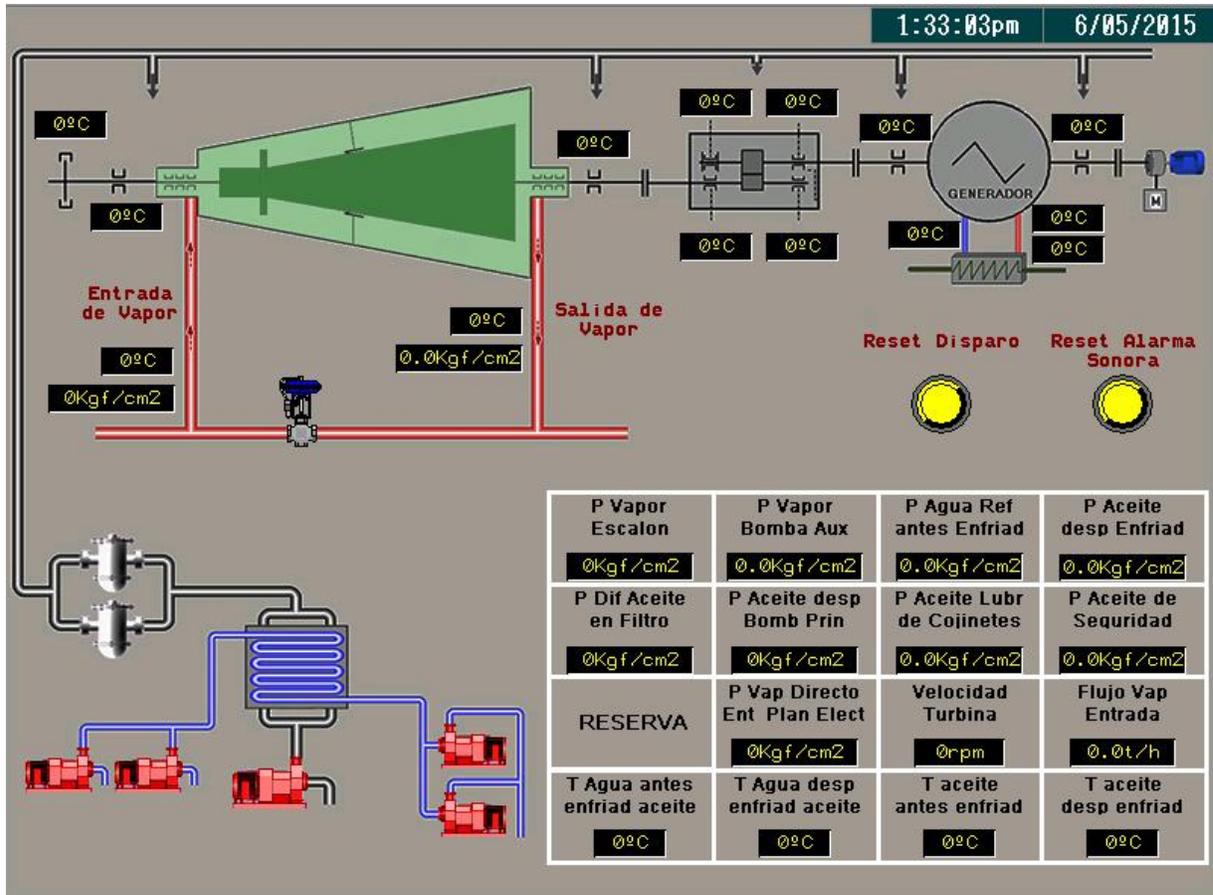
**Figura 2.10:** Programa para la protección por alta y baja presión de vapor directo

## 2.6 Presentación de las Variables en el HMI

El terminal táctil se encontrará situado en el panel de control de arranque y protección a pocos metros de la turbina. En el mismo se muestran las mediciones de presión, temperatura, velocidad y flujo. Además se incorpora la fecha, la hora, una cinta de alarmas y una indicación lumínica en forma de sirena para señalar el estado de disparo. La pantalla posee también botones para el *reset* de los disparos y la alarma sonora. Mientras el funcionamiento de las bombas de inyección y rechazo se indica con un cambio de color en el dibujo que las representa. Ver **Figura 2.11**.

El diseño de la interfaz se realiza con el *software Vijeo Designer* descrito en el subepígrafe 2.4.3. Las variables que intervienen en la programación de la dinámica de la pantalla son vinculadas desde el PLC a través de la operación Vincular Variables, una de las tantas

opciones que permite este *software*. Esta operación puede ser realizada producto de la compatibilidad que existe entre el autómatas y la pantalla táctil al pertenecer al mismo fabricante. Ver **Anexo A-8**.



**Figura 2.11:** Pantalla principal diseñada para el HMI

El entorno de la interfaz se concibió con colores que no cansen la vista pero a la vez que contrasten y eviten errores a la hora de la lectura de los datos. Las tuberías se representan con tonalidades que ayudan a interpretar el proceso y se distribuye el contenido de la pantalla sobre los elementos de la turbina para facilitar la comprensión de la información (Aguilar and Valencia, 2012).

## 2.7 Consideraciones Finales del Capítulo

El diseño propuesto para la modernización de la turbina, combina de forma consecuente el empleo del *software* y hardware necesario para el funcionamiento de la misma. Mientras el

uso de la combinación PLC-HMI facilita la operación de la máquina bajo un mayor grado de seguridad e interacción con el operador.

Partiendo de lo logrado es necesario realizar pruebas de comprobación del funcionamiento y la comunicación entre el autómata y el terminal táctil, así como la simulación de las alarmas y disparos.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### Introducción

En este capítulo se lleva a cabo el análisis de las pruebas realizadas al diseño propuesto, tanto a la comunicación y operación entre el PLC y el HMI, como al procesamiento de las alarmas. También se efectúan comprobaciones de funcionamiento al panel diseñado para gobernar el control y protección del arranque de la turbina. Se efectúa la descripción de los planos diseñados para la modernización. Además se realiza un análisis económico para determinar la factibilidad del proyecto, así como un análisis del impacto medio-ambiental y las normas de Protección e Higiene del Trabajo.

### 3.1 Planos Elaborados en el Proceso de Modernización

Para la fabricación del panel como parte del proyecto, se diseñaron los planos de la documentación técnica. En estos se refleja la conexión y montaje de todos los elementos del panel e incluye algunos componentes de automatización y control.

Entre los planos se encuentran los de funcionamiento correspondientes a: la distribución de alimentación de corriente alterna (220 VCA); la distribución de alimentación de corriente directa (24 VCD); la conexión de cada uno de los módulos que conforman la arquitectura del PLC con la instrumentación de campo; el cableado del multiplexor, del panel de operador y del sensor de velocidad; además de otros circuitos de mando que se manejan en este sistema de control de arranque y protección. Algunos de estos planos se encuentran en el **Anexo B-1**.

En los planos de montaje eléctrico se representa la ubicación física de cada uno de los elementos que conforman el panel, las etiquetas identificativas, así como las perforaciones necesarias para el montaje.

En el plano de alimentación de 220 VCA se muestra la distribución de corriente a los diferentes componentes o circuitos como son: el conector de alimentación, los transmisores de campo activos, la alarma sonora, la bomba de parada por emergencia, la alimentación del ventilador y la indicación lumínica de voltaje alterno en el panel. Mientras en el plano de 24 VCD queda determinada la manera de alimentar los módulos del PLC, el presostato, el sensor de velocidad, el multiplexor, el panel del operador y la alarma lumínica.

En el esquema del multiplexor se representa su alimentación, la conexión con su expansión, así como el cableado al PLC y desde las Pt100 correspondientes. Por otra parte en los planos de los módulos de E/S, tanto analógicas como digitales, quedan explícitas las conexiones de las distintas señales de operación del sistema.

### **3.2 Procedimientos y Pruebas del Panel de Control**

La construcción del panel comienza cuando el operario procede a trazar y marcar dónde se harán las perforaciones para el montaje de los componentes, con ayuda del Plano de Montaje Eléctrico. Aquí se hace una inspección de calidad al trazado con ayuda de un pie de rey para interiores y exteriores y una cinta métrica.

Luego se hacen las perforaciones a la placa base y el frente del panel donde irán instalados los componentes de señalización (lámparas) y otros (botones). Después se montan las canaletas plásticas (cubre cable) y raíles, los que fueron cortados y adaptados según los requerimientos del proyecto. Se fijan todos los componentes en la posición que establece la documentación (Esquemas de Montaje Eléctrico). En la inspección de calidad se comprueba que todos los componentes queden en la posición prevista, la misma es visual y manual verificando la rigidez de los elementos.

El cableado de la parte de control se realiza con identificadores para conductores con dígitos de 0 al 9. Este punto se inspecciona de forma visual con la ayuda del plano (Esquema Funcional). Mientras de forma manual se comprueba la rigidez de los cables. Seguido a ello se hace el cableado de la parte de fuerza y se verifica igual a la anterior.

Posteriormente la placa base se coloca dentro del panel, la misma es fijada con tornillos y tuercas, y se hace el cableado con los componentes que se encuentran en la puerta o frente del panel.

Una vez terminado el panel se procedió a la comprobación de los aprietes de los tornillos con una llave dinamométrica resultando correcto. Las chapillas de identificación y de señalización se encuentran debidamente colocadas.

Se realizó una inspección con ayuda del multímetro digital comprobando la continuidad de los conductores y la correcta colocación de los cables. El aislamiento del panel fue verificado con ayuda de un megaohmímetro. Esta prueba se efectuó con ausencia de voltaje y teniendo de referente la documentación técnica. El resultado fue el esperado.

Por último se aterró el panel y se alimentó con voltaje para la prueba final, conjuntamente se hicieron todas las pruebas de control. Participaron el técnico en control de calidad, el técnico de diseño y el operario del área de prueba, comprobándose todos los parámetros y requisitos técnicos. Esta prueba de funcionamiento final se repite en presencia del cliente si este lo solicita.

Todos los instrumentos de medición que intervinieron en el proceso de ensamblaje y prueba del panel están debidamente calibrados y/o verificados, según lo establece el procedimiento para el control de los equipos de seguimiento y medición “PRO 09.04”, autorizado por la Oficina Nacional de Normalización (ONN), los mismos están acompañados de la marca o sello de calibración y/o verificación y su correspondiente certificado que ampara la conformidad de aptitud para su uso. Ver **Anexo B-2**.

En las **Figuras 3.1 (a)** y **3.1 (b)** se muestran los paneles de control del arranque y protección de la turbina objeto de esta investigación. En la primera figura se observa el estado actual del panel, mientras en la segunda se muestra el resultado de la propuesta para la modernización.

En el **Anexo B-3** se identifican los diferentes mecanismos de accionamiento y control utilizados en la conformación del panel. Entre estos podemos encontrar el autómatas, los guarda-motores, los interruptores automáticos, los contactores magnéticos, etc. El panel es metálico con grado de protección IP 65 recubierto con pintura gris.



**Figura 3.1 (a):** Panel actual (exterior e interior) **Figura 3.1 (b):** Panel nuevo (exterior e interior)

### 3.3 Análisis del Funcionamiento del Sistema Diseñado

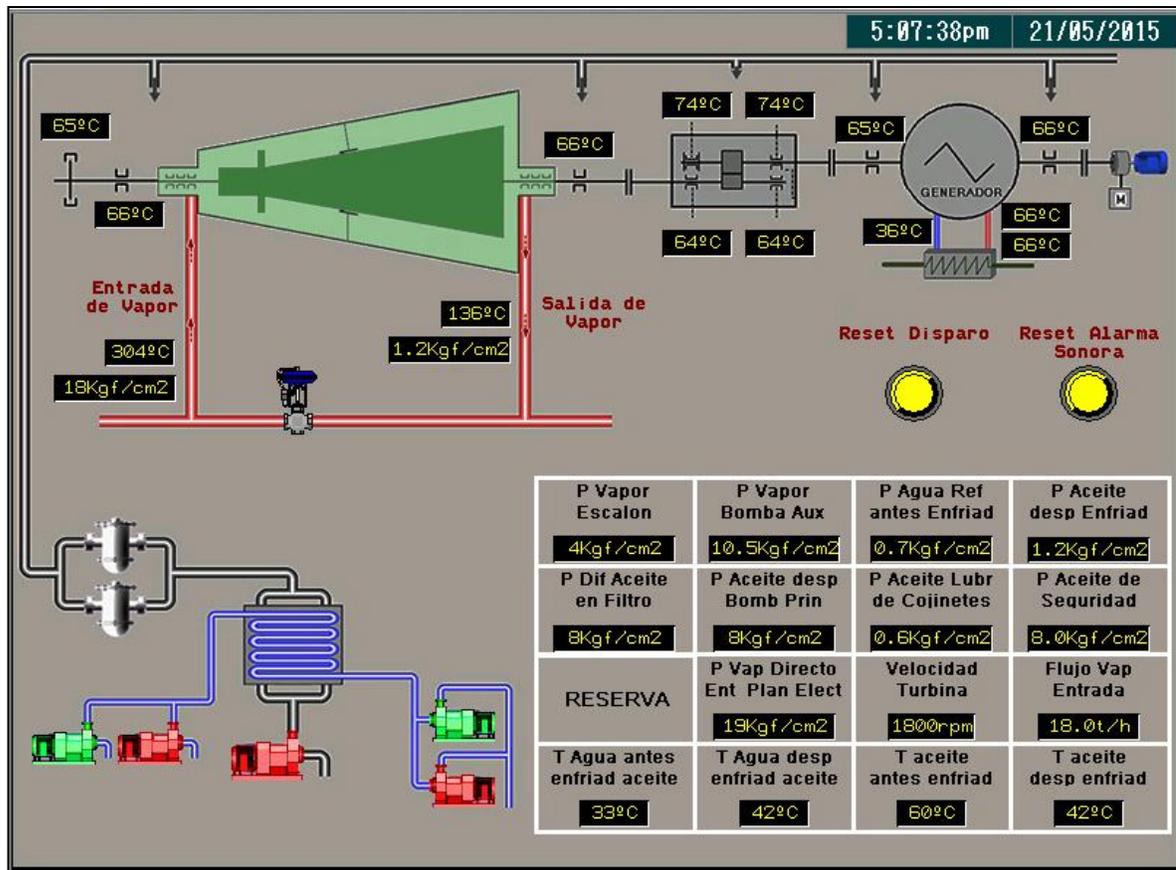
Para disminuir los tiempos de puesta en marcha y garantizar que no existan errores en la programación, a nivel de taller se prueba todo el diseño concebido. Entre las tareas principales está la adecuada presentación de las mediciones en el HMI y la simulación de alarmas y disparos.

En la prueba de lectura y presentación de las variables se utilizaron varios simuladores universales de señales, modelos EXTECH-412355A, BEAMEX-MC6, PULSAR-80Cu (Ver **Anexo B-4**). Estos equipos son capaces de generar y leer corrientes de 4-20 mA, resistencias, voltajes de corriente directa y frecuencias.

De acuerdo con las posibilidades brindadas por los equipos de generación de señales, se logró probar que no existen problemas en la lectura de los valores analógicos y digitales por

parte del PLC, ni en su posterior indicación en el HMI. La ocurrencia de las alarmas y disparos es consecuente con la programación de las mismas. Los resultados obtenidos de estas pruebas se presentan a continuación.

La **Figura 3.2** muestra los valores que se generaron en los simuladores de señales respetando que no exista ninguna condición anormal y que los datos estén en los rangos permitidos.



**Figura 3.2:** Ilustración de la operación normal del sistema

Luego se fue disminuyendo el valor de la corriente del generador que se correspondía con la medición de la temperatura del vapor de entrada de la turbina. Al alcanzar el valor límite establecido en el programa para la señal TT\_325 respecto a la generación de alarma, se mostró en la parte inferior del HMI la indicación que describe la condición simulada. Ver **Figura 3.3**.

Una vez que se mostró el cartel de la alarma se aumentó la corriente hasta el valor determinado para finalizar la misma. A los 280°C la indicación se desactivó. Ver **Figura 3.4**.

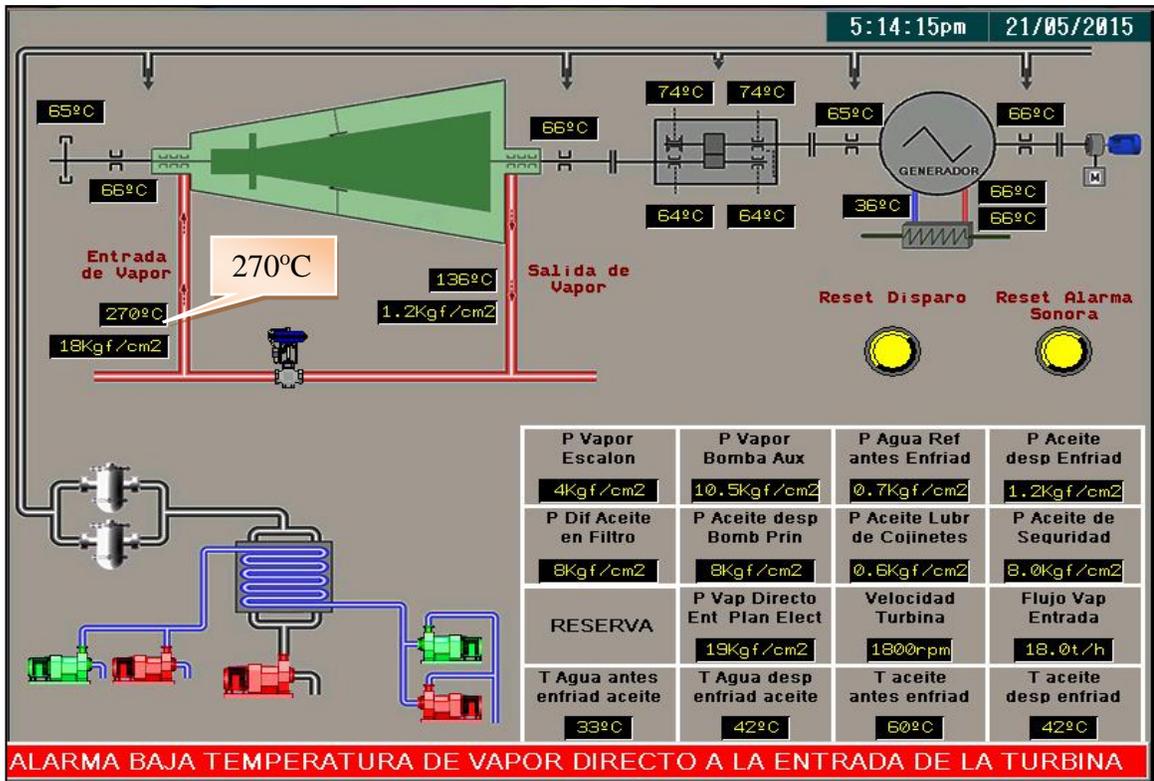


Figura 3.3: Representación de la operación del sistema bajo condición de alarma

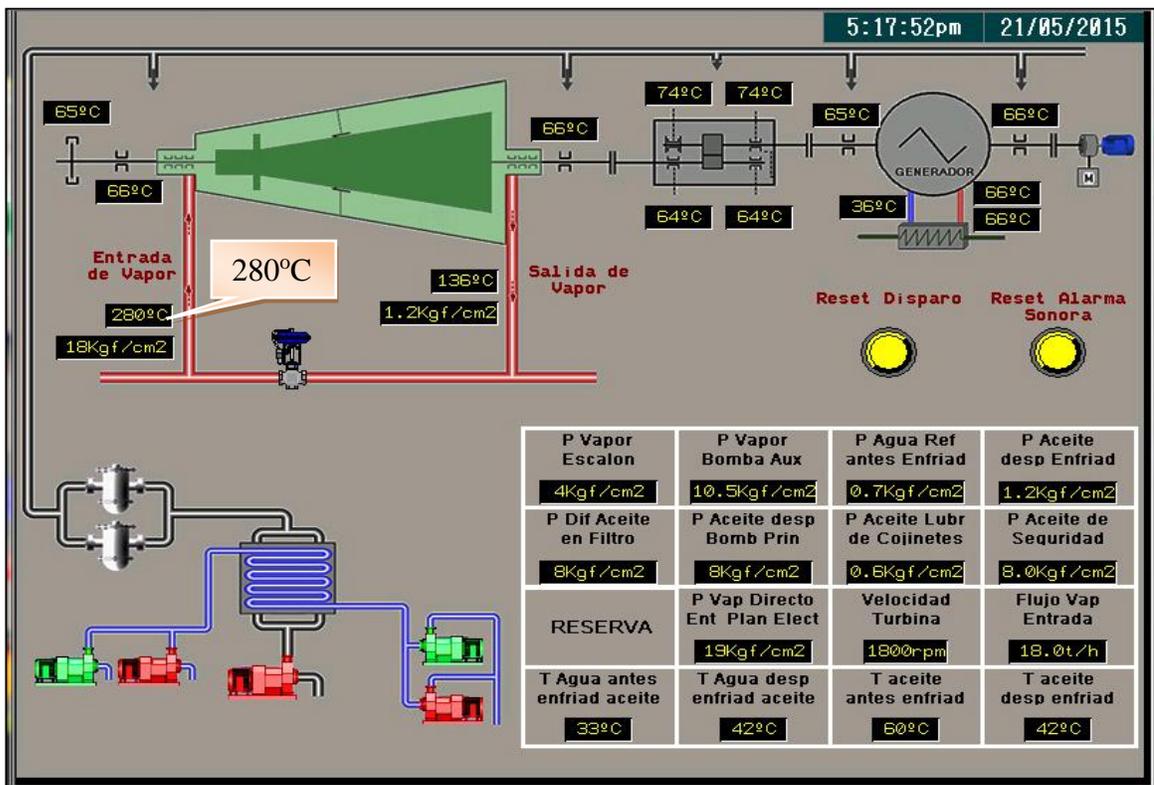
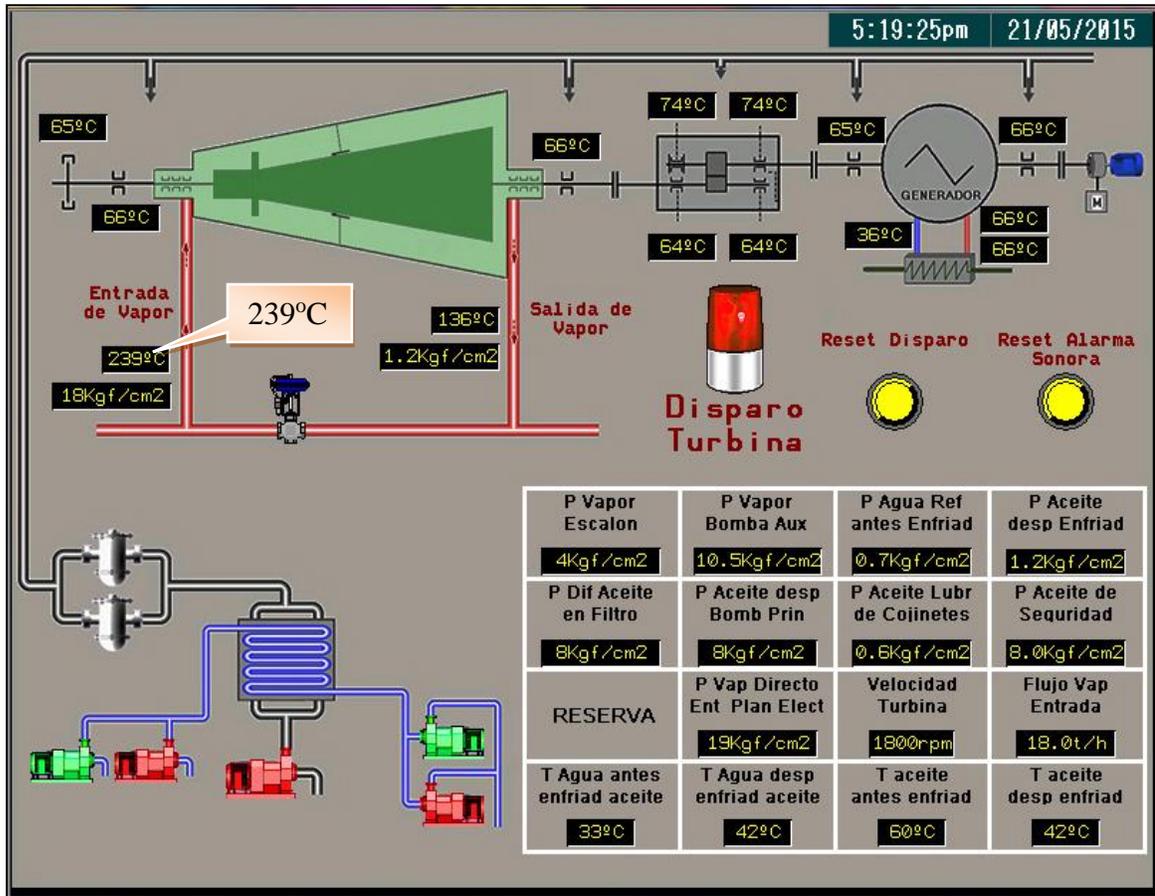


Figura 3.4: Indicación de la recuperación del sistema después de una alarma

Siguiendo la lógica anterior se alcanzaron los 239°C mediante la simulación de señal. Este valor está por debajo del límite permitido para la temperatura del vapor de entrada a la turbina y constituye una condición de disparo. El sistema respondió acorde a la programación, indicando con la sirena el estado crítico del funcionamiento del equipo y retiró la indicación de alarma (Ver **Figura 3.5**). El restablecimiento se produjo a los 255°C, como está previsto.



**Figura 3.5:** Ilustración de la operación del sistema bajo condición de disparo

### 3.4 Normas de Protección e Higiene del Trabajo

Las turbinas de vapor en funcionamiento tienen que ser inspeccionadas y controladas por el personal operador. El alcance de dicha inspección o control de la instalación será determinado por las entidades superiores a la empresa, o centro usuario de la turbina y con la aprobación de los Organismos Rectores de la Protección e Higiene del Trabajo.

Se considera que una turbina de vapor se encuentra en funcionamiento siempre que la

misma esté siendo calentada o se encuentre sometida a presión. En caso necesario se tendrá en cuenta la influencia del calor acumulado.

El operador podrá abandonar su puesto de trabajo, solo después que haya realizado la entrega del equipo al trabajador que continúa en el otro turno. La sustitución tiene que realizarse en el puesto de trabajo, el operador que continúa tiene que ser informado de todo lo acontecido durante el turno anterior.

En cada turno de trabajo se controlará el funcionamiento de los equipos, dispositivos y accesorios que garanticen la seguridad de la turbina, eliminándose las deficiencias y averías que se detecten, de no ser posible se comunicarán al responsable de la planta eléctrica.

Los medios de trabajo necesarios, herramientas, piezas de repuestos, medios de protección individual, contra incendios y otros, serán conservados y utilizados correctamente.

Cuando se trabaje en la turbina se deberá señalar correctamente para informar al personal y evitar cualquier accidente, así como en áreas de acceso y lugares prohibidos.

El personal de trabajo debe tener conocimientos generales sobre los peligros, riesgos y medidas de protección y prevención del proceso tecnológico o de servicio.

En la planta tienen que existir las normas para el uso obligatorio de los equipos de protección personal y al mismo tiempo, las instrucciones del fabricante para el uso, instalación y mantenimiento de los medios de trabajo (Ley No. 116 de 2014).

### **3.5 Análisis Técnico Económico**

Debido a la situación económica por la que atraviesa el país las empresas enfocan su labor al ahorro de los recursos financieros. Por esta razón la realización del análisis económico del proyecto resulta necesario, ya que permite tener el control de los valores empleados y constituye un punto de referencia para establecer mejoras administrativas en la ejecución de futuros trabajos. Con este fin en el **Anexo B-5** se muestran los precios de tres propuestas distintas de autómatas y terminales táctiles pertenecientes a SIEMENS, MITSUBISHI y SCHNEIDER. Esta última es la propuesta usada en el proyecto de acuerdo con las razones expuestas en el epígrafe 2.3.

En la **Tabla 3.1** se muestra el presupuesto necesario para llevar a cabo el proceso de modernización de la automática de la turbina de acuerdo con los estándares económicos de la empresa ZETI. Para efectuar el análisis se tienen en cuenta los precios en CUP a los que la empresa recibe el equipamiento en los almacenes ZETI VC, sin considerarse el valor de importación en moneda libremente convertible.

De acuerdo con un análisis histórico de roturas en los dos últimos años<sup>3</sup>, la turbina alemana de tercera generación del Central “Elpidio Gómez” tiene un tiempo medio entre fallas de aproximadamente 1.3 meses, con una duración de alrededor de 6.5 horas de restablecimiento (Ver **Anexo B-6**). Si se tiene en cuenta que por cada hora de interrupción eléctrica a la que se someta el central, se dejan de producir un total de \$ 970.90 CUP, en un período de zafra de 180 días se estarían desperdiciando un total de \$ 25 243.40 CUP. Además se afecta el cumplimiento de los planes de producción y se produce un aumento del período de zafra lo que equivale a un crecimiento de los gastos logísticos.

El costo del proyecto está evaluado en \$ 438 153.30 CUP con un porcentaje de ocurrencia de fallas muy bajo, quizás con algunas incidencias en sus inicios producto del efecto batea asociado a los equipos nuevos y al tiempo de capacitación que se necesita para que el personal de operación se familiarice con la nueva tecnología. El central es capaz de generar 3 MW/h de los cuales consume 1.8 MW/h, entregando el resto a la red nacional con un precio de 0.15 centavos CUP el KW/h. Al mismo tiempo cada tonelada de azúcar se vende a \$ 1 230.00 CUP con un costo de producción de \$ 1 137.82 CUP generando una ganancia de \$ 92.18 CUP.

El central está capacitado para producir en una hora 8.58 toneladas métricas de azúcar valoradas en un total de \$ 4 194 307.00 CUP, esta cifra se alcanza en 4320 horas de zafra, estimando que 300 de ellas no sean aprovechables por algún contrat tiempo. Teniendo en cuenta la necesidad de mantener la producción con el menor índice de interrupciones posibles, se justifica la inversión cuyo costo total asciende a los \$ 438 153.30 CUP, al dividir el costo del proyecto por la utilidad \$ 970.90 CUP la inversión es recuperable en los primeros 18 días de zafra.

---

<sup>3</sup> Información ofrecida por el Departamento Técnico de la Planta Eléctrica del central “Elpidio Gómez”

PRESUPUESTO DE LA INVERSIÓN	
Conceptos	MT (CUP)
<b>Equipamiento</b>	<b>315 000.00</b>
Elementos del panel	100 000.00
Elementos del campo	215 000.00
<b>Construcción y Montaje</b>	<b>100 274.35</b>
Fabricación del panel	35 000.00
Montaje del equipamiento del campo	65 274.35
<b>Otros</b>	<b>22 878.95</b>
Puesta en marcha	12 498.65
Capacitación del personal	2 108.95
Proyecto	3 079.40
Configuración y programación	5 191.95
<b>Costo de Inversión Total</b>	<b>438 153.30</b>

**Tabla 3.1:** Costos de la inversión.

También es factible hacer la comparación entre el tiempo en el que se tardaría el personal en darle mantenimiento al sistema anterior y a la propuesta actual, incluyendo los precios de dicho mantenimiento. Como se puede observar en la **Tabla 3.2** el tiempo y el costo se reducen según la propuesta moderna en un **71.42%** y **60%** respectivamente.

Aproximación al mantenimiento eléctrico del sistema anterior		Aproximación al mantenimiento eléctrico del sistema propuesto	
Tiempo total	Costo total	Tiempo total	Costo total
14 horas	\$ 150	4 horas	\$ 60

**Tabla 3.2:** Tiempo y costo de los mantenimientos

### 3.6 Análisis del Impacto Medioambiental

Los aspectos ambientales son los elementos de las actividades, productos, servicios o recursos físicos de una organización que pueden tener efectos potencialmente beneficiosos o perjudiciales sobre el medio ambiente. Estos pueden incluir descargas y emisiones, uso de materias primas y energía, ruido, polvo y contaminación visual (Belén, 2010).

La instrumentación de campo, el panel y los elementos que integran el mismo están compuestos por sustancias que tardan tiempo en descomponerse y pueden afectar el medioambiente. Ante cualquier rotura y puesta en fuera de servicio de alguna unidad, deben ser almacenadas en lugares propiamente diseñados para este tipo de materiales, posibilitando su futuro reciclaje (Ley No. 81 de 1997).

El agua empleada en el enfriado del aceite y aire proviene de un depósito adjunto al local de la planta eléctrica, sin peligro de fuga al exterior por el buen estado de las tuberías. Esta agua es químicamente tratada para evitar incrustaciones que afecten el intercambio de calor. Las sustancias empleadas para el tratamiento del agua no dañan la capa de ozono.

El estado de los aislamientos de las instalaciones de climatización, agua caliente y vapor de agua cumplen con los estándares dispuestos en las normas NC-ISO 14001 (Seijo García et al., 2013).

No se producen contaminantes ni fuga de vapores en el local de trabajo ya que de ello depende la eficiencia del proceso de cogeneración. Aunque existe la posibilidad de que ocurra por el deterioro de alguna tubería, por lo que se toman las medidas pertinentes en cada mantenimiento a la planta.

La turbina, instalada sobre plataformas aislantes que absorben las ondas sonoras y las vibraciones, está bien cimentada, nivelada, ajustada y lubricada a fin de evitar en lo posible los ruidos, vibraciones y fricciones. Las transmisiones no se apoyan en paredes para evitar que puedan transferir el ruido a los locales colindantes.

Todos los sellos de aceite se encuentran en buen estado y a pesar de que pueden ocurrir derrames no es algo habitual. Los cambios del líquido lubricante no se suelen hacer con frecuencia dado el alto costo económico que ello encierra, sin embargo, existen los conocimientos y procedimientos para ello.

### **3.7 Consideraciones Finales del Capítulo**

El sistema responde correctamente a las pruebas realizadas y cumple con los requisitos impuestos por el cliente. El diseño de los planos ayuda a realizar la conexión y montaje de los elementos del panel para evitar cualquier error o mal funcionamiento.

Como se pudo constatar en el capítulo, la inversión es recuperable por el central en un período de zafra de los cinco que se destinan para ello. Las normas de Protección e Higiene del Trabajo y el cuidado medioambiental son elementos importantes para preservar el entorno y al personal que opera la turbina.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de diploma permitió arribar a las siguientes conclusiones:

Como resultado del análisis de la bibliografía consultada, se puede considerar que es necesario dominar las especificaciones teóricas de la turbina, para poder desarrollar la modernización de la misma.

Con la aplicación de las tecnologías modernas de control es posible aprovechar equipos existentes que operaron con tecnologías ya obsoletas.

La correcta selección de la instrumentación, garantiza la precisión requerida en la medición de las variables que determinan el funcionamiento de la turbina bajo estudio.

La programación del autómeta responde al control y protección del sistema, cumpliendo con los requisitos exigidos por el cliente.

El lenguaje de programación empleado garantiza la comprensión de la lógica del programa por técnicos y especialistas encargados de trabajar con el dispositivo, además goza de la sencillez algorítmica necesaria para su explotación y mantenimiento.

El sistema diseñado justifica técnica y económicamente el empleo de un controlador lógico programable para el control del arranque y protección de la turbina.

El diseño de la interfaz gráfica resume el conjunto de mediciones, avisos y alarmas capaces de facilitar la correcta toma de decisiones por parte de los operadores.

La conformación del panel de control y protección de arranque se diseñó sobre la base de las especificaciones planteadas, garantizando el control seguro del arranque de la turbina, la protección y la operación de la misma bajo los requisitos exigidos.

**Recomendaciones**

Incluir redundancia en las mediciones de desplazamiento axial y las vibraciones del eje de la turbina, empleando sensores electrónicos, ya que en el diseño propuesto el cliente prefiere mantener las protecciones mecánicas en un primer nivel.

Diseñar un sistema de detección de fallas, para aplicarse a las turbinas existentes en el central “Elpidio Gómez, que sea capaz de integrarse a la automatización propuesta.

Generalizar la modernización de los paneles de protección y control de turbinas alemanas a todas la UEB Azucareras que lo necesiten, estandarizando el equipamiento utilizado en este proyecto para facilitar la compra de repuestos.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Ley No. 81 de 1997. Ley del Medio Ambiente. La Habana, Cuba: Gaceta Oficial de la República de Cuba. Edición Extraordinaria de 11 de julio de 1997.
- Ley No. 116 de 2014. Código de Trabajo. La Habana, Cuba: Gaceta Oficial de la República de Cuba No.29. Edición Extraordinaria de 17 de junio de 2014.
- ABB 2008. Solutions for steam turbine automation. Fully Integrated Solutions for Increased Performance and Reliability.
- ABELLA, L. I., DÍAZ, P. P. & RODRÍGUEZ, J. A. 1998. Planta eléctrica, La Habana.
- AGÜERO, C. J., PISA, J. R. & ANDINA, R. L. 2011. Análisis térmico de un sistema de cogeneración de fuerza motriz y vapor para procesos de calefacción en la industria azucarera ISSN 1668-9178, 33.
- AGUILAR, S. & VALENCIA, P. 2012. Guía metodológica para el diseño de interfaces de usuario para control y supervisión de procesos industriales.
- AGUILERA, J. B. & CHANG, F. 2010. Metodología para evaluar el efecto de técnicas de control avanzado en la automatización del proceso de cocción en los tachos. Ciencias Holguín, 7.
- ALEJANDRO, Z. A., ABRAHAM, O. A., FRANCISCO, L. B., HERNÁNDEZ, R. A. D. A. R. & VÍCTOR, H. 2010. Causa del desgaste de chumacera de empuje en turbina de vapor.
- ANALYSIS, E. A. E. 2008. Technology characterization: steam turbines Arlington, Virginia ICF International Company.
- BARRIOS BAQUEIRO, B. 2013. Optimización del sistema de lubricación de una turbina a vapor tipo acción.
- BASKAKOV, A. P. 1985. Termotecnia, Moscú, Editorial Mir.
- BELÉN, P. M. 2010. La auditoría ambiental y las normas ISO 14000.
- BELIN, R. C. 2012. Sistema de aceite lubricante en centrales termoeléctricas. Universidad Veracruzana
- BOYCE, M. P. 2012. Gas turbine engineering handbook, Elsevier.
- CANGÁS, E. & HIPÓLITO, A. 2010. Automatización de una centrifugadora para el proceso de separación de azúcar y miel.

- CORREA, V. & MANJARRES, J. C. 2013. Diseño e implementación de una red industrial bajo protocolo Modbus que permita la comunicación digital con instrumentos de campo.
- CHÁVEZ RUÍZ, S. 2014. Desarrollo del programa RANKINERCA para el análisis termodinámico del ciclo rankine ideal con recalentamiento.
- CHUMBIAUCA CABEZAS, F. 2013. Desarrollo de un sistema cliente-servidor para supervisión y control de plantas industriales con protocolo Modbus/TCP e interfaz web.
- DAVID, B. & EDWIN, W. 2003. Practical SCADA for industry, Newnes.
- DÍEZ, P. F. 2005. Turbinas de vapor [Online]. Available: <http://libros.redsauce.net/> 27 de agosto 2014].
- EMERSON 2014. Los expertos en control de turbinas. In: EMERSON PROCESS MANAGEMENT POWER & WATER SOLUTIONS, I. (ed.).
- FAIRES, V. M. 1975. Termodinámica, La Habana, Editorial Pueblo y Educación.
- FERNÁNDEZ, M., HUANTE, L. & RAMOS, C. 2009. Sistemas de cogeneración.
- FERRER, F. A. L. 1974. Manual práctico de maquinaria y aparatos en los ingenios de azúcar de caña, La Habana, Editorial Pueblo y Educación.
- GARRIDO, S. 2011. Especial plantas de cogeneración. Energiza. España.
- GUTIÉRREZ, E. D. O. 2010. Sistema de control y protecciones de turbogeneradores. Ciudad de México.
- HAU, E. & VON RENOUARD, H. 2013. Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics, Springer Science & Business Media.
- ITEC 2013. Bourdon tube pressure gauges. Model P600.
- IZAGUIRRE, E. 2012. Sistemas de automatización, Santa Clara.
- JACOBS, J. A. & SCHNEIDER, M. 2009. Cogeneration application considerations. GE Energy.
- JAQUET 2014. Speed measurement, switching and indicating instruments.
- KRENEL 2014a. Expansión MUXPt-PTE.
- KRENEL 2014b. Multiplexor MUX8Pt-PTO.
- LADINO LUNA, D. 2010. Análisis del comportamiento de un ciclo tipo Carnot. Información tecnológica, 21, 79-86.
- LASALLE, N., GOVEA, J. & CHARCHAVOL, R. 1981. Motores térmicos, La Habana, Editorial Pueblo y Educación.
- LEANDRO, B. B., DUEÑAS, B., ALBERTO, M., MIRANDA, C., MARIO, T. & CARLOS., S. P. J. Control de velocidad digito – electro – hidráulico para una turbina de vapor de 350 MW 6to. Congreso Nacional de Mecatrónica, 2007 San Luis Potosí, México.

- LEÃO, R. 2009. Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, Brasil.
- LI, C. & ZHOU, J. 2011. Parameters identification of hydraulic turbine governing system using improved gravitational search algorithm. *Energy Conversion and Management*, 52, 374-381.
- LÓPEZ LUCAS, B. & BREÑA CALVO, V. 2014. AutoCAD 2013, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- LOSTAUNAU, L. M. 2007. Calderas y turbinas de vapor para la generación de energía eléctrica.
- MARTÍNEZ SÁNCHEZ, J. C. 2010. Elaboración de un programa de mantenimiento para un turbogenerador de vapor, de 25 MW tipo TG-1.
- MASTRAPA, R. H. Nociones de turbinas de vapor. Foro de Ingenieros Azucareros, 2006 La Habana.
- MILLA LOSTAUNAU, L. 2014. Calderas y turbinas de vapor para la generación de energía eléctrica. *Electrónica-UNMSM*, 18-26.
- PÉREZ, E. M. 2010. Autómatas programables y sistemas de automatización, México.
- PRIETO, I. & ALONSO, M. 2002. Centrales térmicas. Sistema de control
- RETUERTO, T. M., CARMONA, M. M. & MORALES, A. M. 1998. Técnicas de conservación energética en la industria, Ciudad de la Habana.
- ROMERO, A. V. 2014. Modificación de programas del autómata e interfaz HMI empleados en la modernización de sistema automatizado de control de centrífugas. Tesis de Grado, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- RUIZ OLAYA, A. F., BARANDICA LÓPEZ, A. & GUERRERO MORENO, F. G. 2011. Implementación de una red MODBUS/TCP. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 6, 35-44.
- SANSO, M. Sistemas de control. Instrumentación y Control, 2007 Madrid.
- SANTAMARÍA GARCÍA, A. 2012. Caña de azúcar y producción de azúcar en Cuba. Crecimiento y organización de la industria azucarera cubana desde mediados del siglo XIX hasta la finalización de la Primera Guerra Mundial.
- SCHEGLIAEV, A. V. 1978. Turbinas de vapor, Moscú, Editorial Mir.
- SCHNEIDER 2013a. Unity Pro Program Languages and Structure Reference Manual
- SCHNEIDER 2013b. Vijeo Designer manual de formación Instituto Schneider Electric de Formación
- SCHNEIDER 2014a. ABL8REM24030 regulated switch mode power supply phase
- SCHNEIDER 2014b. ABL8RPS24100 regulated SMPS.
- SCHNEIDER 2014c. BMX AMI 0810 analog input Module M340 - 8 inputs.
- SCHNEIDER 2014d. BMX AMO 0410 analog output Module M340 - 4 outputs

- SCHNEIDER 2014e. BMX ART 0814 modules are multi-range acquisition devices with eight analog inputs for the 0814.
- SCHNEIDER 2014f. BMX CPS 2010 power supply Module M340 - 24 V DC.
- SCHNEIDER 2014g. BMX DDI 3202 discrete input modules M340-32 inputs. Schneider Electric.
- SCHNEIDER 2014h. BMX DDO 3202 discrete output modules M340-32 outputs.
- SCHNEIDER 2014i. BMX NOE 0100.2 programmable logic controller module, Modicon M340.
- SCHNEIDER 2014j. BMX P34 2020 processor module M340.
- SCHNEIDER 2014k. BMX RMS 008MPF Modicon M340.
- SCHNEIDER 2014l. BMX XBP 1200 rack M340 -12 slots.
- SCHNEIDER 2014m. Ethernet network cabling system connexium managed switches 8 ports, copper twisted pair.
- SCHNEIDER 2015. XBT GT6340 analogue touchscreen panel.
- SEIJO GARCÍA, M. A., FILGUEIRA-VIZOSO, A. & MUNOZ-CAMACHO, E. 2013. Positive consequences of the implementation of ISO 14001 in the Galician Companies. *DYNA*, 80, 13-21.
- SEPULVEDA, R. H. S. 2011. Modelación de centrales térmicas de ciclo combinado y su aplicación en el problema de predespacho de unidades. Universidad de Chile.
- SEVERNS, W. H., DEGLER, H. E. & MILES, J. C. 1966. Steam, air and gas power, La Habana, Editorial Revolución.
- SIEMENS 2013a. Transmisor de presión SITRANS P 7MF4433 para presión diferencial y caudal, serie DS III
- SIEMENS 2013b. Transmisor SITRANS P 7MF4033 para presión relativa, serie DS III.
- SIEMENS 2014a. Manifold 7MF9411-5BA en transmisores de presión absoluta y diferencial.
- SIEMENS 2014b. Manifold de 2 vías 7MF9401-2F para transmisores de presión relativa.
- SILGADO CORREA, K. & OJEDA DELGADO, K. A. 2013. Análisis termodinámico de ciclos de potencia. *INGENIATOR*, 3.
- SONG-FENG, D. Z.-J. L. 2010. Communication between PLC and Chip Microcontrollers based on RS485 Interface and Modbus Protocol. *Microcomputer Information*, 8, 046.
- STĘPCZYŃSKA, K., KOWALCZYK, Ł., DYKAS, S. & ELSNER, W. 2012. Calculation of a 900 MW conceptual 700/720°C coal-fired power unit with an auxiliary extraction-backpressure turbine. *Journal of Power Technologies*, 92, 266-273.
- TEICO 2004. Panel de control de turbina para generador ruso de 4 MW. Santa Clara.

- URIBE GUTIÉRREZ, P. I. 2010. Procedimiento para la reparación de los álabes en la turbina de la unidad No. 2 en la central termoeléctrica. Valle de México.
- VALAMIN, A. Y., KULTYSHEV, A. Y., SAKHNIN, Y. A., SHEKHTER, M. & STEPANOV, M. Y. 2012. Steam turbines of the T-50/60-8.8, K-63-8.8, and Tp-100/110-8.8 types destined for modernization of thermal power plants with K-50-90 and K-100-90 turbines. *Thermal Engineering*, 59, 907-912.
- VILLAFRANCA, J. S. & SABUGAL, S. Criterios de diseño del sistema de control de una central de ciclo combinado gas-vapor I Seminario de Aplicaciones Industriales de Control Avanzado 2005 Ribera del Loira, Madrid
- WIKA 2013. Termorresistencia roscada Modelo TR10-D.
- WIKA 2014a. Presostato electrónico con indicación. Modelo PSD-30.
- WIKA 2014b. Termómetro bimetalico con señal de salida eléctrica Pt100 Modelo 54, ejecución de acero inoxidable.
- WIKA 2014c. Termómetros de dilatación de gas. Modelo 73.
- XU, D.-M., KE, Y. & WANG, S.-Y. 2010. Universal method for calculating the power/back-pressure characteristics of a steam turbine and its applications. *Reneng Dongli Gongcheng (Journal of Engineering for Thermal Energy and Power)*, 25, 605-608.
- ZETI 2012. Panel de control de turbina para generador ruso en el central Uruguay. Santa Clara.
- ZETI 2013. Informe técnico del panel de control de turbina para generador ruso. Santa Clara.

## ANEXOS

### Anexo A-1 Turbina Alemana de Tercera Generación



**Figura A-1.1:** Vista frontal de la turbina



**Figura A-1.2:** Vista lateral de la turbina

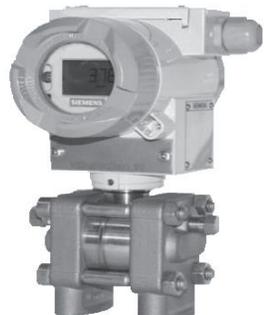
**Anexo A-2 Datos de Operación de la Turbina Alemana de Tercera Generación  
Según el Fabricante**

<b>Medición</b>	<b>Límite Mínimo</b>	<b>Límite Máximo</b>
<b>TEMPERATURA</b>		
Temperatura del vapor vivo de entrada a la turbina	245°C	445°C
Temperatura del vapor de contrapresión	120°C	180°C
Temperatura del agua refrigerante antes de los enfriadores de aceite de la Turbina		35°C
Temperatura del agua refrigerante después de los enfriadores de aceite de la Turbina		45°C
Temperatura del aceite antes de los enfriadores de aceite de la Turbina	55°C	70°C
Temperatura del aceite después de los enfriadores de aceite de la Turbina	30°C	60°C
Temperatura del cojinete (tejuelo o axial)	60°C	75°C
Temperatura del cojinete delantero de la turbina (1)	60°C	75°C
Temperatura del cojinete trasero de la turbina (2)	60°C	75°C
Temperatura del cojinete del engranaje 1 piñón delantero	70°C	85°C
Temperatura del cojinete del engranaje 2 piñón trasero	70°C	85°C
Temperatura del cojinete del engranaje 3 rueda delantera	60°C	75°C
Temperatura del cojinete del engranaje 4 rueda trasera	60°C	75°C
Temperatura del aire frío de entrada al generador	30°C	40°C
Temperatura del aire caliente 1 salida del Generador	60°C	75°C
Temperatura del aire caliente 2 salida del Generador	60°C	75°C
Temperatura del enrollamiento del generador I,II y III	80°C	120°C
Temperatura del cojinete delantero del generador	60°C	75°C
Temperatura del cojinete trasero del generador	60°C	75°C
<b>PRESIÓN</b>		
Presión del vapor vivo delante de la válvula de cierre rápido	11 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	29 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
Presión en el escalón de regulación de la turbina		5 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
Presión del vapor de contrapresión	1 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	1,4 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
Presión del vapor antes de la bomba auxiliar de aceite de la turbina	10 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	11,2 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
Presión del agua refrigerante antes del enfriador de aceite de la turbina	0,5 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	0,9 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
Presión del aceite después del enfriador de aceite de la turbina	1 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	1,5 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>

Presión diferencial en el filtro de aceite de la turbina	7 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	9 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
Presión después de la bomba principal de aceite	7 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	9 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
Presión de aceite de lubricación de los cojinetes	0.2 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	1,7 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
Presión del aceite de seguridad	7,5 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	8,5 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
<b>NIVEL</b>		
Nivel en el recipiente de aceite	90-95%	60%
<b>FLUJO</b>		
Flujo de vapor de entrada a las Turbinas de Vapor	8 t/h (vacío)	29.70 t/h (carga)
<b>POSICIÓN</b>		
Posición de la válvula de cierre rápido abierta y cerrada	Interruptor de fin de carrera	
Posición válvula de regulación de vapor abierta y cerrada	Interruptor de fin de carrera	
<b>VELOCIDAD</b>		
Número de rotaciones de la turbina por minuto	1600 rpm	2100 rpm

**Tabla A-2.1:** Valores de operación de la turbina alemana

### Anexo A-3 Características Técnicas de la Instrumentación de Campo

Características Técnicas	Medidor de Presión Relativa 7MF4033	Medidor de Presión Diferencial 7MF4433
Procedimiento de medida:	Piezorresistivo	Piezorresistivo
Magnitud de medida	Presión relativa	Presión Diferencial
Señal de salida: 4-20 mA	X	X
Rango ajustado	0,04 - 4 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup> 0,16 - 16 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup> 0,64 - 64 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	0 - 160000 mmH <sub>2</sub> O 0 - 12000 mmH <sub>2</sub> O
Precisión de medida: Mejor de 0,075 % incluidas la histéresis y la repetibilidad	X	X
Temperatura de trabajo: -40 a +100°C	X	X
Medida de protección: IP 65	X	X
Descripción del punto de medida: A especificar en texto, (máximo 16 caracteres)	X	X
Relleno de la célula de medida: Aceite de silicona	X	X
Tipo de la conexión al proceso	Rosca hembra 1/2" NPT	Brida, con rosca hembra 1/4" NPT
Alimentación eléctrica: 10,5 a 45 VCD	X	X
Límite de sobrecarga:	0,04 - 4 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	0-160000 mmH <sub>2</sub> O
	10 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	163 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
	0,16 - 16 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	0-12000 mmH <sub>2</sub> O
	32 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	428 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
	0,63 - 63 Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	101Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
Conexión: A dos hilos	X	X
		

**Tabla A-3.1: Sensores de Presión**

### MANIFOLD DE 2 VÍAS 7MF9401-2F



#### Datos técnicos:

- Presión máxima de servicio: 420 bar
- Material: Acero inoxidable AISI 316L
- Conexión al proceso: Rosca hembra 1/2" NPT
- Conexión al transmisor: Rosca macho 1/2" NPT

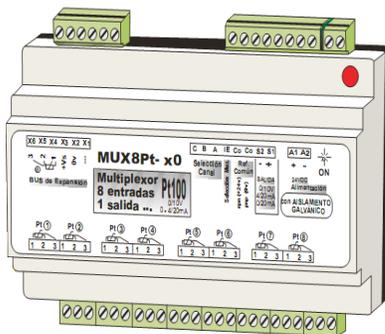
### MANIFOLD DE 3 VÍAS 7MF9411-5BA



#### Datos técnicos:

- Material: Acero inoxidable AISI 316L
- Presión máxima de servicio: 420 bar
- Conexión al proceso: Rosca hembra 1/2" NPT
- Conexión al transmisor: Rosca macho 1/4" NPT

### MULTIPLEXOR MUX8PT-PTO



#### Datos técnicos:

- Salida configurable: 4 a 20 mA / 0 a 10 V
- Resistencia de conducción: Baja <math><0.08 \Omega</math>
- Entradas de Pt-100 a tres hilos para compensación de línea
- Selección del canal: Mediante tres líneas digitales optoacopladas
- Protección: IP20
- Temperatura de trabajo:  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $55^{\circ}\text{C}$
- Máximo error global: 0.1%
- Error de linealidad: 0.05%
- Deriva Térmica: Para salida de corriente  $0.5\mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$  y para tensión  $0.2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
- Tiempo de estabilización en cada canal: <math><100\text{ ms}</math>

### PRESOSTATO PSD-30



#### Datos técnicos:

- Rango de medición: 0 a 10 bar
- Conexión al proceso: 1/4 NPT
- Señal de salida: dos conmutadores PNP
- Tiempo de estabilización: 3 ms
- Error:  $\leq \pm 0.1\%$  del alcance por  $^{\circ}\text{C}$
- Alimentación: 15 a 35 V DC
- Temperatura del medio admisible:  $-20$  a  $+85^{\circ}\text{C}$
- Precisión: 1,0% del alcance
- IP 65 e IP 67
- Señal analógica: 4 a 20 mA

### TACÓMETRO UNIVERSAL 383Z-05318 de JAQUET



#### Datos técnicos:

- Alimentación: 10-36 VCD
- Modelo: T411
- *Software* de configuración: PC-T400
- Sensor de Velocidad: E16A25
- Temperatura de trabajo: -40 a + 125°C
- Cable para configurar el convertidor: T411 con PC-T-400 1,5 m
- Salida: 4 a 20 mA

### TERMÓMETROS DE GAS



#### Datos técnicos:

- Principio de medición: Dilatación de gas inerte fisiológicamente inofensivo
- Rango de medición: 0 a 400°C
- Error:  $\pm 2^\circ\text{C}$
- Sensor de contacto: 120 x 22 x 12 mm, acero inoxidable
- Esfera: Aluminio, de color blanco, escala en negro
- Grado de protección: IP 65
- Posición del racor: Posterior axial con rosca 1/2" NPT
- Diámetro nominal: 144 mm

### SONDAS Pt100



#### Datos técnicos:

- Cabezal: DIN B
- Rosca: Deslizante 1/2" NPT
- Vaina de tubo soldado: TW-25 longitud de inmersión variable con rosca 1" NPT macho
- Temperatura máxima: 600°C
- Presión máx. de trabajo: 25 bar
- Material: Platino

**MANÓMETRO****Datos técnicos:**

- Diámetro nominal: 100 mm
- Rango de medición: 0-0.6 a 0-1600 bar
- Clase de precisión: 1,0
- IP 65
- Materiales en contacto con el medio: Acero inoxidable
- Rosca: Vertical 1/2" NPT
- Temperatura de Trabajo: -20 a 60°C

**TERMÓMETRO  
BIMETÁLICO****Datos técnicos:**

- Elemento de medición: Espiral bimetálica y Pt100
- Rango de medición: 0 a 100°C
- Diámetro nominal: 100 mm
- Bulbo, conexión al proceso: Acero inoxidable
- Tipo de protección: IP66
- El líquido de relleno no debe ser expuesto a más de 250°C
- Conexión entrada Pt100: ODU Mini Snap, con 3 m de cable de teflón
- Rosca delante: 1/2" NPT
- Vaina tubo soldado: Modelo TW-25 1/2" NPT macho
- Longitud inmersión: Variable
- Materiales en contacto con el medio: Acero inoxidable
- Rosca: Vertical 1/2" NPT

**Anexo A-4 Listado de Variables**

Canal	Descripción de la señal	Lugar de toma de la señal	E A	S A	E D	S D	Posición
<b>M2 (BMX AMI 0810)</b>							
0	Presión de vapor directo de entrada a la Turbina		x				PT-301
1	Presión de vapor en el escalón de regulación de la Turbina		x				PT-302
2	Presión del vapor de contrapresión de la Turbina		x				PT-303
3	Presión de vapor antes bomba auxiliar de aceite de la Turbina (Bomba de Vapor)		x				PT-304
4	Presión de agua refrigerante antes del enfriador de aceite de la Turbina		x				PT-305
5	Presión de aceite después del enfriador de aceite de la Turbina		x				PT-306
6	Presión diferencial del aceite en el filtro aceite de la Turbina		x				PT-307
7	Presión de aceite después de la bomba principal de aceite de la Turbina (Acoplada al eje de la Turbina)		x				PT-308
<b>M3 (BMX AMI 0810)</b>							
0	Presión de aceite de lubricación de los cojinetes de la Turbina		x				PT-309
1	Presión de aceite de control o seguridad de la Turbina		x				PT-310
2	RESERVA						----
3	RESERVA		x				----
4	Velocidad de Giro de la turbina		x				ST-313
5	RESERVA		x				----
6	RESERVA		x				----
7	TEMPERATURAS		x				TT-316
7.1	Temperatura del cojinete delantero Generador						TT-316-01
7.2	Temperatura del cojinete trasero Generador						TT-316-02
7.3	Temperatura del aire frío entrada Generador						TT-316-03
7.4	Temperatura del aire caliente 1 salida del Generador						TT-316-04
7.5	Temperatura del aire caliente 2 salida del Generador						TT-316-05
7.6	Temperatura del enrollado del estator I						TT-316-06
7.7	Temperatura del enrollado del estator II						TT-316-07
7.8	Temperatura del enrollado del estator III						TT-316-08
7.9	Temperatura del cojinete empuje delantero (Tejuelo)						TT-316-09
7.10	Temperatura del cojinete delantero Turbina						TT-316-10
7.11	Temperatura del cojinete trasero Turbina						TT-316-11

7.12	Temperatura del cojinete del engranaje 1 piñón delantero						TT-316-12
7.13	Temperatura del cojinete del engranaje 2 piñón trasero						TT-316-13
7.14	Temperatura del cojinete del engranaje 3 delantero						TT-316-14
7.15	Temperatura del cojinete del engranaje 4 trasero						TT-316-15
7.16	Temperatura RESERVA						TT-316-16
<b>M4 (BMX AMI 0810)</b>							
0	Flujo de vapor de entrada a las Turbinas de Vapor		x				FT-317
1	RESERVA		x				----
2	RESERVA		x				----
3	RESERVA		x				----
4	RESERVA		x				----
5	RESERVA		x				----
6	Presión de Vapor Directo entrada a Planta Eléctrica		x				PT-323
7	RESERVA		x				----
<b>M5 (BMX ART 0814)</b>							
1	Temperatura del vapor directo a la entrada de la Turbina		x				TT-325
2	Temperatura del vapor de contrapresión de la Turbina		x				TT-326
3	Temperatura del agua refrigerante antes de los enfriadores de aceite de la Turbina		x				TT-327
4	Temperatura del agua refrigerante después de los enfriadores de aceite de la Turbina		x				TT-328
5	Temperatura del aceite antes de los enfriadores de aceite de la Turbina		x				TT-329
6	Temperatura del aceite después de los enfriadores de aceite de la Turbina		x				TT-330
7	Temperatura Vapor Directo entrada a Planta Eléctrica		x				TT-331
8	Temperatura Vapor Escape salida de Planta Eléctrica		x				TT-332
<b>M6 (BMX AMO 0810)</b>							
0	RESERVA			x			----
1	RESERVA			x			----
2	RESERVA			x			----
3	RESERVA			x			----
<b>M7 (BMX DDI 3202K)</b>							
0	Mínima presión de aceite a la salida de la bomba principal de aceite				x		PSL-301
1	Válvula de cierre rápido abierta				x		ZSH-302
2	Válvula de cierre rápido cerrada				x		ZSL-303
3	Nivel Alto Tanque de aceite				x		LSH-304

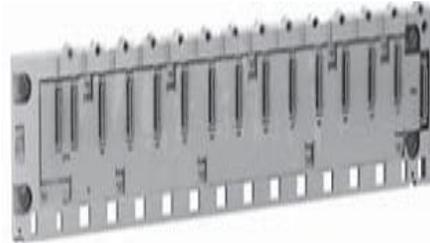
4	Nivel Bajo Tanque de aceite				x		LSL-305
5	Funcionamiento de la bomba de aceite de emergencia Turbina				x		YSH-306
6	Límite máx. apertura de la válvula de carga de la Turbina				x		YSH-307
7	Botón de Parada por Emergencia				x		YSH-308
8	Confirmación de velocidad cero en la Turbina				x		YSH-309
9	Selección Automático/ Manual bomba de aceite de emergencia Turbina				x		YSH-310
10	Fallo de Fuente 24 VCD Automata Turbina 2				x		YSH-311
11	Fallo del Hardware programable (Conmutador Ethernet)				x		YSH-312
12	Disparo Interruptor de Fuente 24VCD Campo				x		YSH-313
13	Disparo Interruptor de Circuito de Parada por Emergencia				x		YSH-314
14	Disparo Interruptor de Circuito de Subir y Bajar Carga				x		YSH-315
15	Funcionamiento Bomba Inyección1				x		YSH-316
16	Funcionamiento Bomba Inyección2				x		YSH-317
17	Funcionamiento Bomba Rechazo1				x		YSH-318
18	Funcionamiento Bomba Rechazo2				x		YSH-319
19	Indicación de Disparo Bomba Inyección1				x		YSH-320
20	Indicación de Disparo Bomba Inyección2				x		YSH-321
21	Indicación de Disparo Bomba Rechazo1				x		YSH-322
22	Indicación de Disparo Bomba Rechazo2				x		YSH-323
23	RESERVA				x		----
24	RESERVA				x		----
25	RESERVA				x		----
26	Permiso/Bloqueo Turbina				x		YSH-327
27	Reset Turbina desde TCP				x		YSH-328
28	Posición Interruptor Generador NA				x		YSH-329
29	Posición Interruptor Generador NC				x		YSH-330
30	Bloqueo Arranque de Turbina hasta reset				x		YSH-331
31	Orden de Disparo de la Turbina por defecto del Generador				x		YSH-332
M7 (BMX DDI 3202K)							
0	Alarma Sonora					x	YZ-301
1	Alarma Lumínica					x	YZ-302
2	Válvula de regulación de carga de la Turbina en máxima apertura					x	YZ-303
3	Orden de Arranque remoto del la bomba de aceite de emergencia					x	YZ-304

4	RESERVA					x	----
5	RESERVA					x	----
6	RESERVA					x	----
7	RESERVA					x	----
8	RESERVA					x	----
9	RESERVA					x	----
10	RESERVA					x	----
11	RESERVA					x	----
12	RESERVA					x	----
13	RESERVA					x	----
14	RESERVA					x	----
15	RESERVA					x	----
16	RESERVA					x	----
17	RESERVA					x	----
18	RESERVA					x	----
19	RESERVA					x	----
20	RESERVA					x	----
21	RESERVA					x	----
22	RESERVA					x	----
23	RESERVA					x	----
24	RESERVA					x	----
25	95% Velocidad Nominal					x	YZ-326
26	Turbina en servicio					x	YZ-327
27	Disparo General Turbina					x	YZ-328
28	Habilitación IE Multiplexor					x	YZ-329
29	Habilitación A Multiplexor					x	YZ-330
30	Habilitación B Multiplexor					x	YZ-331
31	Habilitación C Multiplexor					x	YZ-332

**Tabla A-4.1:** Variables que intervienen en la modernización

## Anexo A-5 Características Técnicas de los Módulos que Conforman el Automata

### BASTIDORES BMX XBP 1200



#### Datos técnicos:

- Instalación de los Bastidores: Horizontalmente
- Número de slots: 12
- Largo: 503.2 mm
- Ancho: 103.7 mm
- Aloja la tarjeta electrónica del bus del PLC
- Protege de interferencias del tipo EMI (interferencia electromagnética)
- Protege de interferencias del tipo ESD (descarga electrostática)
- Conector hembra de 40 pines para el módulo de ampliación
- Conectores hembra de 40 pines para la conexión del bastidor con los distintos módulos

### FUENTE DE ALIMENTACIÓN BMX CPS 2010



#### Datos técnicos:

- Salida 3V3\_BAC: Tensión nominal 3,3 V; Corriente nominal 2,5 A; Potencia (típica) 8,3 W
- Salida 24 V BAC: Tensión nominal 24 V; Corriente nominal 0,7 A; Potencia (típica) 16,5 W
- Consumo de corriente nominal: 1 A a 24 V
- Duración aceptada de interrupciones de la alimentación:  $\leq 1$  ms
- Panel de visualización: 1
- Bloque terminal para el contacto de relé de alarma: 1
- Alimentación de sensores (TSX CPS 2000/3500)
- Protección contra sobrecarga, cortocircuito y sobretensión
- Resistencia de aislamiento: Primario/secundario  $\geq 10$  M $\Omega$ ; Primario/tierra  $\geq 10$  M $\Omega$

### UNIDAD CENTRAL BMX P34 2020



#### Datos técnicos:

- Corriente consumida: 95 mA
- Alimentación disipada: 2,3 W
- Número global máximo de entradas/salidas binarias: 1024
- Número global máximo de entradas/salidas analógicas: 256
- Tamaño máximo de memoria: 4096 Kb
- Conexiones: USB, Modbus y Ethernet integrada
- Panel de visualización: 1
- Slot de tarjeta de memoria: 1
- Tiempo de ejecución: Una instrucción booleana básica demora 0,12  $\mu$ s, una instrucción digital básica demora 0,17  $\mu$ s y una instrucción de coma flotante 1,16  $\mu$ s.

### TARJETAS DE MEMORIA BMX RMS 008MPF



#### Datos técnicos:

- Almacenamiento de la aplicación: Si
- Almacenamiento de datos: 8 MB
- Almacenamiento de Programa: 16 MB
- Compatibilidad: BMX P34 2010 /2020/2030
- Tecnología: Flash

### MÓDULO DE COMUNICACIÓN ETHERNET BMX NOE 0100.2



#### Datos técnicos:

- Corriente consumida: 90 mA
- Alimentación disipada: 2,2 W
- Tamaño de trama máximo por mensaje: 256 bytes
- Tamaño de la lectura: 0-125 palabras por dispositivo
- Tamaño de la escritura: 0-100 palabras por dispositivo
- Velocidad de repetición: 0-60000 ms
- Caudal: 10-100 Mbits/s
- Panel de visualización: 1
- Puerto Ethernet: RJ45
- Ranura para tarjeta de memoria: 1
- Conmutador para configurar la dirección IP del dispositivo: 2
- Sirve de servidor de direcciones para un máximo de 64 dispositivos

### MÓDULO DE ENTRADAS ANALÓGICAS BMX AMI 0810



### Datos técnicos:

- Rango de medición (Tensión): +/-10 V; +/-5 V; de 0 a 10 V; de 0 a 5 V; de 1 a 5 V
- Rango de medición (Corriente): +/-20 mA; 0 a 20 mA; 4 a 20 mA
- Resolución de visualización: 16 bits
- Filtro digital de 1er orden
- Resolución de conversión: Tensión 0,36 mV; Corriente 1,4  $\mu$ A
- Impedancia de entrada: Tensión 10 M $\Omega$ ; Corriente 250  $\Omega$  resistencia interna de transformación
- Tiempo de ciclo de adquisición:
  - Rápido (adquisición periódica para los canales utilizados): 1 ms + 1 ms por número de canales utilizados
  - Predeterminado (adquisición periódica para todos los canales): 9 ms
- Errores de medición del módulo estándar:
  - A 25 °C: 0,075% de plena escala (Tensión); Habitualmente 0,15% de plena escala (Corriente)
  - Máximo en el rango de temperatura de 0 a 60 °C: 0,1% de FS (Tensión); 0,3% de FS (Corriente).
  - Deriva de temperatura: 30 ppm/°C (Tensión); 50 ppm/°C (Corriente)
  - Acoplamiento entre canales de CD y CA a 50/60 Hz: > 80 dB (Tensión); > 80 dB (Corriente)
- Conector: BMX FTB 2000 con borneros desenchufables de 20 contactos

**MÓDULO DE ENTRADAS PARA  
SENSORES DE TEMPERATURA  
BMX ART 0814**



**MÓDULO DE SALIDAS  
ANALÓGICAS BMX AMO 0410**



**Datos técnicos:**

- Tipo de entradas: Con separación de potencial, RTD, termoelemento y entradas de tensión
- Naturaleza de las entradas: +/- 40 mV; +/- 80 mV; +/- 160 mV; +/- 320 mV; +/- 640 mV; 1,28 V
- Tiempo de ciclo de adquisición: 400 ms/8 canales
- Resolución: 15 bits + signo
- Filtro de entrada: Filtro de paso bajo (primer orden numérico)
- Rechazo en modalidad diferencial (50/60 Hz): Habitualmente 60 dB
- Rechazo de modalidad común (50/60 Hz): Habitualmente 120 dB
- Consumo de alimentación (3,3 V): Típico 0,32 W; Máximo 0,48 W
- Consumo de alimentación (24 V): Típico 0,47 W; Máximo 1,20 W
- Características de las entradas resistivas: Rango: 400  $\Omega$  a 4000  $\Omega$ 
  - Medición de tipo: 2, 3, 4 conductores
  - Resolución máxima: 2,5 m $\Omega$  en el rango de 400  $\Omega$  y 25 m $\Omega$  en el rango de 4000  $\Omega$
  - Error de medición A 25 °C: 0,12% de FS
  - Error de medición de 0-60 °C: 0,2% de FS
  - Deriva de temperatura: 25 ppm/°C
- Conector: BMX FCW 301S con No. de fundas 1 x 20 hilos y dimensiones 0.324 mm<sup>2</sup> de sección y 3 m de longitud

**Datos técnicos:**

- Resolución del convertidor digital/analógico: 16 bits
- Duración de actualización de las salidas: 1 ms
- Fuente de alimentación para las salidas: Por parte del módulo
- Deriva de temperatura: 45 ppm/°C
- Protección: Por sobrecarga y cortocircuito
- Consumo de alimentación 24V: Típico 3,0 W, Máximo 3,2 W
- Error de medición del módulo estándar:
  - A 25 °C: 0,10% de plena escala
  - Máximo en el rango de temperatura de 0 a 60 °C: 0,20% de plena escala

### MÓDULO DE ENTRADAS DIGITALES BMX DDI 3202



#### Datos técnicos:

- Valores de entrada nominal: Tensión 24 VCD y corriente 2,5 mA
- Valores límite de entrada: En\_1 (Tensión  $\geq 11V$  y Corriente  $> 2$  mA; En\_0 (Tensión 5V y Corriente  $< 1,5$  mA)
- Impedancia de entrada: 9,6 k $\Omega$
- Tiempo de respuesta: Típico 4 ms; Máximo 7 ms
- Resistencia de aislamiento:  $>10$  M $\Omega$  (por debajo de 500 VCD)
- Potencia disipada: 3,9 W como máx.
- Descenso de temperatura: Ninguno
- Consumo de alimentación de 3,3 V: Típico 121 mA; Máximo 160 mA
- Consumo de alimentación del sensor: Típico 92 mA; Máximo 145 mA
- Conector: BMX FCW 303 con No. de fundas 2 x 20 hilos y dimensiones 0.324 mm<sup>2</sup> de sección y tres metros de longitud.

### MÓDULO DE SALIDAS DIGITALES BMX DDO 3202



#### Datos técnicos:

- Valores nominales: Tensión 24 VCD; Corriente 0,1 A
- Corriente de fuga: En\_0 (100  $\mu$ A para U = 30 V)
- Caída de tensión: En\_1 ( $< 1,5$  V para I = 0,1 A)
- Impedancia de carga mínima: 220  $\Omega$
- Tiempo de respuesta sin incluir la corriente de carga: 1,2 ms
- Protección integrada: Sobretensiones, inversiones, sobrecargas y cortocircuitos.
- Consumo de alimentación de 3,3 V: Típico 125 mA; Máximo 166 mA
- Consumo del pre-actuador de 24 V sin incluir la corriente de carga: Típico 46 mA; Máximo 64 mA
- Potencia disipada: 3,6 W como máx.
- Resistencia de aislamiento:  $>10$  M $\Omega$  (por debajo de 500 VCD)
- Descenso de temperatura: Ninguno
- Conector: BMX FCW 303 con No. de fundas 2 x 20 hilos y dimensiones 0.324 mm<sup>2</sup> de sección y 3 m de longitud

### CONMUTADOR TCS ESM 083F23F1



#### Datos técnicos:

- Conectores blindados: RJ45
- Medium: Par trenzado blindado, categoría CAT 5E
- Longitud total de par: 100 m
- Tensión: 9,6-60 V DC/ 18-30 VCA
- Consumo: 5,3 W
- Temperatura de funcionamiento: 0 a 60°C
- Humedad relativa: 10-90% sin condensación
- Grado de protección: IP20

### PANEL TÁCTIL XBT GT 6340



#### Datos técnicos:

- Representación de las variables: Alfanumérica, mapa de bits, gráfico de barras, visualizador analógico, botón, piloto, reloj, luz de sirena, teclado táctil
- Protocolos transferibles: Uni-TE, Modbus, Modbus TCP/IP
- *Software* de diseño: *Vijeo Designer*
- Tamaño de pantalla LCD: 12,1"
- Tipo (color): TFT
- Compatibilidad con autómatas: Twido, Nano, TSX Micro, Premium, Quantum, Modicon M340
- Puerto USB: 2
- Entrada de vídeo: 1
- Tensión de alimentación: 24 V DC
- Memoria (DRAM): 64 MB
- Memoria interna (Memoria Flash): 32 MB

### FUENTE ABL8RPS24100



#### Datos técnicos:

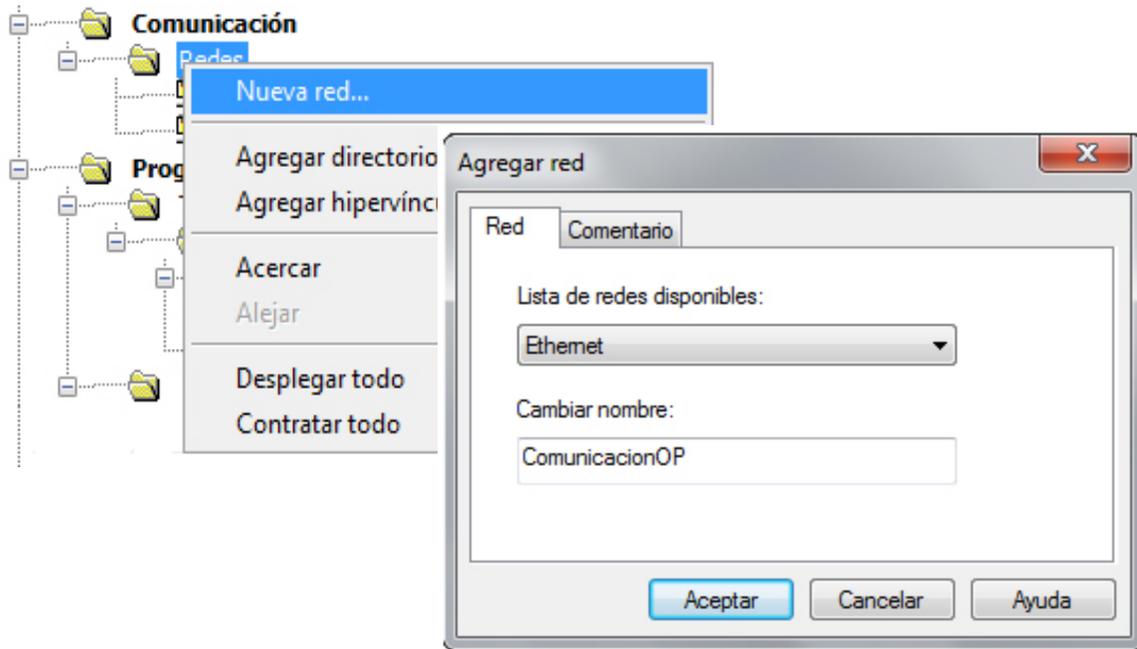
- Voltaje de entrada: 100-120 V AC una fase (L1). 200-500 V AC (L1 y L2)
- Voltaje de salida: 24 V DC
- Corriente de salida: 10 A
- Potencia de entrada: 240 W
- Protección por: sobrevoltaje, sobrecorriente, térmica y cortocircuito.
- IP20
- Temperatura de trabajo: -20 a 60°C
- Frecuencia de operación: 47-63 Hz

**FUENTE ABL8REM24030****Datos técnicos:**

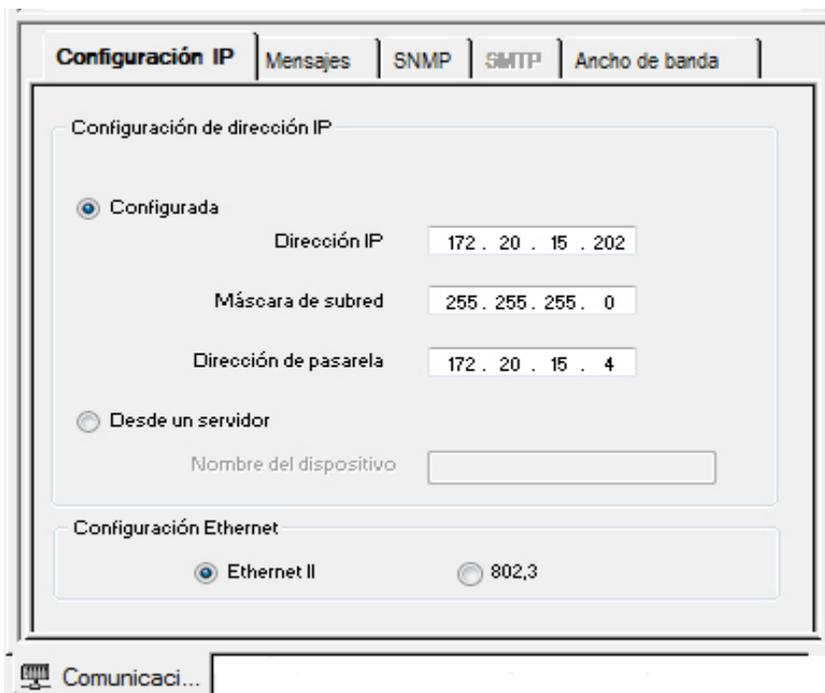
- Corriente de Salida Máx.: 3 A
- Tensión de Entrada AC Máx.: 264 V
- Tensión de Entrada AC Mín.: 85 V
- Núm. de Salidas: 1
- Potencia de Salida Máx.: 72 W
- Tensión Nominal de Salida: 24 V DC
- Tipo de Salida de Alimentación: Ajustable o Fijo

## Anexo A-6 Configuración de la Comunicación PLC-HMI

La comunicación entre el autómeta y el panel del operador comienza definiendo en el *Unity Pro* una nueva red y la dirección del PLC en la misma. Ver **Figura A-6.1**; **Figura A-6.2**.

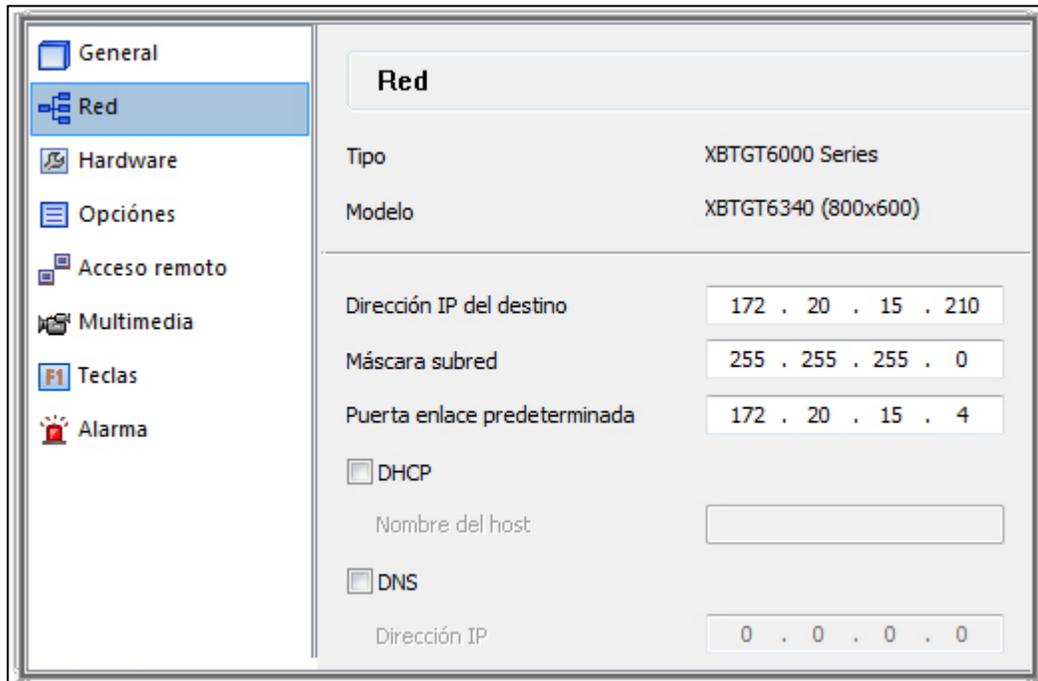


**Figura A-6.1:** Ventanas emergentes para crear una nueva red

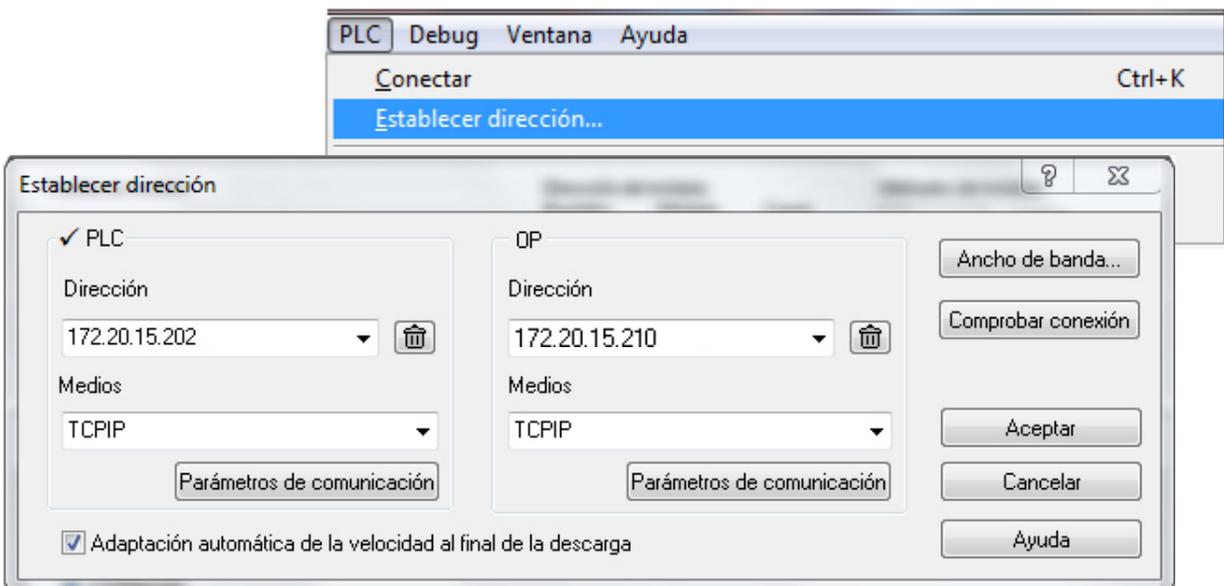


**Figura A-6.2:** Ventana para configurar la dirección del autómeta

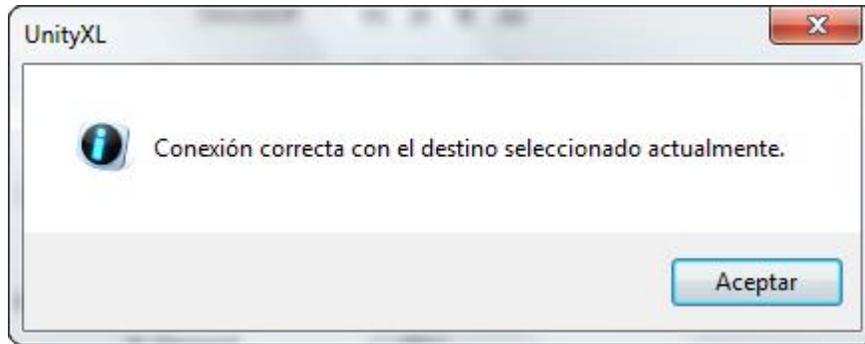
Luego en *Vijeo Designer* a través de la opción red, se asigna una dirección al OP (panel del operador) cuya puerta de enlace tiene que coincidir con la del PLC (Ver **Figura A-6.3**). Una vez que han definido los IP en el autómatas, se establece la dirección y se chequea el estado de la conexión. Ver **Figura A-6.4** y **Figura A-6.5**.



**Figura A-6.3:** Ventana para configurar la dirección del terminal táctil

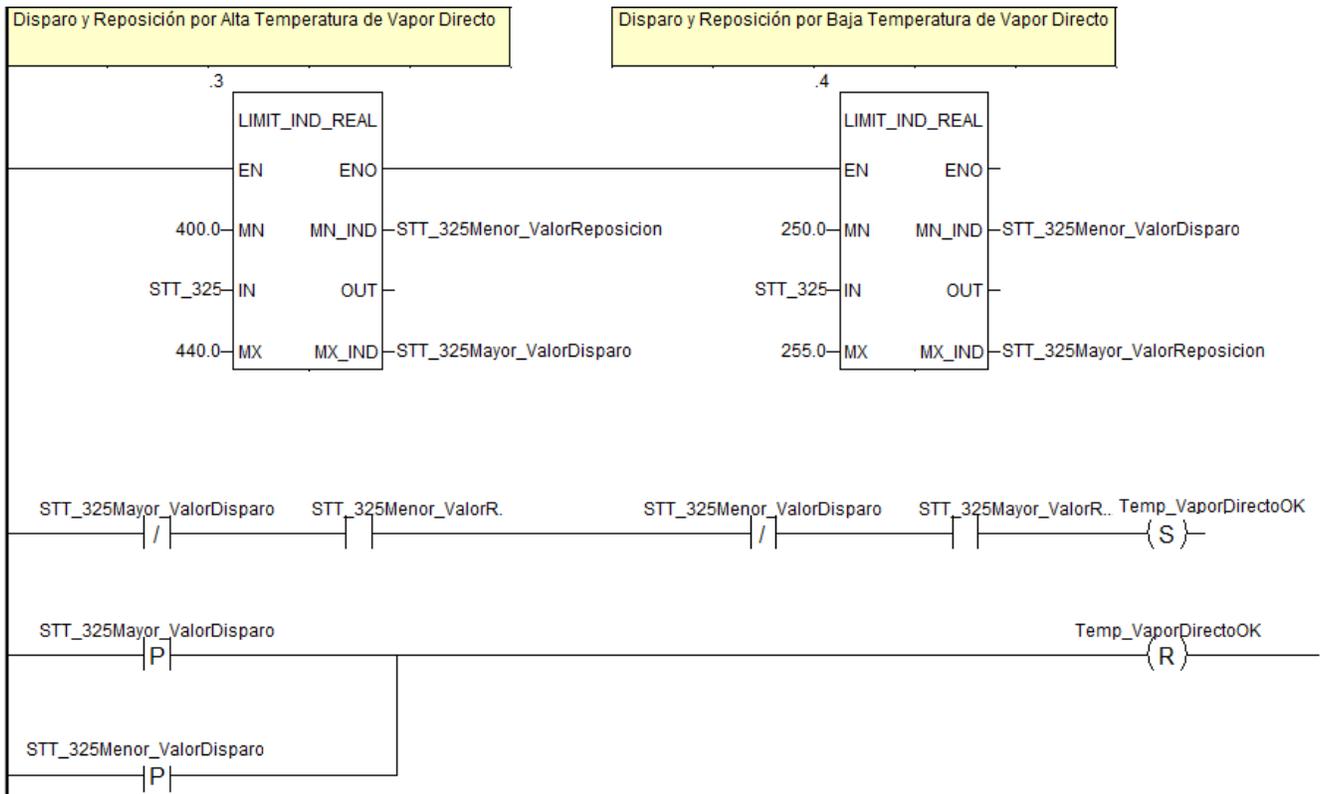


**Figura A-6.4:** Ventanas para comprobar la conexión entre el PLC y el OP

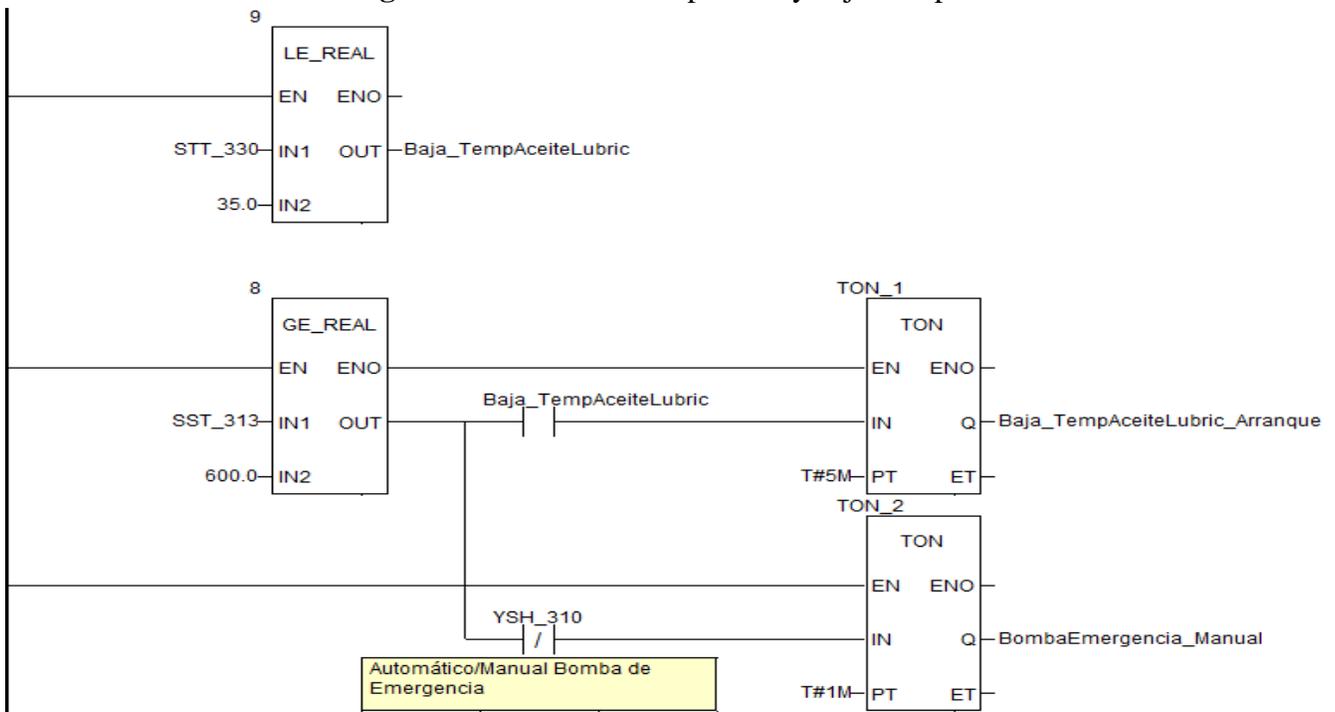


**Figura A-6.5:** Mensaje de conexión válida

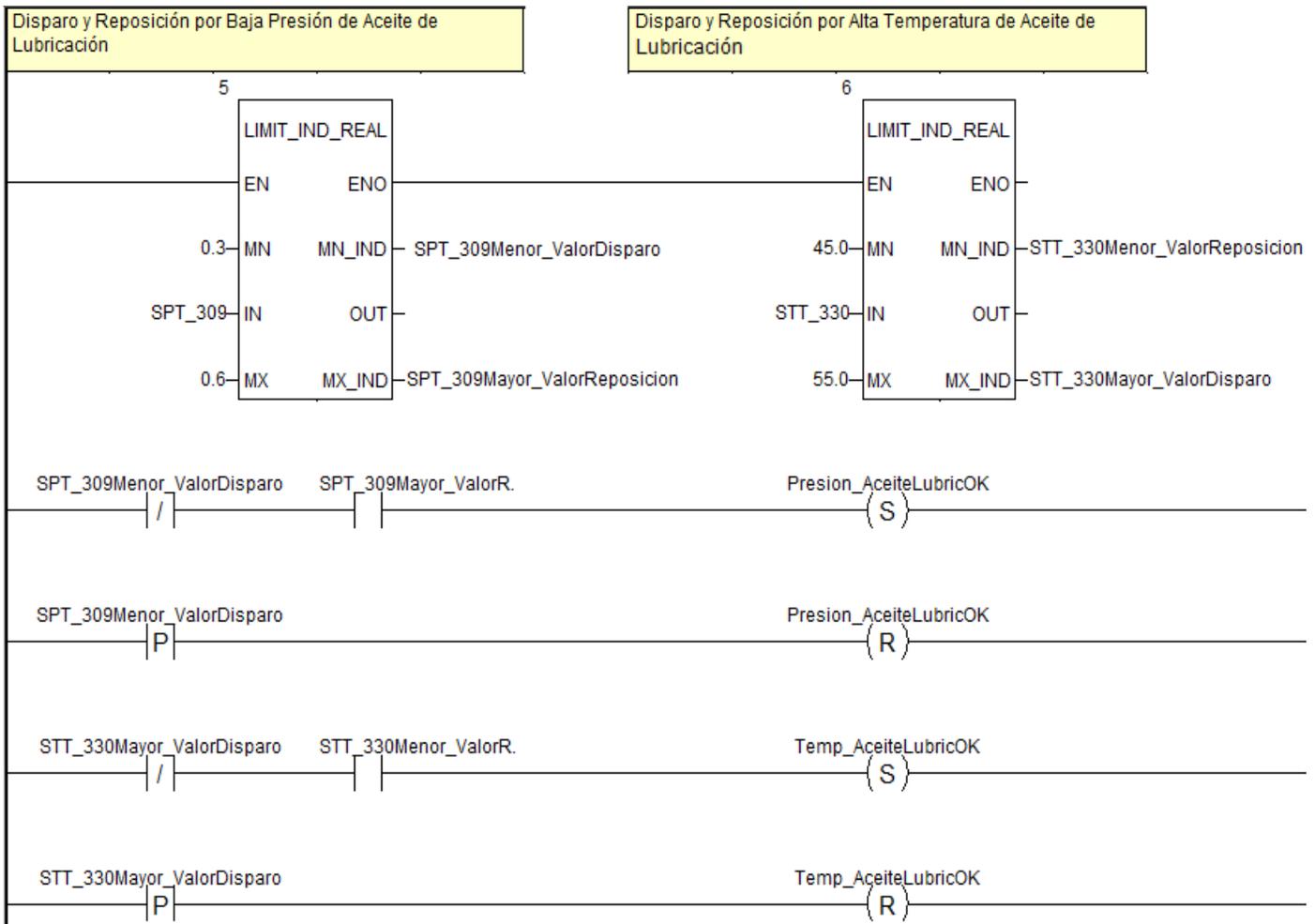
**Anexo A-7 Programas de Protección y Arranque**



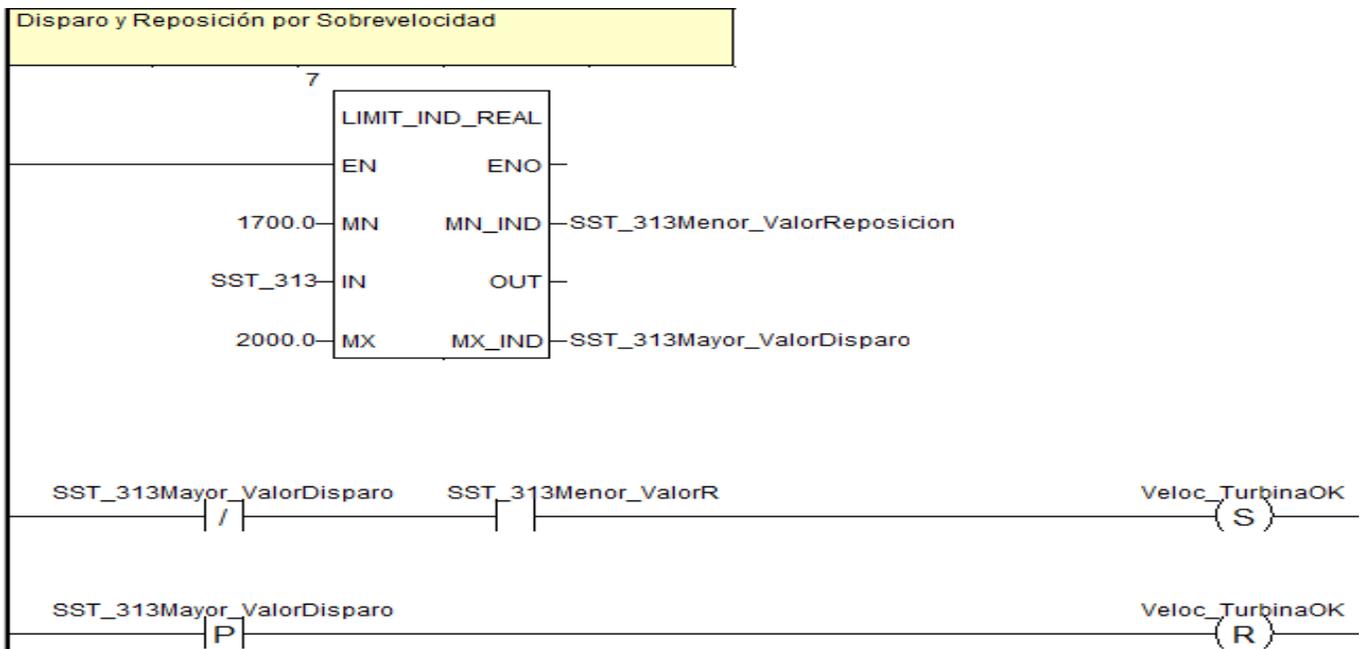
**Figura A-7.1:** Protección por alta y baja Temperatura



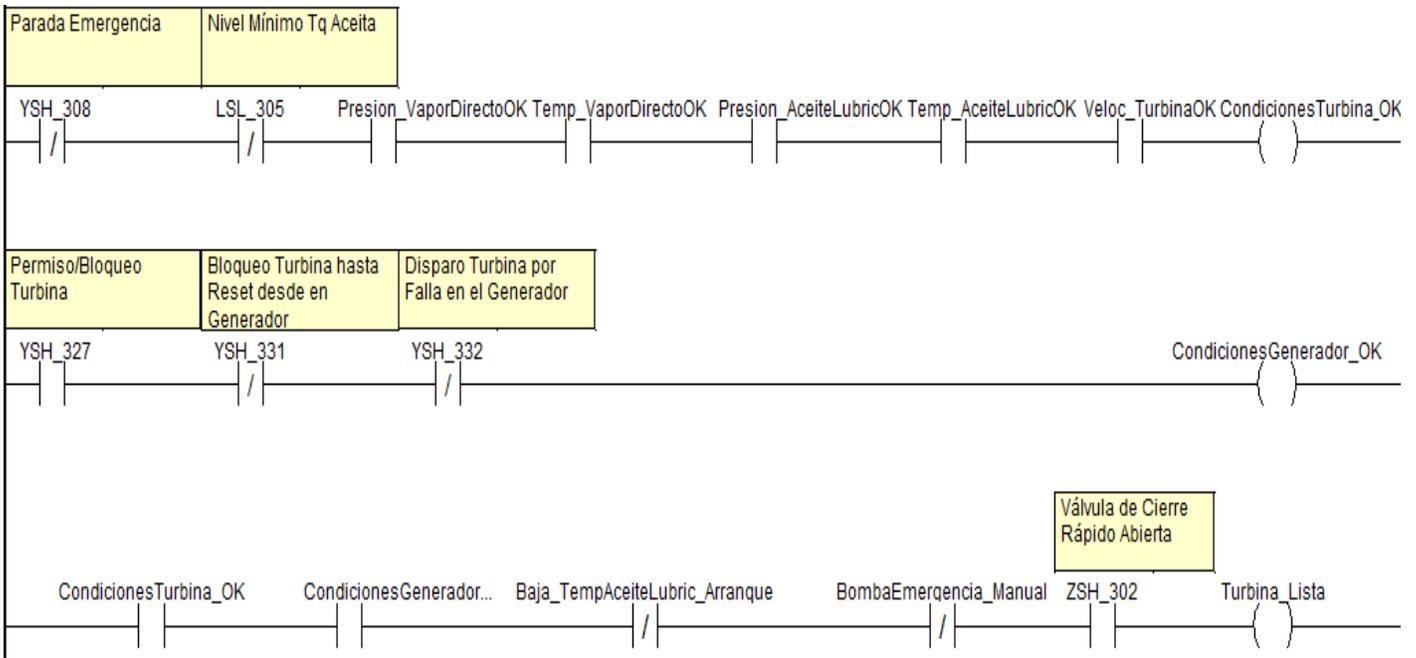
**Figura A-7.2:** Protección por baja temperatura del aceite en el arranque y bomba en manual



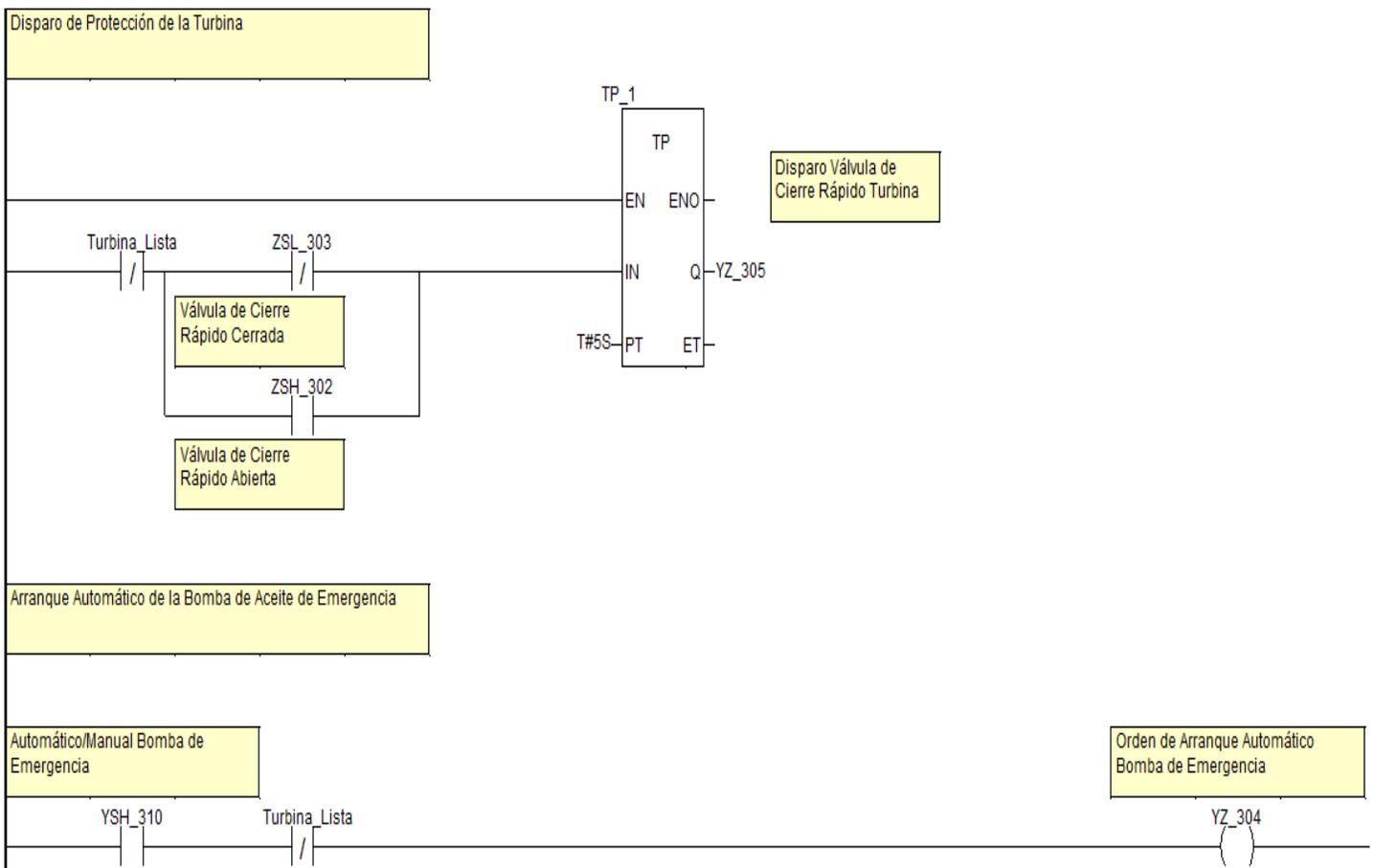
**Figura A-7.3:** Protección por baja presión de aceite de lubricación y alta temperatura



**Figura A-7.4:** Protección por sobrevelocidad



**Figura A-7.5:** Resumen de las condiciones de protección



**Figura A-7.6:** Lógica de disparo

## Anexo A-8 Vincular Variables

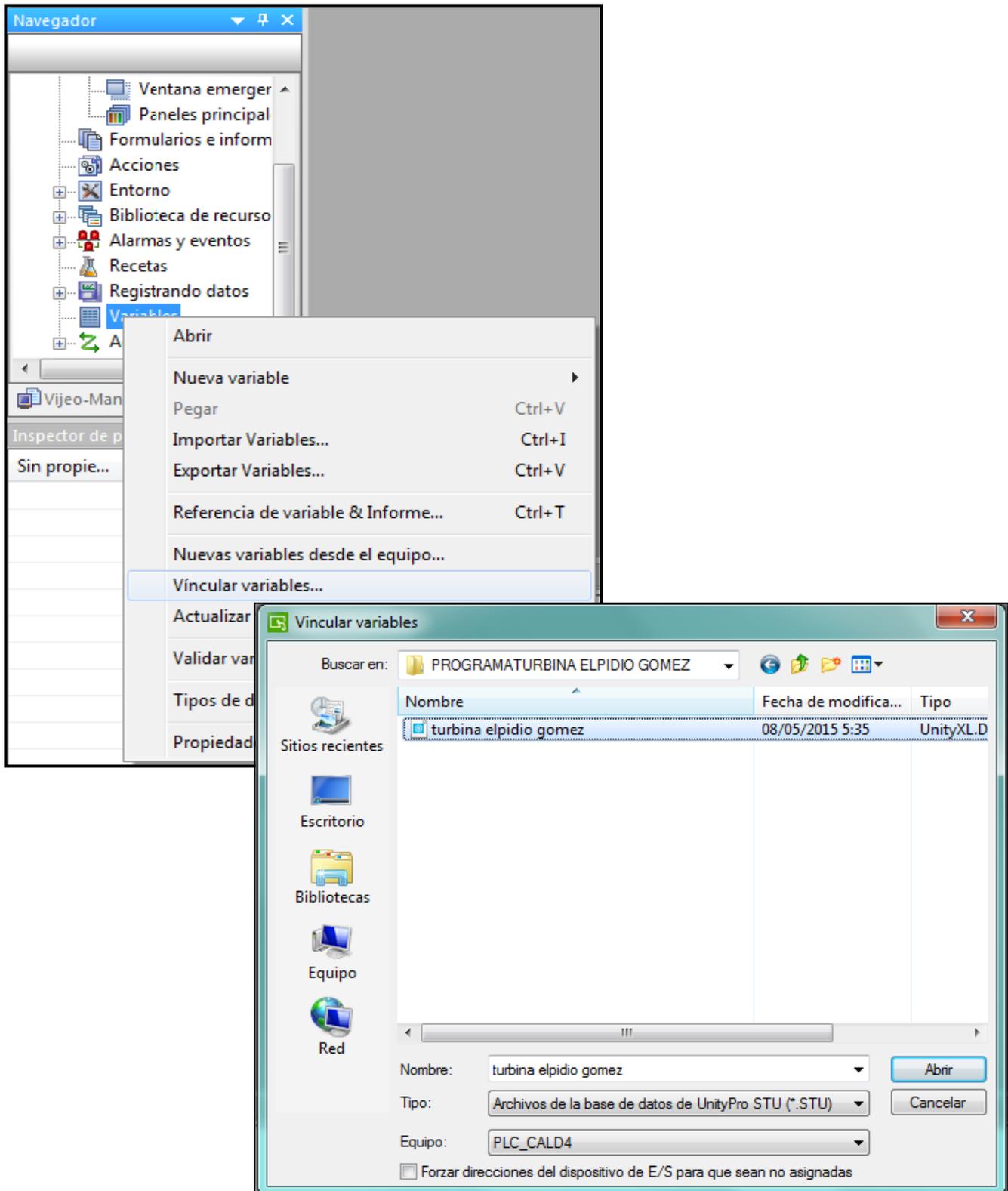


Figura A-8.1: Ventanas para vincular las variables desde *Unity* hacia el *Vijeo*

The image shows two overlapping windows from a software application. The top window is titled "Nuevas variables desde el equipo" (New variables from the equipment). It has a dropdown menu for "Equipo" set to "PLC\_CALD4" and a text field for "Archivo vinculado:" with the path "J:\PROGRAMA...\turbina elpidio gomez.stu". Below this is a table of variables with columns for "Nombre", "Dirección", and "Descripción".

Nombre	Dirección	Descripción
_312	%IW0.3.3	RESERVA
_315	%IW0.3.6	RESERVA (Acti
_318	%IW0.4.1	RESERVA
_319	%IW0.4.2	RESERVA
_320	%IW0.4.3	RESERVA
_321	%IW0.4.4	RESERVA
_322	%IW0.4.5	RESERVA
Baja_TempAceiteLub...	%UV46.375.8.2...	
Baja_TempAceiteLub...	%UV46.376.8.2...	

At the bottom of this dialog, there are buttons for "Seleccionar todo", "Seleccionar ninguno", and "Seleccionado 543 de 543". Below the table are radio buttons for "Creado como" (Created as): "Elementos en la carpeta del equipo" (selected), "Variables que combinan equipo y nombre", "Variables que mantienen el mismo nombre", and "Variable nombrada". There is also a dropdown for "Agregar al grupo de escaneo" set to "PLC\_CALD4".

The bottom window is titled "Destino1 - Editor de variables" (Destination1 - Variable editor). It shows a list of variables with a table:

Nombre	Variable
76	PLC_EquipoModbus01.VEL_LIM_0.OUT_MIN
77	PLC_EquipoModbus01.VEL_LIM_0.RATE
78	PLC_EquipoModbus01.VEL_LIM_0.IN
79	PLC_EquipoModbus01.STT_332
80	PLC_EquipoModbus01.STT_331
81	PLC_EquipoModbus01.STT_330
82	PLC_EquipoModbus01.STT_329
83	PLC_EquipoModbus01.STT_328
84	PLC_EquipoModbus01.STT_327
85	PLC_EquipoModbus01.STT_326
86	PLC_EquipoModbus01.STT_325
87	PLC_EquipoModbus01.STT_316
88	PLC_EquipoModbus01.SST_313

Below the list is a section titled "Zona de retroalimentación" (Feedback zone) with the text: "Vincular variables" (Link variables), "Se han leído los símbolos de autómeta raíz 192." (The root 192 symbols have been read.), and "Vínculo de variables ha finalizado" (Variable link has finished).

Figura A-8.2: Indicación del vínculo de las variables desde *Unity* hacia *Vijeo*





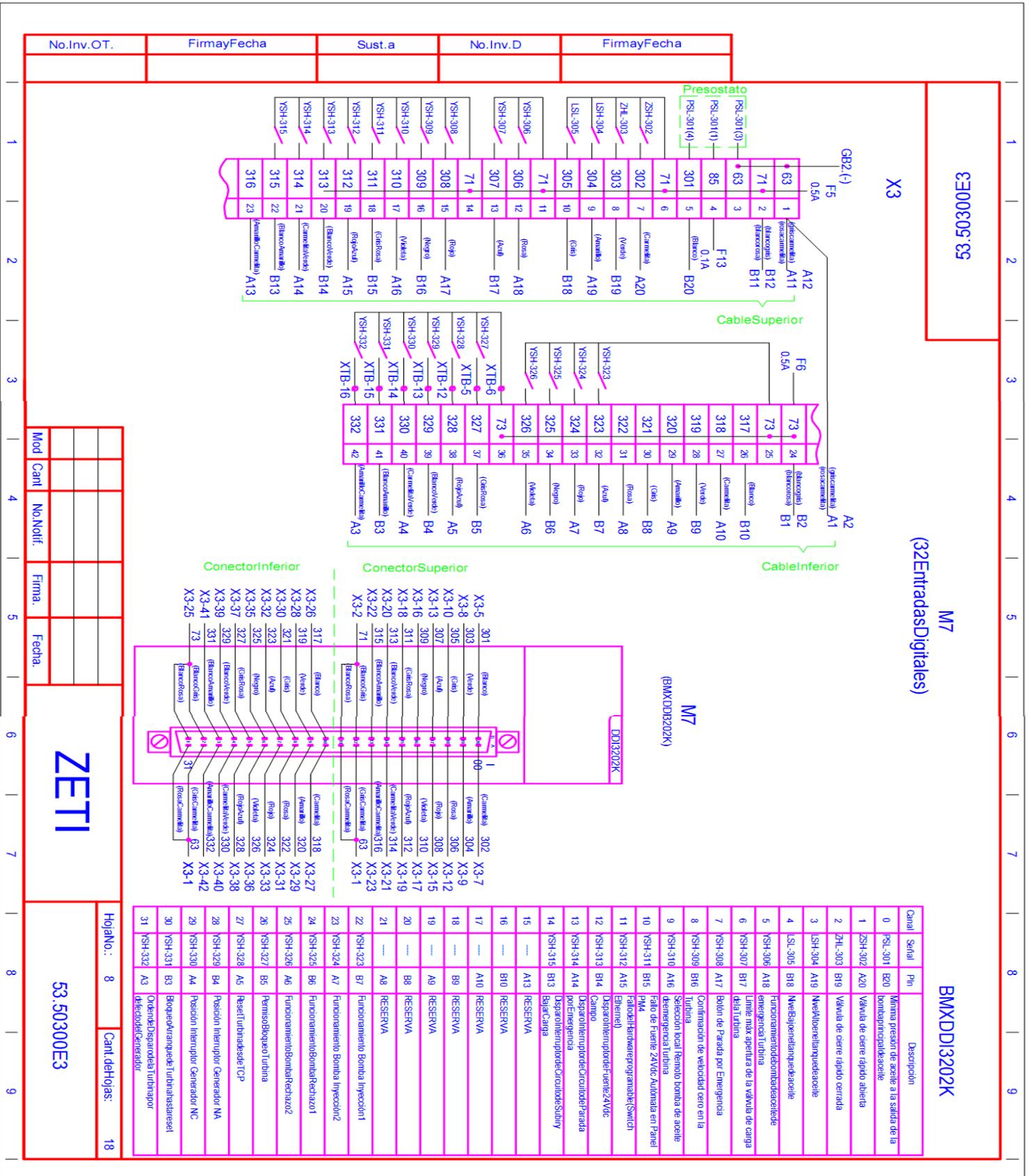
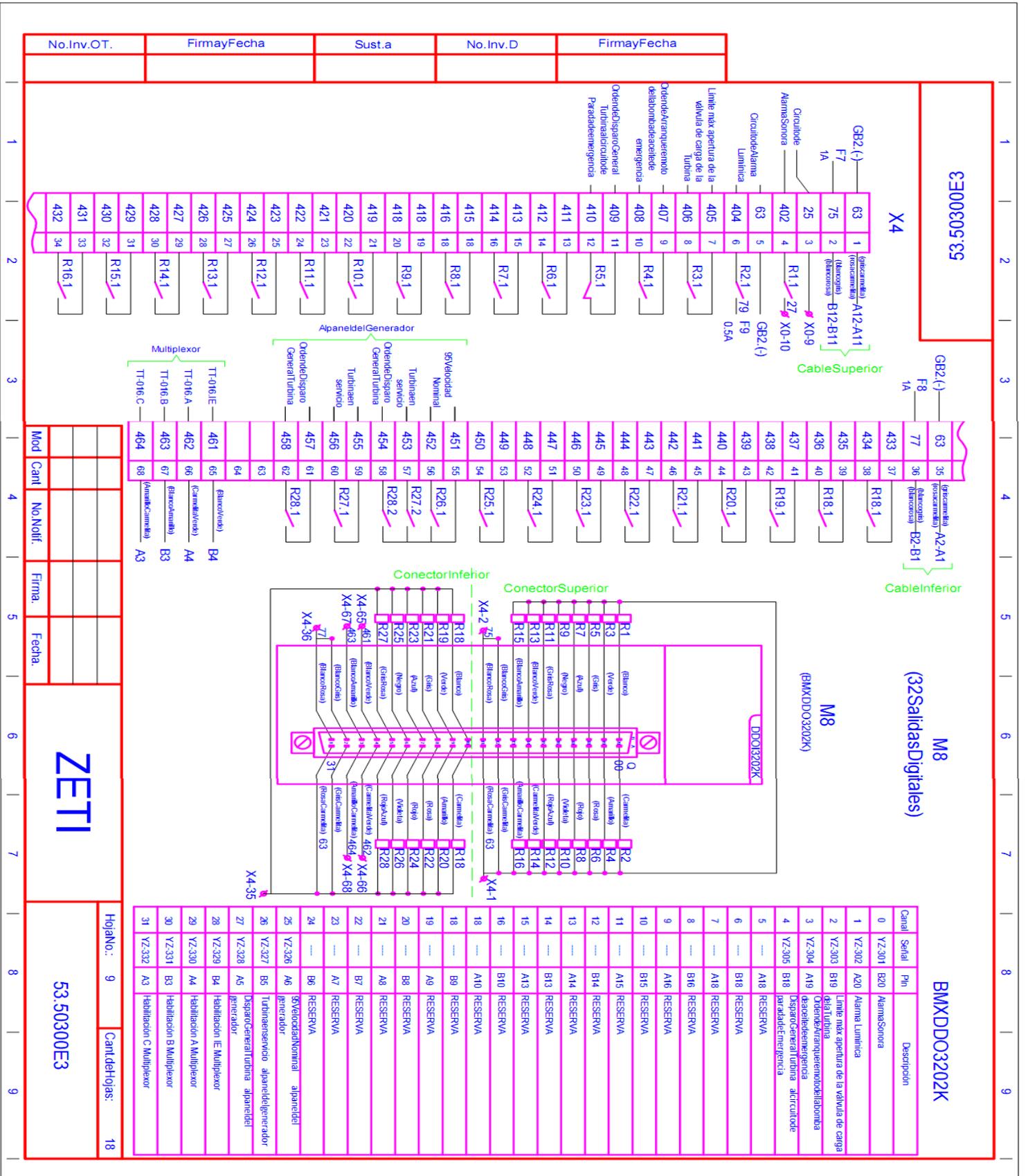


Figura B-1.3: Terminales de conexiones para entradas digitales



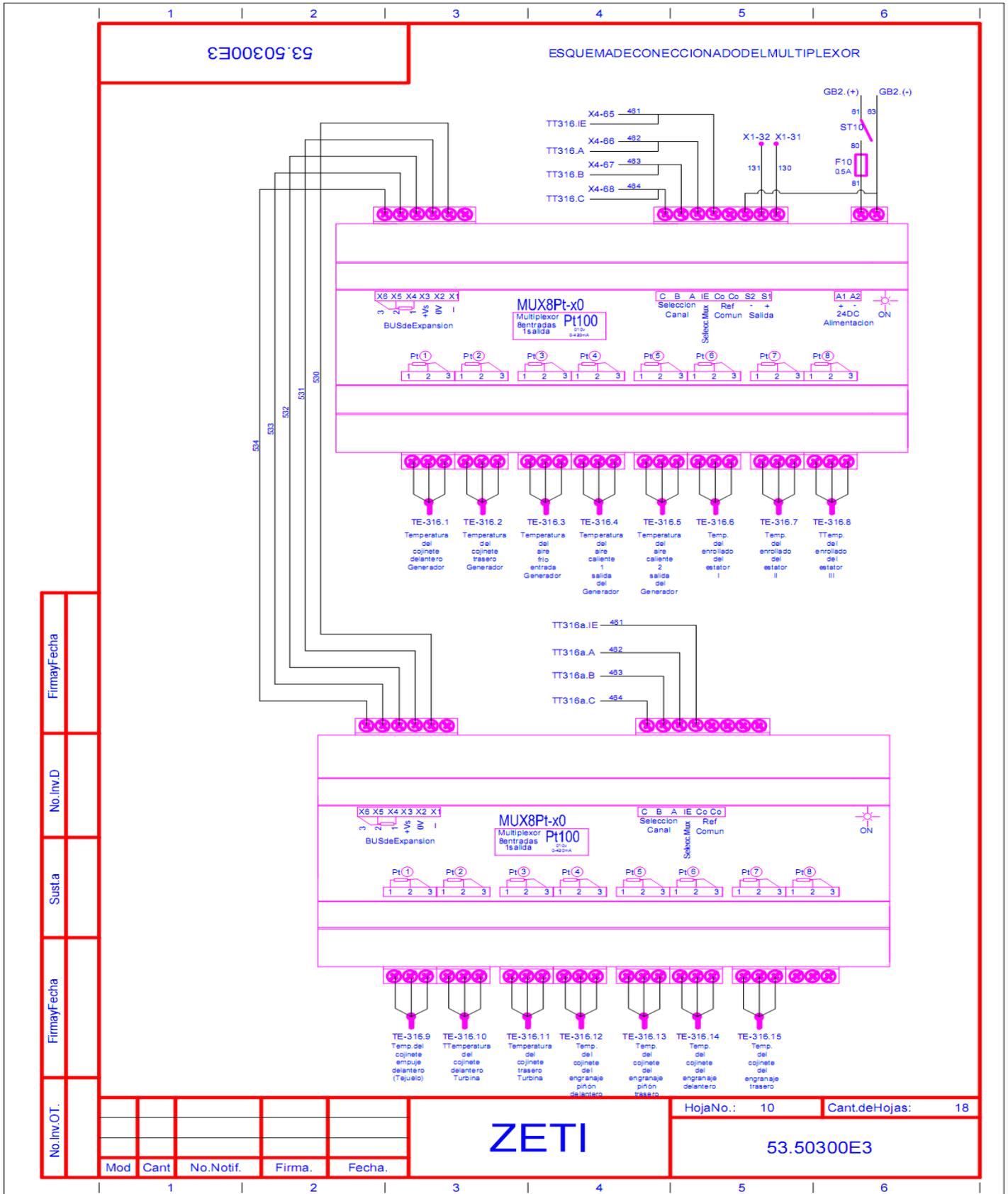
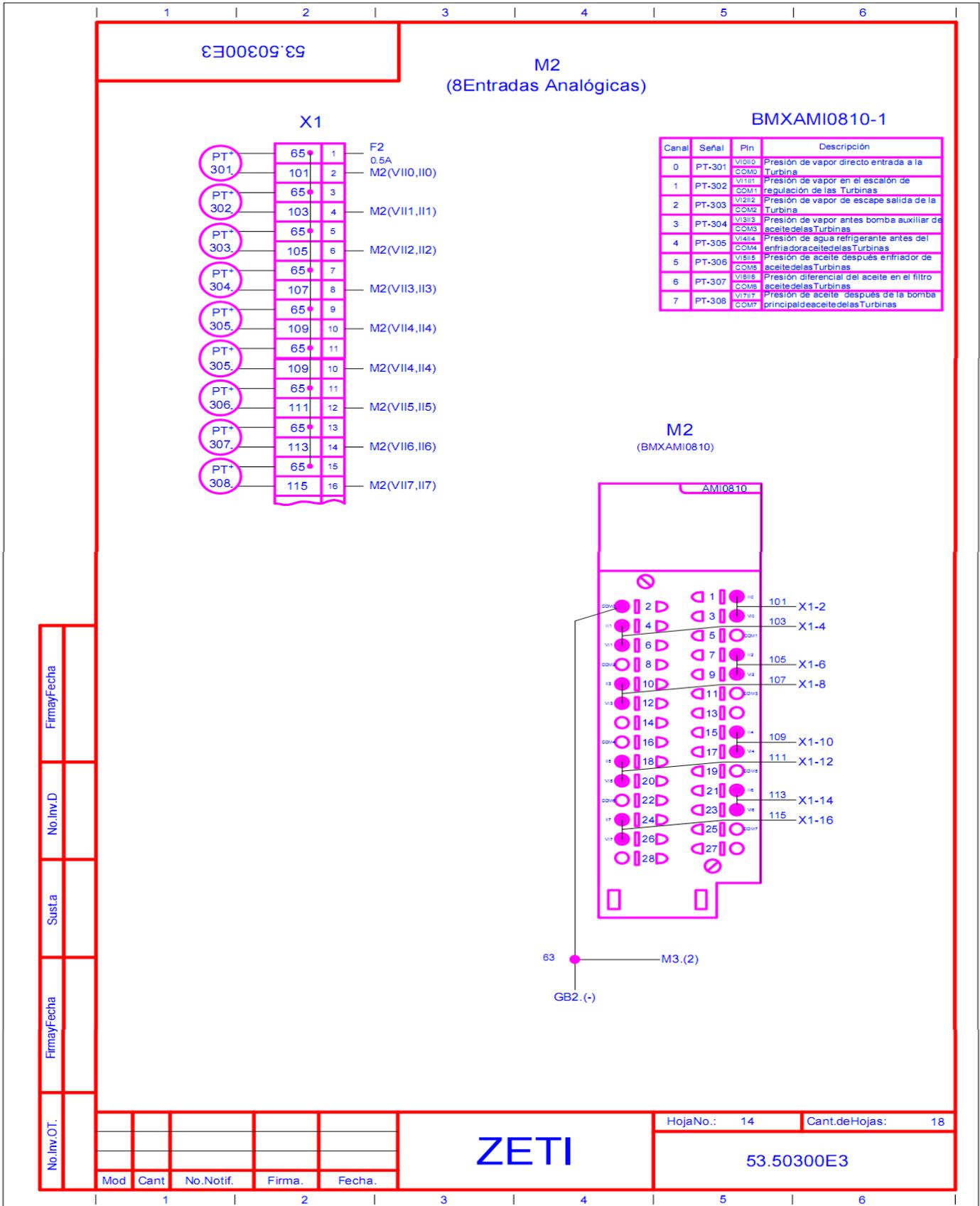


Figura B-1.5: Conexionado del multiplexor



**Figura B-1.6:** Terminales de conexiones para entradas analógicas

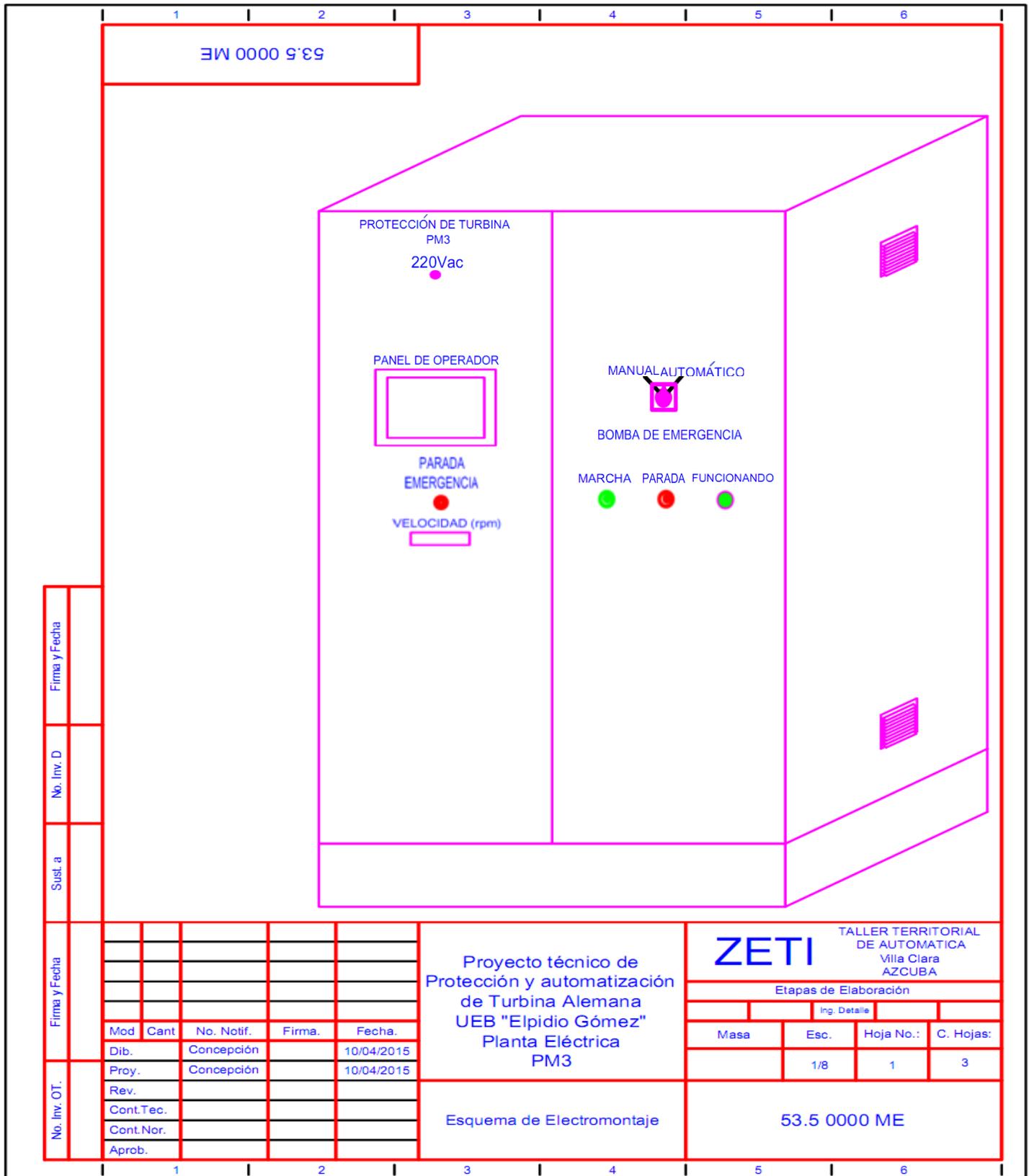


Figura B-1.7: Plano del panel para el control del arranque y protección de la turbina

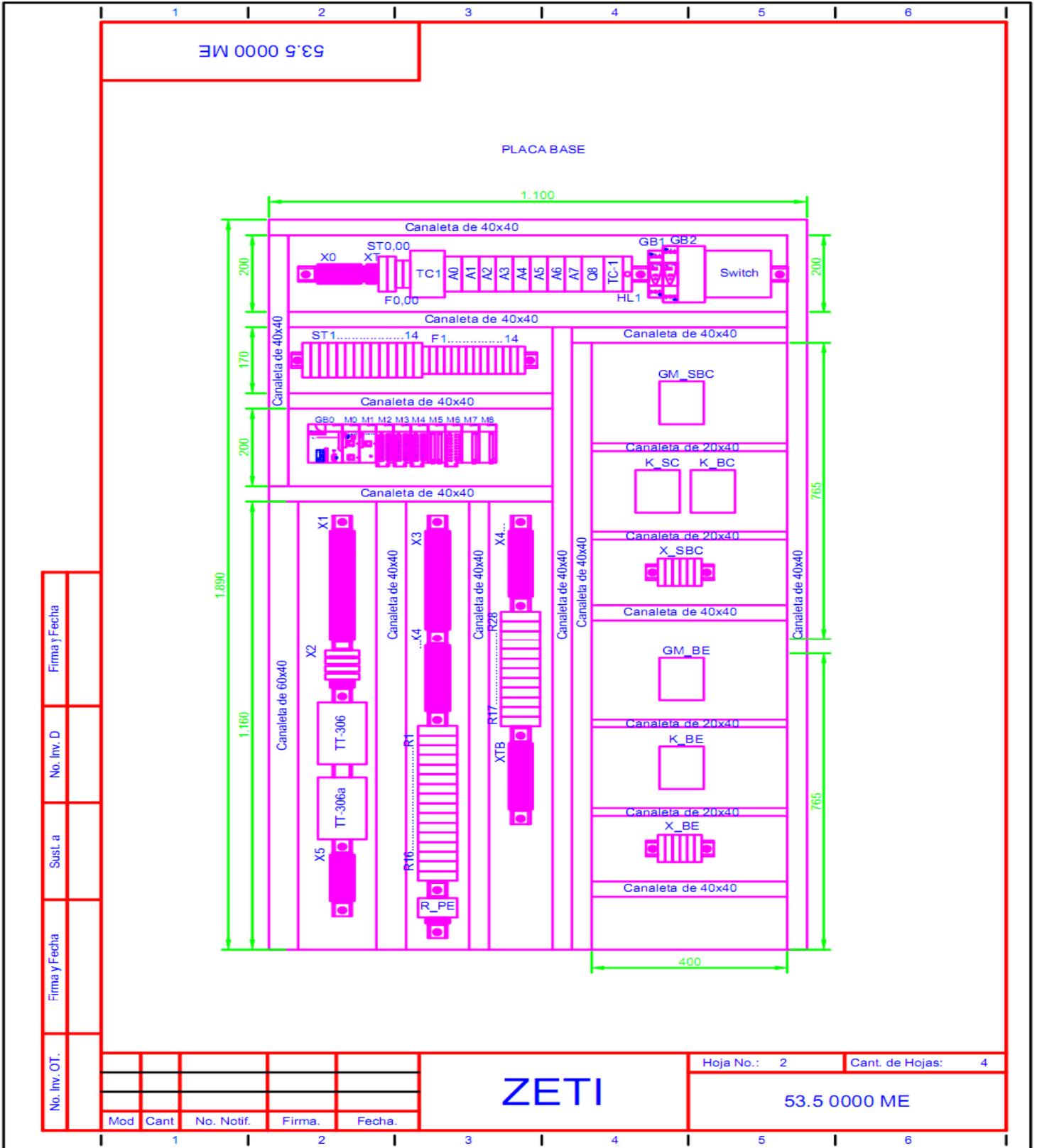


Figura B-1.8: Montaje interior de los componentes del panel

## Anexo B-2 Instrumentos de Medición que Intervinieron en el Proceso de Ensamblaje y Prueba del Panel



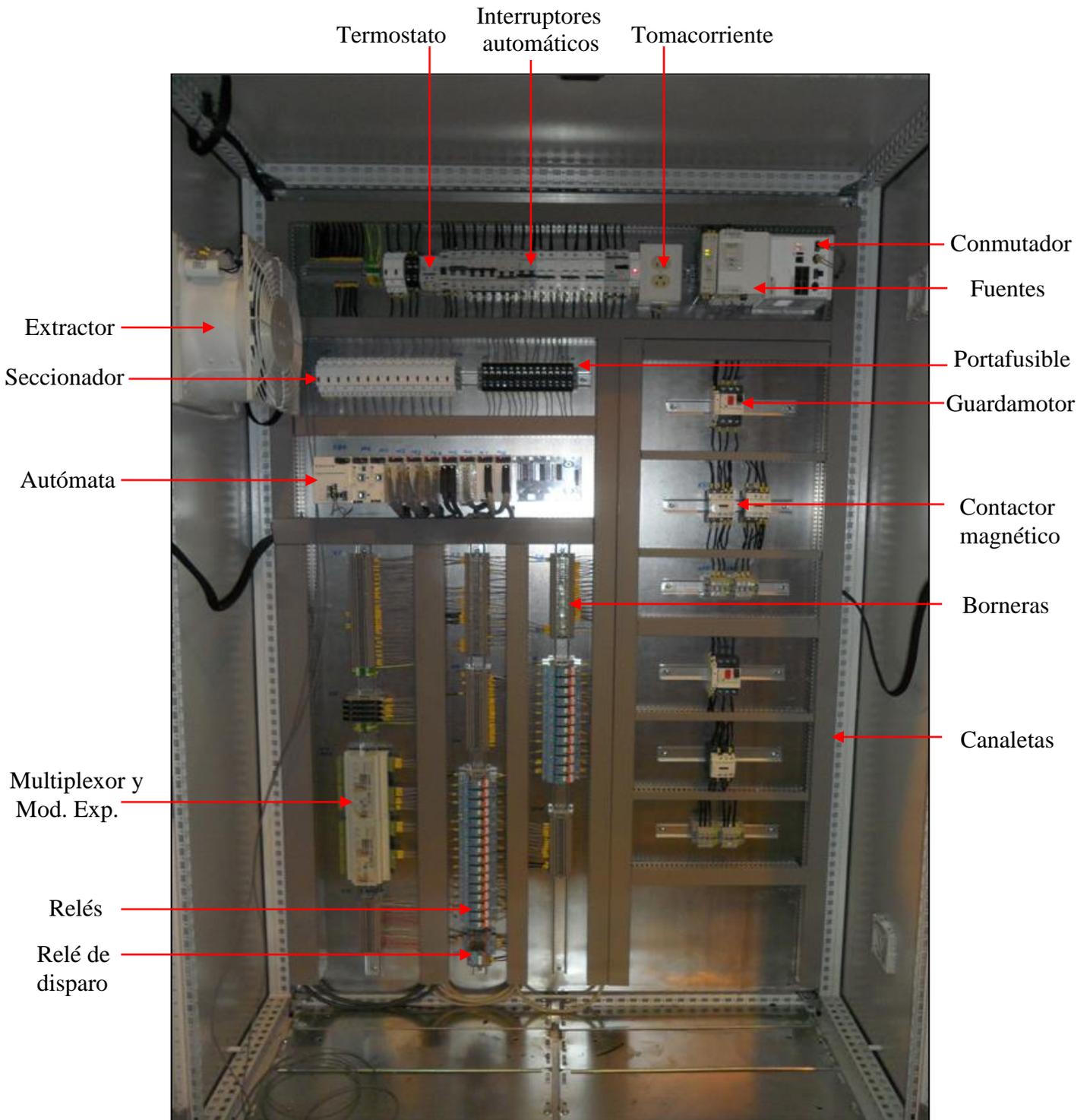
Figura B-2.1: Llave Dinamométrica TORCOFIX-X



Figura B-2.2: Megaohmímetro YOKOGAWA-2404



Figura B-2.3: Multímetro digital FLUKE-117

**Anexo B-3 Panel Para el Control del Arranque y Protección de la Turbina****Figura B-3.1:** Interior del panel construido

**Anexo B-4 Equipos Empleados en la Verificación del Funcionamiento del Diseño****Figura B-4.1:** Calibrador de corriente/voltaje EXTECH-412355A**Figura B-4.2:** Calibrador de campo y comunicador BEAMEX-MC6**Figura B-4.3:** Generador resistivo PULSAR-80Cu

**Anexo B-5 Precios (CUP) de los Automatas y Terminales Táctiles de  
MITSUBISHI, SCHNEIDER y SIEMENS**

Procesador central con 16 Entradas Digitales a 24 VCD, 16 Salidas Digitales a relé. Ref. FX3U-32MR/ES	985.58
Módulo de 16 entradas digitales a 24 V DC. Ref. FX2N-16EX-ES/UL	246.49
Módulo de 16 salidas digitales a relé. Ref. FX2N-16EYR-ES/UL	257.20
3 Módulos de 8 entradas analógicas (1-5 VCD, 4-20 mA DC, 0-10 VCD). Ref. X2N-8AD	1739.64
Módulo de 4 salidas analógicas 4-20 mA. Ref. FX2N-4DA	358.06
2 Módulos de 4 entradas PT-100 Ref. FX2N-4AD-TC	920.00
Terminal táctil Ref. GT 1455-QTBDE, 65,536 colores TFT display, alimentación 24 VCD. Con el cable	1039.29
Fuente de alimentación 120 VCA IN/24 DC salida 2A. Ref. FX2N-20PSU	120.12
Módulo de Comunicación ETHERNET 100-Base TX para procesador de la serie FX3U-32MR/ES. FX3U-ENET-P502.	450.13
Importe	6116.51

**Tabla B-5.1: Propuesta MITSUBISHI**

Los bastidores BMX XBP para estaciones del PLC M340 de Modicon. Ref. BMX XBP 1200	198.72
Procesador M340, con puerto Ethernet integrado, con un conector RJ45 para comunicación Modbus (RS-232/RS-485), conector USB hembra tipo B para conectar PC de programación, con una tarjeta de ampliación de memoria de 8 Mb de programa y 16 Mb de ficheros (Ref. BMX RMS 008 MPF). Ref. BMX P342020	1195.61
Terminal táctil 12.1" color. Marca Magelis serie XBTG. Con comunicación Ethernet Modbus TCP/IP. Ref. XBT-GT6340	2727.44
1 Módulo de 32 entradas 24V Ref. BMX DDI 3202K	245.29
1 Módulo de 32 salidas 24V Ref. BMX DDO 3202K	290.19
1 Fuente de alimentación VCC estándar 16W Ref. BMX CPS 2010	180.44
Módulo Ethernet 10/100 RJ45 WEB Ref. BMX NOE 0100	817.33
3 Módulos de 8 entradas analógicas Ref. BMX AMI 0810	1472.91
1 Módulo de 8 entradas para sensores de temperatura Ref. BMX ART0814	579.74
1 Módulo de 4 salidas analógicas 24V Ref. BMX AMO 0410	424.05
Importe total	8131.72

**Tabla B-5.2: Propuesta SCHNEIDER**

Autómata Simatic S7-300. 24 VCD. Configuración de 24 ED+16 SD Ref. 6ES7313-5BF03-0AB0	1737.61
Panel de Operador Simatic OP 77A. Ref. 6AV6641-0BA11-0AX1	1300.44
1 Tarjeta de entradas digitales 16 ED. Ref. 6ES7321-1BH02-0AA0	600.71
1 Tarjetas de salidas digitales 16 SD. Ref.6ES7322-1BH01-0AA0	774.28
1 Fuente alimentación; entrada 120-230 VCA./ Salida 24 V DC / 4 A	866.58
Kit de inicio OP 77A, compuesto de: OP 77A, WinCB-Flexiblem 2005 UpdateService.	1155.26
1 Tarjetas de salidas analógicas 4 SA. Ref. 6ES7332-5HD01-0AB0	800.26
3 Tarjetas de entradas analógicas 8 EA. Ref. 6ES7331-7KF02-0AB0	2388.90
1 Módulo 8 entradas para sensores de temperatura Ref. 6ES7331-7PF10-0AB0	580.58
Procesador de Comunicación ETHERNET 100-Base TX para procesador de la serie S7-300	525.30
Importe total	10729,92

**Tabla B-5.3:** Propuesta SIEMENS

**Anexo B-6 Promedio de Fallas Eléctricas y Tiempo en Resolverlas**

<b>TURBINA ALEMANA DE TERCERA GENERACIÓN</b>				
Meses Años	Fallas	Total de Horas	Fallas	Total de Horas
	2013	2013	2014	2014
Noviembre	-	-	1	4
Diciembre	2	12	1	8
Enero	1	4	2	10
Febrero	1	2	2	15
Marzo	1	7	1	2
Abril	-	-	1	1.5
Promedio de fallas y horas entre los dos años			1.3	6.5

**Tabla B-6.1:** Fallas de la turbina durante los años 2013 y 2014