



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

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA PROPUESTA DE
AUTOMATIZACIÓN DE UN TURBOGENERADOR DE ESCAPE
DE 4MW, EN UN INGENIO AZUCARERO**

Victor Manuel Chitay Alvarado

Asesorado por el Ing. Julio Douglas Antonio Ruiz González

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA PROPUESTA DE
AUTOMATIZACIÓN DE UN TURBOGENERADOR DE ESCAPE
DE 4MW, EN UN INGENIO AZUCARERO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

VICTOR MANUEL CHITAY ALVARADO

ASESORADO POR EL ING. JULIO DOUGLAS ANTONIO RUIZ GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Narda Lucía Pacay Barrientos |
| VOCAL V | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira |
| EXAMINADOR | Ing. Romeo Nefalí López Orozco |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DE UN TURBOGENERADOR DE ESCAPE DE 4MW, EN UN INGENIO AZUCARERO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 8 de abril de 2009.


Victor Manuel Chitay Alvarado

Guatemala, 20 de mayo de 2015

Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12

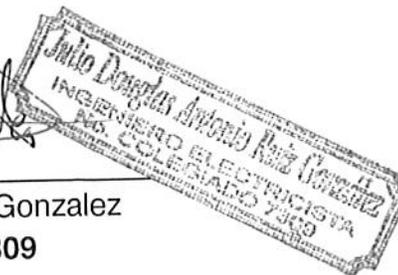
Estimado Ing. Guillermo Puente

Le saludo cordialmente deseando que tengan éxito en sus labores cotidianas, el motivo de la presente es para informarles que yo Ing. Julio Douglas Ruiz Gonzalez, asesor de la tesis titulada: ESTUDIO TECNICO ECONOMICO DE LA PROPUESTA DE AUTOMATIZACION DE UN TURBOGENERADOR DE ESCAPE DE 4MW, EN UN INGENIO AZUCARERO del alumno Victor Manuel Chitay Alvarado, carné 200412354, habiendo supervisado, revisado el trabajo de graduación y realizado las correcciones correspondientes, doy por aprobado la tesis, para su posterior entrega y aprobación en la escuela de Mecánica Eléctrica.

Agradeciendo de antemano su atención.

Atentamente.


Ing. Julio Douglas Ruiz Gonzalez
Colegiado. No. 7309





Ref. EIME 42. 2015
Guatemala, 9 de MARZO 2015.

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

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA PROPUESTA DE
AUTOMATIZACIÓN DE UN TURBOGENERADOR DE
ESCAPE DE 4MW, EN UN INGENIO AZUCARERO,** del
estudiante **Victor Manuel Chitay Alvarado,** que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
DIRECCIÓN Y ENSEÑANZA A TODOS

Ing. Francisco Javier González
Coordinador Área Potencia



STO



REF. EIME 43. 2015.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; VICTOR MANUEL CHITAY ALVARADO titulado: ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DE UN TURBOGENERADOR DE ESCAPE DE 4MW, EN UN INGENIO AZUCARERO, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 17 DE JULIO 2015.



DTG. 435.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DE UN TURBOGENERADOR DE ESCAPE DE 4MW, EN UN INGENIO AZUCARERO**, presentado por el estudiante universitario: **Víctor Manuel Chitay Alvarado**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, septiembre de 2015



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por el cuidado que ha tenido de mi vida. Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia (Proverbios 2:6).
- Mi padre** Antonio Chitay, por ser ejemplo de un buen padre, por su amor y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.
- Mi madre** Feliciano Alvarado, por su gran amor y apoyo incondicional, sus consejos, y sobre todo, su oración constante para que Dios tuviera cuidado de mi vida, y pudiera concluir este trabajo de graduación.
- Mi esposa e hijos** Tania, Valeria y Alejandro Chitay, por su amor, comprensión y, sobre todo, por ser la razón de mi esfuerzo diario.
- A mis hermanos** Ana María, Olga Marina, María Angelina y Jorge Antonio Chitay Alvarado, por su apoyo incondicional.
- Mis sobrinos** Con cariño.

César Gutiérrez

Por brindarme su apoyo incondicional.

**Universidad de
San Carlos de Guatemala**

Por haberme brindado la oportunidad de
estudiar una carrera universitaria.

Usted

Con respeto.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|--|--|
| Dios | Por la vida y sus bendiciones. |
| Mis padres | Por la vida, la motivación, confianza y el apoyo incondicional. Dios los bendiga grandemente. |
| Mi asesor | Ing. Julio Douglas Antonio Ruiz González, por su tiempo, colaboración y paciencia en la asesoría y revisión de este trabajo de graduación. |
| Ingenio Santa Ana | Por apoyarme con el tema de mi trabajo de graduación. |
| Universidad de San Carlos de Guatemala y Facultad de Ingeniería | Por brindarme los conocimientos para realizar este trabajo de graduación. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | XI |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XV |
| GLOSARIO | XVII |
| RESUMEN..... | XXIII |
| OBJETIVOS..... | XXV |
| INTRODUCCIÓN | XXVII |
| | |
| 1. MARCO DE REFERENCIA | 1 |
| 1.1. Cogeneración | 1 |
| 1.2. Operación de calderas en un ingenio azucarero | 2 |
| 1.2.1. Funcionamiento de una caldera en un ingenio azucarero..... | 2 |
| 1.3. Partes de una caldera de vapor de agua..... | 3 |
| 1.3.1. Cámara de agua | 3 |
| 1.3.2. Cámara de vapor | 3 |
| 1.4. Tipos de calderas de vapor de agua | 4 |
| 1.4.1. Calderas acuotubulares..... | 4 |
| 1.4.2. Calderas pirotubulares..... | 5 |
| 1.5. Turbinas de vapor de agua..... | 5 |
| 1.5.1. Turbina de tipo reacción | 6 |
| 1.5.2. Turbina de tipo de impulso o acción | 6 |
| 1.5.3. Otros tipos de turbina | 7 |
| 1.5.4. Eficiencia de las turbinas de vapor | 7 |
| 1.6. Turbogeneradores | 11 |

| | | |
|----------|--|----|
| 1.6.1. | Funcionamiento de un turbogenerador con condensador..... | 11 |
| 1.6.2. | Funcionamiento de un turbogenerador de escape..... | 11 |
| 1.6.3. | Generador síncrono | 12 |
| 1.6.3.1. | Características de los generadores síncronos..... | 12 |
| 1.6.3.2. | Tipos constructivos de generadores síncronos..... | 13 |
| 1.6.4. | Protecciones de un turbogenerador en un ingenio azucarero..... | 14 |
| 1.7. | Principios de termodinámica | 14 |
| 1.7.1. | Conceptos fundamentales..... | 14 |
| 1.7.2. | Leyes que gobiernan la termodinámica..... | 15 |
| 1.7.2.1. | Ley cero de la termodinámica | 15 |
| 1.7.2.2. | Primera ley de la termodinámica: energía total que entra al sistema | 15 |
| 1.7.2.3. | Segunda ley de la termodinámica: energía total que sale del sistema..... | 16 |
| 1.7.2.4. | Tercera ley de la termodinámica: cambio en la energía total del sistema..... | 16 |
| 1.7.3. | Propiedades de los líquidos y de los gases..... | 17 |
| 1.7.3.1. | Propiedades termodinámicas del vapor | 17 |
| 1.7.3.2. | Diagramas termodinámicos..... | 17 |
| 1.7.3.3. | Procesos termodinámicos | 17 |
| 1.7.4. | Los gases ideales..... | 18 |
| 1.7.5. | Ciclos de potencia del vapor | 19 |

| | | | |
|------|----------|---|----|
| | 1.7.5.1. | Ciclo Carnot..... | 19 |
| | 1.7.5.2. | Ciclo Rankine..... | 19 |
| | 1.7.5.3. | El ciclo de recalentamiento..... | 20 |
| | 1.7.6. | Transferencia de calor | 21 |
| | 1.7.6.1. | Transmisión por conducción | 22 |
| | 1.7.6.2. | Transmisión por convección | 22 |
| | 1.7.6.3. | Transmisión por radiación..... | 22 |
| | 1.7.6.4. | Intercambiador de calor del tipo casco y tubos..... | 23 |
| 1.8. | | Elemento de la automatización..... | 23 |
| | 1.8.1. | Scada | 24 |
| | 1.8.2. | Concepto del sistema | 25 |
| | 1.8.3. | Interfaz humano-máquina | 29 |
| | 1.8.4. | Componentes del sistema | 29 |
| | 1.8.4.1. | Unidad de terminal remota (UTR)..... | 29 |
| | 1.8.4.2. | Estación maestra | 30 |
| | 1.8.4.3. | Infraestructura y métodos de comunicación..... | 30 |
| 1.9. | | Equipos de automatización..... | 31 |
| | 1.9.1. | Actuador de la turbina de vapor..... | 31 |
| | 1.9.2. | Mando de la turbina de vapor | 32 |
| | 1.9.3. | Gobernador digital | 32 |
| | 1.9.4. | Controlador de carga | 32 |
| | 1.9.5. | Regulador de voltaje..... | 33 |
| 2. | | ANÁLISIS DE LA SINCRONIZACIÓN Y ELEMENTOS QUE INFLUYEN EN LA OPERACIÓN ACTUAL DE UN TURBOGENERADOR DE ESCAPE, EN UN INGENIO AZUCARERO.. | 35 |
| | 2.1. | Elementos de operación en turbogenerador de escape | 35 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.2. | Información general del turbogenerador de escape Worthington de 4 MW..... | 38 |
| 2.2.1. | Conexiones eléctricas | 38 |
| 2.2.2. | Disposiciones para la manipulación manual del | 40 |
| 2.2.3. | Estator y rotor del generador síncrono | 41 |
| 2.3. | Descripción del generador eléctrico Worthington | 42 |
| 2.3.1. | Funcionamiento del generador Worthington..... | 43 |
| 2.3.2. | Arranque del generador Worthington | 43 |
| 2.4. | Devanados | 43 |
| 2.4.1. | Temperatura en devanados | 43 |
| 2.4.2. | Resistencia de aislamiento..... | 44 |
| 2.5. | Carga máxima | 44 |
| 2.5.1. | Factor de potencia..... | 44 |
| 2.5.2. | Tensión..... | 46 |
| 2.5.3. | Estabilidad..... | 46 |
| 2.5.4. | Vibraciones..... | 47 |
| 2.5.5. | Sistema de enfriamiento del generador..... | 47 |
| 2.6. | Descripción de la excitatriz del generador eléctrico Worthington..... | 48 |
| 2.6.1. | Alineación de la excitatriz | 49 |
| 2.7. | Descripción de la turbina Worthington..... | 50 |
| 2.7.1. | Constitución general de la turbina Worthington..... | 50 |
| 2.7.2. | Principio de funcionamiento de turbina Worthington | 51 |
| 2.7.2.1. | Funcionamiento de la turbina Worthington | 51 |
| 2.7.2.2. | Ajustes en las tuberías de vapor de agua | 52 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.8. | Sistema de presión de aceite en la turbina Worthington | 52 |
| 2.8.1. | Sistema de lubricación de cojinetes..... | 54 |
| 2.8.2. | Sistema hidráulico de mando..... | 55 |
| 2.8.3. | Bomba de aceite | 55 |
| 2.8.4. | Bomba auxiliar de aceite | 56 |
| 2.8.5. | Tanque de aceite | 56 |
| 2.8.6. | Válvulas del sistema de aceite..... | 56 |
| 2.9. | Gobernador de velocidad Woodward | 57 |
| 2.9.1. | Esquema..... | 57 |
| 2.9.2. | Sincronización | 60 |
| 2.9.3. | Límite de carga | 60 |
| 2.9.4. | Reducción de carga..... | 60 |
| 2.9.5. | Aumento de carga | 60 |
| 2.10. | Protecciones eléctricas..... | 61 |
| 2.10.1. | Tipos de relé..... | 61 |
| 2.10.2. | Instalación..... | 61 |
| 2.10.3. | Conexiones..... | 62 |
| 2.11. | Análisis de instrumentos de medición en la operación de un turbogenerador de escape Worthington | 63 |
| 2.12. | Análisis de la sincronización de la turbina de vapor Worthington | 64 |
| 2.13. | Análisis de la sincronización del generador eléctrico Worthington | 65 |
| 3. | ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE UN TURBOGENERADOR DE VAPOR DE ESCAPE EN EL PROCESO DE UN INGENIO AZUCARERO..... | 69 |
| 3.1. | Planificación de producción y control | 69 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.2. | El panorama global y la variable cambio tecnológico en el estudio prospectivo | 70 |
| 3.3. | Estrategias a nivel punto | 71 |
| 3.3.1. | Selección de la variable de control..... | 71 |
| 3.3.2. | Selección de las variables de manipulación | 72 |
| 3.3.3. | Selección de los puntos de ajuste (<i>set point</i>) | 72 |
| 3.3.4. | Definición del sistema de control..... | 73 |
| 3.4. | Estrategias a nivel del proceso | 73 |
| 3.4.1. | Control supervisado manual..... | 74 |
| 3.4.2. | Control supervisado automático | 74 |
| 3.4.3. | Modelos de control supervisado automático | 75 |
| 3.4.3.1. | Modelos físicos..... | 75 |
| 3.4.3.2. | Modelos empíricos del procedimiento | 76 |
| 3.4.3.3. | Modelos económicos..... | 76 |
| 3.5. | Estrategias a nivel de planta | 77 |
| 3.5.1. | La automatización como herramienta competitiva .. | 78 |
| 3.5.2. | Entendimiento del proceso | 79 |
| 3.5.3. | Definición del diagrama de información de la planta..... | 79 |
| 3.5.4. | Integración de objetivos..... | 80 |
| 3.5.5. | Rentabilidad de la automatización..... | 80 |
| 4. | IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO EN UN TURBOGENERADOR DE VAPOR DE ESCAPE DE 4 MW, EN EL PROCESO DE UN INGENIO AZUCARERO | 83 |
| 4.1. | Plan de implementación | 83 |
| 4.2. | Estandarización del equipo | 84 |
| 4.3. | Análisis del proceso | 85 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 4.4. | Sistema de control..... | 87 |
| 4.4.1. | Diagrama básico de control | 88 |
| 4.4.2. | Interfaz hombre-máquina..... | 88 |
| 4.4.3. | Informática del proceso | 93 |
| 4.4.3.1. | Estructuración de la red de comunicación para automatización del turbogenerador de escape de 4 MW | 97 |
| 4.4.4. | Selección del equipo de control | 98 |
| 4.4.4.1. | Controlador de la velocidad de la turbina de vapor | 99 |
| 4.4.4.1.1. | SPC (controlador de posición) | 100 |
| 4.4.4.2. | Control de carga | 101 |
| 4.4.4.2.1. | Regulador de voltaje automático (AVR) | 103 |
| 4.4.4.3. | Actuador Woodward UG-40..... | 104 |
| 4.4.4.4. | Protecciones eléctricas | 105 |
| 4.4.4.5. | Protecciones mecánicas..... | 108 |
| 4.4.4.5.1. | Protecciones de vibraciones | 109 |
| 4.4.4.5.2. | Medidor de vibraciones propuesto | 109 |
| 4.4.4.6. | Protecciones de sobre velocidad | 112 |
| 4.4.4.6.1. | Sistema propuesto de protección contra sobrevelocidad- ProTech 203..... | 113 |
| 4.5. | Sistemas de control computarizado..... | 114 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4.5.1. | Redundancia y respaldo..... | 114 |
| 4.5.2. | Respaldo manual | 115 |
| 4.5.3. | Respaldo manual automático | 117 |
| 4.5.4. | Switcheo manual redundante | 117 |
| 4.5.5. | Switcheo automático redundante | 117 |
| 4.5.6. | Partes de repuesto en línea | 118 |
| 4.5.7. | Partes de repuesto fuera de línea | 118 |
| 4.6. | Arquitectura de control | 118 |
| 4.7. | Proceso de sintonización | 119 |
| 4.7.1. | Modelo matemático de la ecuación de estado | 124 |
| 4.7.1.1. | Análisis-solución de la ecuación de estado..... | 125 |
| 4.8. | Software de control del proceso..... | 128 |
| 4.9. | Reestructuración de la organización operativa | 128 |
| 4.10. | Capacitación de recursos humanos | 129 |
| 4.10.1. | Nuevas políticas operativas..... | 130 |
| 5. | ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL TURBOGENERADOR DE ESCAPE DE 4 MW, UTILIZANDO DE REFERENCIA EL BALANCE ENERGÉTICO CALDERA-TURBOGENERADOR EN UN INGENIO AZUCARERO..... | 131 |
| 5.1. | Datos de los diferentes parámetros utilizados para el balance de energía..... | 131 |
| 5.2. | Equipos consumidores de vapor sobrecalentado..... | 131 |
| 5.2.1. | Vapor requerido por la turbina de vapor Worthington | 132 |
| 5.3. | Cálculos realizados al turbogenerador Worthington de escape de 4 MW | 132 |
| 5.3.1. | Consumo teórico de vapor | 132 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 5.3.2. | Consumo real de vapor | 135 |
| 5.3.3. | Eficiencia o rendimiento térmico (e_t) | 136 |
| 5.3.4. | Razón de calor (HEAT-RATE) | 137 |
| 5.4. | Balance térmico y pérdidas de energía en la caldera núm. 1 | 138 |
| 5.4.1. | Datos de la caldera núm. 1 | 139 |
| 5.4.1.1. | Energía disponible | 140 |
| 5.4.1.2. | Energía consumida | 140 |
| 5.4.1.3. | Energía generada | 141 |
| 5.4.1.4. | Pérdidas por condensación | 141 |
| 5.4.1.5. | Pérdidas por convección y radiación . | 142 |
| 5.4.1.6. | Eficiencia de la caldera núm. 1 | 142 |
| 5.5. | Evaluación técnica económica | 143 |
| 5.5.1. | Análisis económico del proyecto..... | 143 |
| 5.5.2. | Costo de producción de vapor a 900 PSI para generar la energía eléctrica | 144 |
| 5.5.2.1. | Mantenimiento de la caldera..... | 146 |
| 5.5.3. | Costos de generación eléctrica..... | 148 |
| 5.5.3.1. | Costo de mantenimiento del turbogenerador | 148 |
| 5.5.3.2. | Costo de mano de obra de operación y reparación del turbogenerador..... | 148 |
| 5.5.3.3. | Costos de generación por kilowatt hora | 148 |
| 5.5.3.4. | Costo anual de generación | 149 |
| 5.5.3.5. | Costo total de generación eléctrica.... | 150 |
| 5.5.4. | Costos de inversión del proyecto | 150 |
| 5.5.5. | Costo de venta de 10 MW | 152 |
| 5.5.6. | Utilidad neta de la venta de los 10 MW | 153 |
| 5.5.7. | Tiempo de recuperación de la inversión | 153 |

| | | |
|-----------------------|---|-----|
| 5.6. | Análisis costo-beneficio del proyecto | 153 |
| 5.6.1. | Valor presente neto | 154 |
| 5.6.2. | La tasa interna de retorno | 155 |
| 5.6.3. | La tasa interna de retorno | 158 |
| CONCLUSIONES..... | | 161 |
| RECOMENDACIONES | | 163 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 165 |
| APÉNDICES..... | | 169 |
| ANEXOS..... | | 173 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Esquema de una caldera acuotubular de dos domos | 5 |
| 2. | Circuito del ciclo de Rankine | 8 |
| 3. | Diagrama T-S para el ciclo de Rankine..... | 20 |
| 4. | Elementos del ciclo de Rankine ideal con recalentamiento..... | 21 |
| 5. | Diagrama en bloques de un control PID..... | 27 |
| 6. | Proceso de la generación de energía en un ingenio azucarero | 36 |
| 7. | Proceso de la generación de vapor y energía eléctrica en un ingenio azucarero..... | 37 |
| 8. | Diagrama del generador sincrónico básico | 39 |
| 9. | Esquema básico de un generador síncrono con 2 polos excitados mediante corriente continua | 40 |
| 10. | Estator del generador eléctrico Worthington | 41 |
| 11. | Rotor del generador | 42 |
| 12. | Diagrama fasorial de un generador síncrono | 45 |
| 13. | Unidades correspondientes de potencia | 45 |
| 14. | Diagrama de capacidad de un generador síncrono | 46 |
| 15. | Porta carbones y carbones en colector de excitatriz del generador eléctrico..... | 49 |
| 16. | Principio de funcionamiento de la turbina de vapor..... | 51 |
| 17. | Esquema de extracción de vapor de sellos de la turbina Worthington..... | 52 |
| 18. | Esquema actual de lubricación de aceite del turbogenerador de escape de 4 MW | 53 |

| | | |
|-----|---|----|
| 19. | Esquema de enfriamiento de la lubricación del turbogenerador de escape Worthington de 4 MW..... | 54 |
| 20. | Gobernador Woodward instalado actualmente..... | 57 |
| 21. | Esquema de funcionamiento del gobernador Woodward..... | 58 |
| 22. | Dimensiones del gobernador Woodward que se encuentra instalado en la turbina Worthington..... | 59 |
| 23. | Panel eléctrico del generador..... | 62 |
| 24. | Diagrama de relé de protección..... | 63 |
| 25. | Diagrama fasorial del generador síncrono con factor de potencia en atraso..... | 67 |
| 26. | Diagrama de estabilidad del generador síncrono..... | 68 |
| 27. | Pirámide de automatización industrial..... | 84 |
| 28. | Interfaz hombre máquina..... | 89 |
| 29. | Esquema propuesto de lecturas del circuito de vapor del turbogenerador de escape de 4 MW..... | 90 |
| 30. | Esquema propuesto de lecturas de vibraciones del turbogenerador de escape de vapor de 4 MW..... | 91 |
| 31. | Esquema propuesto de lecturas de lubricación del turbogenerador de escape de 4 MW..... | 92 |
| 32. | Esquema propuesto de lecturas de temperatura del generador eléctrico..... | 93 |
| 33. | Panel de control de un proceso automatizado..... | 94 |
| 34. | Pantalla propuesta del circuito de vapor..... | 95 |
| 35. | Pantalla propuesta del circuito de lubricación..... | 95 |
| 36. | Pantalla propuesta de medición de vibraciones, desplazamientos y velocidad..... | 96 |
| 37. | Pantalla propuesta de medición de temperatura del generador Worthington..... | 96 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 38. | Estructura de comunicación propuesta para automatizar el turbogenerador Worthington de 4 MW en un ingenio azucarero..... | 98 |
| 39. | Microprocesador 505 para el control digital de la turbina Worthington..... | 99 |
| 40. | Control de la válvula de vapor de la turbina | 100 |
| 41. | SPC (control de posición)..... | 101 |
| 42. | Controlador de carga EGCP-3 LS..... | 102 |
| 43. | Regulador de voltaje automático DECS-200..... | 103 |
| 44. | Actuador Woodward UG40 | 105 |
| 45. | Descripción el relevador multilin SR489..... | 106 |
| 46. | Bently Nevada 3500..... | 110 |
| 47. | Esquema de un sensor de proximidad..... | 111 |
| 48. | Sensor de proximidad PROXPAC..... | 112 |
| 49. | Sistema de protección contra sobrevelocidad-ProTech 203 | 114 |
| 50. | Arquitectura de control para la automatización del turbogenerador de escape de 4 MW | 119 |
| 51. | Efectos de ganancia, configuración proporcional..... | 120 |
| 52. | Respuesta proporcional e integral en un circuito abierto..... | 121 |
| 53. | Acción proporcional y derivativo en un lazo cerrado | 123 |
| 54. | Acción proporcional, integral y derivativo en un lazo cerrado | 124 |
| 55. | Modelo matemático del sistema de control para la turbina de vapor Worthington..... | 125 |
| 56. | Sistema de control con variables asignadas | 125 |
| 57. | Modelo simplificado del sistema de control con variables asignadas. | 126 |
| 58. | Sala de control para operación del turbogenerador Worthington de 4 MW..... | 129 |
| 59. | Diagrama esquemático de la transformación de las energías: (calorífica a mecánica y de mecánica a eléctrica)..... | 143 |
| 60. | Diagrama de flujo de efectivo..... | 156 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 61. | Diagrama de flujo de efectivo del proyecto | 157 |
|-----|--|-----|

TABLAS

| | | |
|--------|---|-----|
| I. | Tipos básicos de turbogeneradores en los ingenios azucareros | 12 |
| II. | Tipos de excitación de generadores síncronos..... | 13 |
| III. | Características del generador eléctrico..... | 42 |
| IV. | Datos de la excitatriz..... | 48 |
| V. | Datos de la turbina de vapor | 50 |
| VI. | Pasos para la sincronización de la turbina de vapor Worthington | 65 |
| VII. | Estándares de comunicación en serie | 84 |
| VIII. | Mediciones actuales en el turbogenerador de escape de 4 MW | 86 |
| IX. | Listado de temperaturas y parámetros de operación del relevador que pueden programarse en el relevador SR489 | 107 |
| X. | Tipos de transductores | 110 |
| XI. | Valores promedio de presión y temperatura de la caldera núm. 1..... | 131 |
| XII. | Interpolación de presión y temperatura de la caldera núm. 1 | 133 |
| XIII. | Interpolación de presión y temperatura para la energía generada de la caldera núm. 1 | 141 |
| XIV. | Costo de tratamiento de agua por día de la caldera | 145 |
| XV. | Costos de mano de obra por día de operación de la caldera | 146 |
| XVI. | Costos de inversión del proyecto | 150 |
| XVII. | Flujo de efectivo del proyecto | 156 |
| XVIII. | Tasa de interés para el retorno del proyecto | 160 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------------------|---|
| A | Amperio |
| HP | Caballos de fuerza |
| & | Coefficiente de pérdidas de combustión incompleta |
| β | Coefficiente de pérdidas debidas a la radiación |
| μ | Coefficiente de pérdidas en sólidos no quemados |
| m_T | Consumo real del vapor |
| m_t | Consumo teórico |
| R | Constante universal de los gases ideales |
| CE | Costo de energía |
| CM | Costo de mantenimiento |
| CO | Costo de operación |
| η | Eficiencia |
| h | Entalpía |
| s | Entropía |
| s_f | Entropía del líquido |
| s_{fg} | Entropía de vaporización |
| FP | Factor de potencia |
| f | Frecuencia de la señal eléctrica |
| w | Humedad del bagazo |
| i | Interés |
| KV | Kilovatio |
| Kwh | Kilowatt hora |
| KW | Kilowatts |

| | |
|----------------------|---|
| PSI | Libra- fuerza por pulgada cuadrada |
| n | Moles de gas |
| PC | Pérdidas por condensación |
| P | Presión |
| Q | Quetzal |
| e_t | Rendimiento en porcentaje |
| ξ_g | Rendimiento termodinámico de la turbina |
| RPM | Revoluciones por minuto |
| T | Temperatura |
| x | Título del vapor en la descarga de la turbina |
| w | Trabajo |
| V | Voltio |
| v | Volumen |

GLOSARIO

| | |
|-------------------------|--|
| Actuador | Dispositivo mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o “actuar” otro dispositivo mecánico. |
| ANSI | American National Standards Institute. |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers. |
| ASTM | American Society for Testing and Materials. |
| Automatización | Uso de sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para controlar maquinarias y/o procesos industriales. |
| Bagazo | Desecho fibroso de la caña de azúcar. |
| Bomba centrífuga | Dispositivo constituido por un conjunto de paletas rotatorias dentro de una cubierta metálica, de manera que son capaces de impulsar al líquido que esté contenido dentro de la cubierta, gracias a la fuerza centrífuga que se genera cuando giran las paletas. |
| BTU | Unidad térmica inglesa. |

| | |
|-----------------------------|--|
| Caldera | Artefactos utilizados para la producción de vapor de agua a presión constante a través de una transferencia de calor en el fluido. |
| CGE | Costo de generación eléctrica. |
| Ciclo <i>ranking</i> | Ciclo termodinámico cerrado que consta de una caldera, una turbina, un condensador y una bomba. |
| CMO | Costo de mano de obra. |
| Cogeneración | Procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil. |
| Combustión | Reacción química de oxidación, en la cual, generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor y luz. |
| Condensador | Intercambiador de calor entre fluidos, mientras uno se enfría, pasa de estado gaseoso a estado líquido, el otro se calienta. |
| CTGE | Costo total de generación eléctrica. |
| EEGSA | Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A. |

| | |
|----------------------------|--|
| EGCP3 | Controlador de carga eléctrica, con el cual se puede aumentar o disminuir la carga eléctrica producida por el generador. |
| Estator | Parte fija de una máquina eléctrica, en la cual gira un rotor. |
| FEM | Fuerza electromotriz. |
| Frame | Medidas para el montaje respectivo en cualquier máquina eléctrica o mecánica. |
| Generador eléctrico | Máquina eléctrica capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica. |
| HMI | Human Machine Interface. |
| IEEE | Institute Electrical and Electronics Engineers. |
| Ingenio | Planta agroindustrial donde se procesa la caña para producir azúcar y sus derivados. |
| NEMA | National Electrical Manufacturers Association. |
| PID | Proporcional integral derivativo. |
| PLC | Controlador lógico programable. |
| PRC | Pérdida por radiación y convección. |

| | |
|--------------------------------|---|
| Rotor | Parte giratoria de una máquina eléctrica. |
| Relevador de protección | Dispositivo que se utiliza para detectar y aislar fallas en el menor tiempo posible, estos pueden funcionar con principio electromecánico o de estado sólido. |
| Relé multifunción | Dispositivo electrónico para protección eléctrica de un equipo. Se llama multifunción, ya que un solo aparato puede tener varias protecciones para un mismo circuito. |
| SCADA | Supervisory Control And Data Acquisition. |
| Sistema de control | Conjunto de dispositivos que actúan juntos para lograr un objetivo de control. |
| Tasa interna de retorno | Tasa máxima de utilidad que puede pagarse u obtenerse en la evaluación de una alternativa. |
| Termodinámica | Rama de la física que estudia los efectos de los cambios de magnitudes de los sistemas a un nivel macroscópico. |
| TIR | Tasa interna de retorno. |
| Transferencia de calor | El calor puede transferirse de tres formas distintas: conducción, convección y radiación. |

Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos pasan del ámbito de alta temperatura a uno de menor temperatura.

| | |
|----------------------------|---|
| Turbina de vapor | Máquina que convierte la energía cinética en trabajo útil mecánico. |
| Turbogenerador | Conjunto compuesto por una turbina de vapor y con generador eléctrico. |
| Presión manométrica | Diferencia entre presión absoluta y presión atmosférica. |
| Vapor de escape | Vapor que fue utilizado por una turbina y que ya no cuenta con la presión original, por haber cedido parte de su energía. |
| VCN | Valor calorífico neto del bagazo húmedo. |
| VPN | Valor presente neto. |
| Woodward 505 | Microprocesador para controlar la velocidad de la turbina de vapor. |
| Zafra | Período de duración de la producción de azúcar y sus derivados. |

RESUMEN

El presente trabajo de graduación consiste en un estudio tecnoeconómico para la automatización de un turbogenerador de escape de 4 MW en un ingenio azucarero, el cual es utilizado como fuente de energía para la evaporación de jugo de caña en uno de los procesos de la fabricación de azúcar.

En el capítulo uno se presenta el funcionamiento general de las calderas, turbinas de vapor, turbogeneradores y elementos de la automatización.

El capítulo dos trata sobre los elementos que influyen en la operación manual de un turbogenerador de vapor de escape.

En el capítulo tres se describe la estructura para un sistema de automatización.

En el capítulo cuatro se presenta la implementación de sistemas de control automático en un turbogenerador de vapor de escape.

En el capítulo cinco se muestra el estudio tecnoeconómico de la propuesta de automatización del turbogenerador de escape.

OBJETIVOS

General

Elaborar un estudio tecnoeconómico de la propuesta de automatización de un turbogenerador de escape de 4 MW, en un ingenio azucarero.

Específicos

1. Describir el funcionamiento de las calderas, turbinas, turbogeneradores y los elementos de automatización.
2. Analizar los elementos que influyen en la sincronización manual de un turbogenerador.
3. Estructurar el sistema de automatización para un turbogenerador de vapor de escape.
4. Implementar el sistema de control automático para el turbogenerador de vapor.
5. Determinar a través del estudio tecnoeconómico, el monto y el tiempo de recuperación de la inversión para la automatización del turbogenerador de vapor de escape.

INTRODUCCIÓN

Es importante conocer que, dentro de la economía del país se cuenta con varios ingenios azucareros, los cuales, además de producir azúcar, también se dedican a la producción de la energía eléctrica, de la cual una parte utilizan para movilizar sus equipos y la otra parte se vende a la red nacional, utilizando como combustible para las calderas, en el tiempo de zafra, el bagazo residuo de la caña y, para el tiempo de no zafra, el bunker.

Dentro de la fabricación de azúcar se tiene el proceso de tratamiento de jugo, el cual se dedica a preparar las condiciones del jugo claro para poder trasladarlo a los demás procesos, es aquí donde se necesita que el turbogenerador de vapor de escape transfiera su calor, por medio del vapor, en las calandrias de los evaporadores, y de esta manera extraer el agua que lleva el jugo claro y enviar al siguiente proceso la mejor concentración de meladura evaporada.

En la situación actual, la operación de este turbogenerador se realiza de forma manual, lo que obliga a que una persona esté siempre pendiente del gobernador manual para la regulación del vapor de escape a la salida de la turbina y esto provoca que se tengan variaciones en la presión y temperatura del vapor en los evaporadores y, al tener estas variaciones, se provocan atrasos en los demás procesos, porque no lleva las condiciones adecuadas para la continuidad de la producción.

Considerando que estas variaciones provocan pérdidas en la fabricación de azúcar se procedió a buscar la manera que la salida del vapor se pudiera regular automáticamente, situación que permitió buscar opciones de actuadores automáticos que tuvieran la misma base, para poderlo acoplar, sin ninguna modificación, a la estructura existente.

Para justificar la inversión, es necesario presentar un análisis technicoeconómico del proyecto de automatizar el turbogenerador, establecer el monto total de la instalación de todos los equipos y también el tiempo de recuperación de la inversión, (para garantizar que se va a tener la presión y temperatura del vapor de escape constante, a través de un lazo de control para la operación de la turbina de vapor y de una computadora para la operación del turbogenerador, donde se tengan todas las señales de operación, para mejorar la estabilidad del proceso).

1. MARCO DE REFERENCIA

1.1. Cogeneración

Es la producción simultánea de electricidad (o energía mecánica) y energía calórica útil, a partir de una fuente de energía primaria.

El término cogeneración se utiliza para definir aquellos procesos en los que se produce simultáneamente energía eléctrica y energía calorífica o frigorífica a partir de un combustible diésel o gas.

La generación simultánea de electricidad y calor en las plantas de cogeneración permite un incomparable grado de aprovechamiento de la energía del combustible; los que normalmente se usan son menos contaminantes que los utilizados en sistemas convencionales. Las ventajas de la cogeneración son las siguientes:

- Reducción de costos energéticos para el usuario.
- Independencia de la red eléctrica y seguridad en el suministro.
- Mayor protección del medio ambiente. Las plantas de cogeneración cumplen con las normas ambientales más estrictas.
- Mayor eficiencia en la generación de energía.
- Mejor adecuación entre oferta y demanda energética.

Los ingenios azucareros producen su propia energía eléctrica desde el comienzo de sus operaciones. A través del tiempo iniciaron realmente la cogeneración de energía eléctrica, ya que con los años se realizó el convenio de venta del excedente de energía a la Empresa Eléctrica de Guatemala.

Para el proceso de cogeneración, los ingenios agroindustriales cuentan con generadores de vapor (calderas), en las cuales se utiliza el bagazo de caña, principalmente como combustible para la producción de vapor.

1.2. Operación de calderas en un ingenio azucarero

Las calderas son monitoreadas para generar vapor de agua a presión constante a través de una transferencia de calor en el fluido (agua), por medio de la combustión del bagazo de caña.

1.2.1. Funcionamiento de una caldera en un ingenio azucarero

En las calderas se genera todo el vapor necesario para el funcionamiento de las turbinas, turbogeneradores y cocimientos en el proceso de fabricación de azúcar de caña.

Los hornos de las calderas son alimentados con bagazo de caña, que es transportado por conductores de tablillas o bandas transportadoras. Existe un sistema de conservación del bagazo sobrante durante el proceso normal; este es almacenado para ser utilizado durante paradas de molienda, en pacas o en la bodega bagacera.

Los ingenios azucareros cuentan con calderas de alta y baja presión de vapor de agua, turbogeneradores de condensación y de escape de vapor.

1.3. Partes de una caldera de vapor de agua

Las calderas de vapor, básicamente constan de 2 partes principales:

- Cámara de agua
- Cámara de vapor

1.3.1. Cámara de agua

Recibe este nombre el espacio que ocupa el agua en el interior de la caldera. El nivel de su operación se fija en su fabricación, de tal manera que sobrepase en unos 15 cm. Con esto, a toda caldera le corresponde una cierta capacidad de agua, lo cual forma la cámara de agua. Según la razón que existe entre la capacidad de la cámara de agua y la superficie de calefacción, se distinguen calderas de mediano y pequeño volumen de agua.

1.3.2. Cámara de vapor

Es el espacio ocupado por el vapor en el interior de la caldera, en ella debe separarse el vapor del agua que lleve una suspensión. Cuanto más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara, de manera que aumente también la distancia entre el nivel del agua y la toma de vapor.

1.4. Tipos de calderas de vapor de agua

El término caldera se aplica a un dispositivo para generar vapor para procesos industriales, calefacción, para uso general o para generación de energía eléctrica. Para facilitar la comprensión a la caldera se le considera un generador de vapor en términos generales.

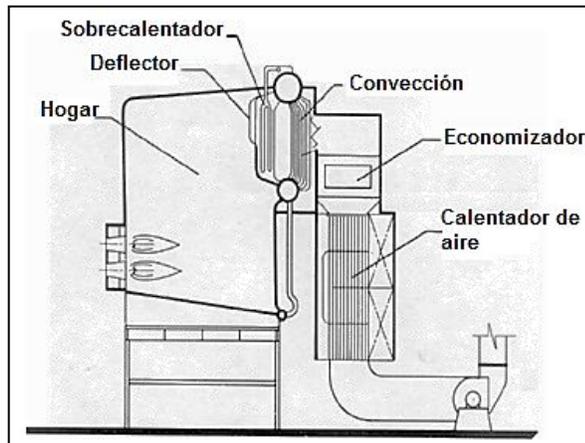
1.4.1. Calderas acuotubulares

Son utilizadas en centrales eléctricas y otras instalaciones industriales, logrando con un menor diámetro y dimensiones totales una presión de trabajo mayor, para accionar las máquinas a vapor.

En estas calderas, los tubos longitudinales interiores se emplean para aumentar la superficie de calefacción, y están inclinados para que el vapor a mayor temperatura al salir por la parte más alta, provoque un ingreso natural del agua más fría por la parte más baja.

La producción del vapor de agua depende de la correspondencia que exista entre dos de las características fundamentales del estado gaseoso, las cuales son: la presión y la temperatura.

Figura 1. **Esquema de una caldera acuotubular de dos domos**



Fuente: Manual de eficiencia de calderas. p. 3.

1.4.2. Calderas pirotubulares

En estas calderas los gases calientes pasan por el interior de los tubos, los cuales están rodeados de agua. Las superficies interiores de las paredes del hogar están revestidas de refractario. El cuerpo de caldera está formado por un cuerpo cilíndrico de disposición horizontal, incorpora interiormente un paquete multitubular de transmisión de calor y una cámara superior de formación y acumulación de vapor.

1.5. Turbinas de vapor de agua

Es una máquina que convierte la energía cinética lineal de un flujo de vapor a alta presión en movimiento rotacional transformándolo en trabajo útil mecánico. Entre las ventajas que tiene una turbina de vapor sobre una máquina recíproca podemos mencionar:

Una turbina proporciona un flujo suave e ininterrumpido de potencia a altas velocidades de rotación en lugar de una serie de impulsos de potencia a bajas velocidades.

- Funcionamiento de la turbina de vapor: el funcionamiento de la turbina de vapor se basa en el principio termodinámico que expresa que, cuando el vapor se expande disminuye su temperatura y se reduce su energía interna. Esta reducción de la energía interna se transforma en energía mecánica por la aceleración de las partículas de vapor, lo que permite disponer directamente de una gran cantidad de energía.

1.5.1. Turbina de tipo 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 álabes, unos móviles y los otros fijos (diafragma). Los álabes están colocados de forma que cada par actúa como una boquilla a través de la cual pasa el vapor mientras se expande. Los álabes de las turbinas de reacción suelen montarse en un tambor en lugar de una rueda. El tambor actúa como eje de la turbina.

1.5.2. Turbina de tipo de impulso o acción

Son las más grandes que normalmente existen, estas turbinas emplean hasta cierto grado la reacción al principio del recorrido del vapor, para que el flujo de vapor sea eficaz. Muchas de las turbinas de reacción utilizan primero un escalón de control de acción, lo que reduce el número de escalones necesarios.

Para que la energía del vapor se utilice eficientemente en ambos tipos de turbina, es necesario utilizar varios escalones en cada uno de los cuales se convierte en energía cinética una parte de la energía térmica del vapor de agua. Si se hiciera toda la conversión de los dos tipos de energía en una sola etapa, la velocidad rotatoria de la rueda sería excesiva. Por lo general, se utilizan más escalones en las turbinas de reacción que en las turbinas de acción.

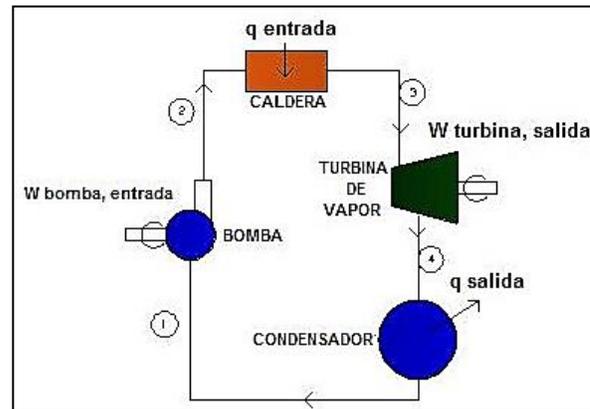
1.5.3. Otros tipos de turbina

En las plantas industriales se utilizan las turbinas de condensación o sin condensación. Las turbinas de vapor con condensación tienen una presión de salida inferior a la del vacío, mientras que las unidades sin condensación escapan a una presión igual o superior a la del vacío. Cuando el vapor se expande a una presión menor que la del vacío en una turbina de vapor con condensación, su temperatura suele reducirse a menos de 54 °C. En general, esa energía de baja temperatura no es útil y se clasifica normalmente como calor perdido. Por otro lado, el vapor de agua de las turbinas sin condensación tiene mayor temperatura y presión y puede resultar útil en muchos procesos industriales o usarse para calefacción.

1.5.4. Eficiencia de las turbinas de vapor

La turbina de vapor constituye la porción de expansión de un ciclo de vapor, el cual requiere de dispositivos separados, incluye una caldera, la turbina, un condensador y una bomba para alimentación de agua para completar el ciclo.

Figura 2. Circuito del ciclo de Rankine



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Los cuatro componentes asociados al ciclo de Rankine son dispositivos de flujo estable, por lo cual este ciclo se puede analizar como procesos de flujo estable.

La eficiencia térmica del ciclo de Rankine se puede determinar por medio de la ecuación:

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{W_{\text{neto}}}{q_{\text{entrada}}} = \frac{(h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

Donde:

η_{ter} = eficiencia térmica del ciclo de Rankine

W_{neto} = calor que entra a la caldera – calor que sale en el condensador

$W_{\text{neto}} = q_{\text{entrada}} - q_{\text{salida}} = (h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)$

h = entalpia (kJ/kg)

- La eficiencia de los dispositivos mecánicos y eléctricos

La transferencia de energía mecánica es, generalmente realizada por un sistema de rotación eje y, por tanto, el trabajo mecánico se refiere a menudo como eje de trabajo. Una bomba o un ventilador de eje reciben el trabajo, por lo general de un motor eléctrico, y las transferencias normalmente se llevan a cabo mediante una flecha rotatoria (menos pérdidas por fricción). Una turbina, en la otra parte, convierte la energía mecánica de un fluido de trabajo del eje.

$$N_{mecanica} = \frac{\textit{Salida de energía mecánica}}{\textit{Entrada de energía mecánica}} = \frac{E_{mec, sal}}{E_{mec, ent}}$$

El grado de perfección del proceso de conversión entre la mecánica de trabajo ofrecidos o extraídos y la energía mecánica de la bomba de turbina la eficiencia y la eficacia, definida como:

$$n_{bomba} = \frac{\textit{Incremento de energía mecánica del fluido}}{\textit{Entrada de energía mecánica}} = \frac{\Delta E_{mec, fluido}}{W_{flecha, entrada}} = \frac{W_{bomba, u}}{W_{bomba}}$$

Donde:

$\Delta E_{mec, fluido} = \Delta E_{mec, salida} - \Delta E_{mec, entrada}$. Es la tasa de incremento en la energía mecánica del fluido, el cual equivale a la potencia de bomba útil $W_{bomba, u}$ suministrada al fluido, y

$$n_{turbina} = \frac{\textit{Salida de energía mecánica}}{\textit{Disminución de energía mecánica del fluido}} = \frac{W_{flecha, salida}}{|\Delta E_{mecánica, fluido}|} = \frac{W_{turbina}}{W_{turbina, e}}$$

Donde:

$|\Delta E_{mecánica, fluido}| = E_{mecánica, entrada} - E_{mecánica, salida}$. Es la tasa de disminución de la energía mecánica del fluido, lo que equivale a la energía mecánica el líquido extraído de la turbina, y usamos la absoluta signo de valor para evitar los valores negativos para la eficiencia.

La eficiencia mecánica no debe confundirse con la eficiencia del motor y la eficiencia, del generador se definen como:

Motor:

$$n_{motor} = \frac{\textit{Salida de potencia mecánica}}{\textit{Entrada de potencia eléctrica}} = \frac{W_{flecha, salida}}{W_{eléctrica, entrada}}$$

Y generador:

$$n_{generador} = \frac{\textit{Salida de potencia eléctrica}}{\textit{Entrada de potencia mecánica}} = \frac{W_{eléctrica, salida}}{W_{flecha, entrada}}$$

Una bomba es normalmente combinada con un motor y una turbina con un generador. Por lo tanto, es considerable, por lo general, la eficiencia de la bomba-motor y la turbina-generador. En combinaciones que se definen como:

$$n_{bomba-motor} = n_{bomba} n_{motor} = \frac{W_{bomba, u}}{W_{eléctrica, entrada}} = \frac{\Delta E_{mecánica, fluido}}{W_{eléctrica, entrada}}$$

Y:

$$n_{turbina-generador} = n_{turbina}n_{generador} = \frac{W_{el\u00e9ctrica,salida}}{W_{turbina,e}} = \frac{W_{el\u00e9ctrica,salida}}{|\Delta E_{mec\u00e1nica,fluido}|}$$

1.6. Turbogeneradores

Conjunto compuesto por un generador el\u00e9ctrico movido por una turbina de vapor; con el fin de transformar la energ\u00eda t\u00e9rmica del vapor en energ\u00eda el\u00e9ctrica. En la turbina se realiza la expansi\u00f3n del vapor, transformando la energ\u00eda t\u00e9rmica en energ\u00eda cin\u00e9tica y simult\u00e1neamente en energ\u00eda mec\u00e1nica aplicada en el eje. Finalmente, en el generador se transforma la energ\u00eda mec\u00e1nica del rotor en energ\u00eda el\u00e9ctrica.

1.6.1. Funcionamiento de un turbogenerador con condensador

El funcionamiento del turbogenerador con condensador es producir energ\u00eda el\u00e9ctrica a la salida del generador, pero este tiene la caracter\u00edstica importante, que el vapor que entra a la turbina despu\u00e9s de realizar su trabajo mec\u00e1nico, se condensa y a la vez es retornado, en un circuito cerrado, a la caldera de vapor de agua, la cual da la alimentaci\u00f3n de vapor a dicha turbina.

1.6.2. Funcionamiento de un turbogenerador de escape

El funcionamiento del turbogenerador de escape es muy importante para un ingenio azucarero. Cuenta con dos funciones principales las cuales son: recirculaci\u00f3n de vapor de escape a baja presi\u00f3n, la cual se conduce hacia el \u00e1rea de f\u00e1brica y, tambi\u00e9n, generar energ\u00eda el\u00e9ctrica para el consumo interno del ingenio.

Tabla I. **Tipos básicos de turbogeneradores en los ingenios azucareros**

| Tipo de turbogenerador | Características |
|-------------------------------|---|
| Escape | Se alimentan de vapor y devuelven vapor al proceso. |
| Condensación | Se alimentan de vapor y devuelven agua condensada al ciclo. |

Fuente: elaboración propia.

1.6.3. Generador síncrono

Es aquella máquina que tiene ubicado sobre su rotor una fuente de líneas de fuerza magnéticas, las cuales crean en el generador el campo magnético, con la ayuda de un primotor (excitador), el rotor del generador gira con una velocidad sincrónica. El campo magnético del rotor también gira, en unión con las bobinas del estator, el cual induce en ellas una fem (fuerza electromotriz).

1.6.3.1. Características de los generadores síncronos

Un generador síncrono está compuesto por una parte fija llamada estator y un parte móvil llamada rotor. El estator del generador síncrono se puede diferenciar dependiendo de la utilización y de las medidas de la máquina. Los rotores de estas máquinas pueden ser de dos tipos: de polo saliente o de polo liso, estos son de un reducido número de polos, y se puede tener elevadas velocidades (1,800, 3,600 rpm). El rotor de polos salientes se caracteriza por un elevado número de polos y bajas velocidades (60 a 500 rpm).

1.6.3.2. Tipos constructivos de generadores síncronos

La principal diferencia entre los tipos de generadores síncronos se encuentra en su sistema de alimentación, según sea la fuente de excitación situada en el rotor.

Tabla II. Tipos de excitación de generadores síncronos

| Sistema de excitación | Descripción y función |
|--|--|
| Excitación independiente | Excitatriz independiente de corriente continua que alimenta el rotor a través de un juego de anillos rozantes y escobillas. |
| Excitatriz principal y excitatriz piloto | La máquina principal de corriente continua tiene como bobinado de campo otra máquina de excitación independiente, accionada por el mismo eje. |
| Electrónica de potencia | Directamente, desde la salida trifásica del generador, se rectifica la señal mediante un rectificador controlado, y desde el mismo se alimenta directamente con corriente continua el rotor mediante un juego de contactos (anillos y escobillas). El arranque se efectúa utilizando una fuente auxiliar (batería) hasta conseguir arrancar. |
| Sin escobillas o diodos giratorios | La fuente de corriente continua es un rectificador no controlado, situado en el mismo rotor, (dentro del mismo) alimentado en corriente alterna por un generador situado también en el mismo eje y cuyo bobinado de campo es excitado desde un rectificador controlado que rectifica la señal generada por el giro de unos imanes permanentes situados en el mismo rotor (que constituyen la excitatriz piloto de corriente alterna). |

Fuente: elaboración propia.

1.6.4. Protecciones de un turbogenerador en un ingenio azucarero

Como toda protección, la de los generadores se escoge para que detecte situaciones anormales en el equipo que protege, y cuando esta situación anormal exista, lo desconecte del sistema o alerte al operador del equipo, dependiendo del tipo de anomalía que detecte. Algunas fallas pueden ocurrir en la propia zona del generador, mientras otras ocurren en el sistema y ocasionan que el generador opere en condiciones anormales.

1.7. Principios de termodinámica

La termodinámica es una consecuencia lógica de dos axiomas físicos elementales: la ley de la conservación y la ley de la degradación de la energía. En su primer principio aporta a la ley de la conservación dos nuevas formas de energía: el calor y la energía interna; y en su segundo principio aporta a la ley de la degradación la herramienta (entropía) mediante la cual puede calcularse la energía que se degrada en cualquier proceso.

1.7.1. Conceptos fundamentales

La termodinámica se originó en consideraciones acerca de calor y temperatura, y emplea términos y conceptos del lenguaje corriente. Es una teoría de una gran generalidad, aplicable a sistemas de estructura muy elaborada con todas las formas de propiedades mecánicas y eléctricas.

1.7.2. Leyes que gobiernan la termodinámica

La termodinámica se ocupa de la energía y sus transformaciones. Sus leyes son restricciones generales que la naturaleza impone en todas esas transformaciones.

1.7.2.1. Ley cero de la termodinámica

La ley cero de la termodinámica establece que si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí.

1.7.2.2. Primera ley de la termodinámica: energía total que entra al sistema

La primera ley de la termodinámica es una expresión del principio de conservación de la energía, y sostiene que la energía es una propiedad termodinámica. Esto significa que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; solo puede cambiar de forma. Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso.

- Balance de energía: el principio de la conservación de la energía se expresa como: el cambio neto (incremento o disminución) en la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso. Es decir,

$$\left(\begin{array}{l} \text{energía total que} \\ \text{entra al sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{energía total que} \\ \text{sale del sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{cambio en la energía} \\ \text{total del sistema} \end{array} \right)$$

Esta relación es más conocida como balance de energía y es aplicable a cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso.

1.7.2.3. Segunda ley de la termodinámica: energía total que sale del sistema

La segunda ley de la termodinámica no se limita a identificar la dirección de los procesos, pero afirma que la energía tiene calidad, así como cantidad. La primera ley se relaciona con la cantidad de energía y las transformaciones de energía de una forma a otra sin considerar su calidad. Conservar la calidad de la energía es una cuestión importante, y la segunda ley provee los medios necesarios para determinarla, así como el grado de degradación que sufre la energía durante un proceso.

1.7.2.4. Tercera ley de la termodinámica: cambio en la energía total del sistema

Esta afirma que es imposible alcanzar una temperatura igual al cero absoluto mediante un número finito de procesos físicos. Puede formularse también como que a medida que un sistema dado se aproxima al cero absoluto, su entropía tiende a un valor constante específico.

Asimismo, cabe destacar que la primera ley la de conservación de la energía, es la más sólida y universal de las leyes de la naturaleza descubiertas hasta ahora por la ciencia.

1.7.3. Propiedades de los líquidos y de los gases

En la naturaleza, la materia se presenta en tres estados físicos diferentes: sólido, líquido y gaseoso. Aunque algunas sustancias, como el agua, pueden existir en los tres estados, lo normal es que, en su estado natural, cada sustancia aparezca en uno solo de ellos.

1.7.3.1. Propiedades termodinámicas del vapor

El conocimiento y evaluación de las propiedades termodinámicas del agua y del vapor de agua en sus distintos estados es fundamental para la resolución de los problemas en los que esta sustancia se encuentra implicada. Para evaluarla es preciso tomar un nivel de referencia, asignándose un valor de entalpía igual a cero al agua líquida en las condiciones del punto triple, es decir, a 0,01 °C. A efectos prácticos, puede tomarse también el nivel de referencia en °C.

1.7.3.2. Diagramas termodinámicos

Hasta el momento solo se ha trabajado con las ecuaciones de estado de los gases perfectos. Si bien esto es adecuado para estudiar sistemas simples, el tratar de aplicar estas ecuaciones a sistemas de mayor complejidad conduce a errores. Lo usual es, entonces, trabajar con diagramas termodinámicos. Estos representan en forma gráfica las propiedades termodinámicas de sustancias reales.

1.7.3.3. Procesos termodinámicos

Cualquier cambio de un estado de equilibrio a otro experimentado por un sistema es un proceso. Para describir completamente un proceso se deben

especificar sus estados inicial y final, así como la trayectoria que sigue y las interacciones con los alrededores. Los procesos termodinámicos más importantes pueden ser:

- Isotérmicos: en los que la temperatura no cambia
- Isobáricos: en los cuales la presión no varía
- Isócoros: en los que el volumen permanece constante
- Adiabáticos: en los que no hay transferencia de calor alguna

1.7.4. Los gases ideales

La ley de los gases ideales es la ecuación de estado del gas ideal, un gas hipotético formado por partículas puntuales, sin atracción ni repulsión entre ellas y cuyos choques son perfectamente elásticos (conservación de momento y energía cinética).

La ecuación que describe normalmente la relación entre la presión, el volumen, la temperatura y la cantidad (en moles) de un gas ideal es:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Donde:

P = presión

V = volumen

n = moles de gas

R = constante universal de los gases ideales

T = temperatura en grados Kelvin

1.7.5. Ciclos de potencia del vapor

El ciclo de vapor de agua se diferencia de los ciclos de potencia de gas debido que en algunas partes de los procesos en el ciclo, se halla presente tanto la fase líquida como la fase de vapor.

1.7.5.1. Ciclo Carnot

Existen diversos ciclos teóricos, compuesto por procesos internamente reversibles. Uno de ellos es el denominado ciclo de Carnot, que puede funcionar como sistema cerrado o como sistema de flujo en régimen estacionario, el mismo está compuesto por dos procesos isotérmicos e internamente reversibles y dos procesos adiabáticos e internamente reversibles. Es el más eficiente de los ciclos que operan entre dos límites especificados de temperatura. Así, es natural considerar primero a este ciclo como un prospecto de ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor.

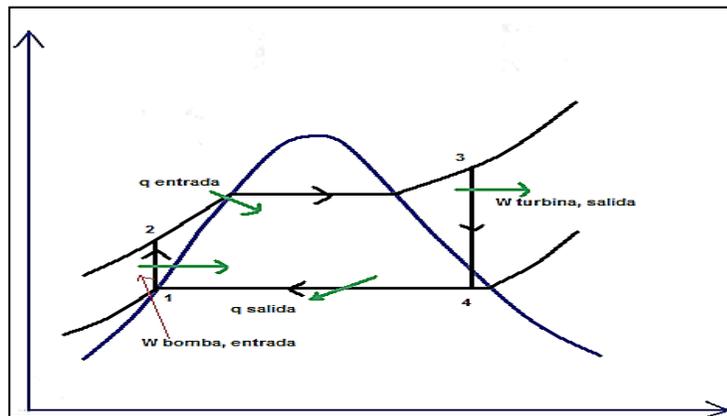
1.7.5.2. Ciclo Rankine

Es una modificación del ciclo Carnot, esto con el fin de mejorar el sistema térmico corrigiendo los problemas que este produce. Es posible eliminar muchos de los aspectos imprácticos asociados con el ciclo de Carnot si el vapor es sobrecalentado en la caldera y condensado por completo en el condensador, este es el ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor, no incluye alguna irreversibilidad interna y está compuesto de los siguientes cuatro procesos:

- 1-2 Compresión isentrópica en una bomba
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera

- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador

Figura 3. **Diagrama T-S para el ciclo de Rankine**



Fuente: elaboración propia.

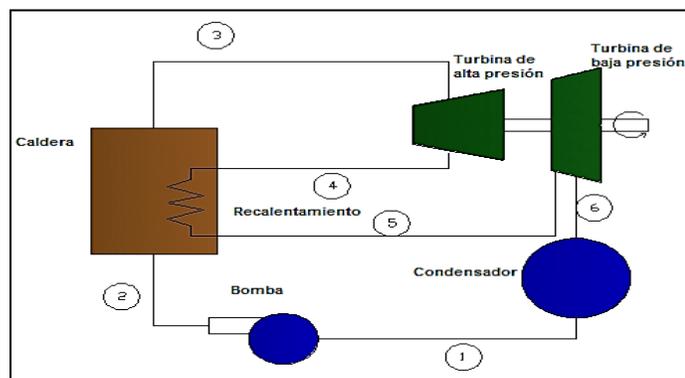
1.7.5.3. El ciclo de recalentamiento

En el ciclo con recalentamiento, el vapor no se expande por completo en una sola etapa hasta la presión del condensador. Luego de expandirse parcialmente, el vapor se extrae de la turbina y se recalienta a presión constante. Se debe saber que el aumento en la presión de la caldera incrementa la eficiencia térmica del ciclo Rankine, pero que también aumenta el contenido de humedad del vapor a niveles inaceptables.

Se puede pensar en dos posibilidades para aprovechar la eficiencia de la turbina a presiones muy altas sin que afecte la humedad del vapor, estas son:

- Sobrecalentar el vapor a temperaturas muy altas antes de que entre a la turbina. Esta sería la solución deseable porque la temperatura promedio a la que se añade calor, también se incrementaría, lo cual aumentaría la eficiencia del ciclo. Sin embargo, no es una solución viable, ya que requiere elevar la temperatura del vapor hasta niveles metalúrgicamente inseguros.
- Expandir el vapor en la turbina en dos etapas y recalentarlo entre ellas. En otras palabras, modificar el ciclo Rankine ideal simple con un proceso de recalentamiento. El recalentamiento es una solución práctica al problema de humedad excesiva en turbinas y es comúnmente utilizada en modernas centrales eléctricas de vapor.

Figura 4. **Elementos del ciclo de Rankine ideal con recalentamiento**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

1.7.6. Transferencia de calor

Es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. Cuando un cuerpo, por ejemplo, un objeto sólido o un fluido, está a una temperatura diferente de la de su entorno u otro cuerpo, la

transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor o intercambio de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico. La transferencia de calor siempre ocurre desde un cuerpo más caliente a uno más frío, como resultado del segundo principio de la termodinámica. Cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos en proximidad uno del otro, la transferencia de calor no puede ser detenida; solo puede hacerse más lenta. El calor puede transferirse de tres formas distintas: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos pasan del ámbito de alta temperatura a uno de menor temperatura.

1.7.6.1. Transmisión por conducción

Este fenómeno es producido cuando el calor se transmite en los cuerpos sólidos debido al movimiento molecular de ellos.

1.7.6.2. Transmisión por convección

Este fenómeno ocurre siempre que una superficie está en contacto con un fluido que tiene temperatura diferente a la de la superficie en cuestión y puede ser convección natural o forzada.

1.7.6.3. Transmisión por radiación

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas.

1.7.6.4. Intercambiador de calor del tipo casco y tubos

Un intercambiador de calor es un aparato que facilita el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes evitando que se mezclen entre sí.

El intercambiador de calor del tipo casco y tubos, es el tipo más común en las aplicaciones industriales. Este tipo de intercambiador está compuesto por una gran cantidad de tubos contenidos en un casco. Los tubos se disponen con sus ejes paralelos al eje del casco. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por el interior de los tubos mientras que el otro se mueve por fuera de ellos, por el casco. Este tipo de intercambiador se clasifica por el número de pasos por el casco y por el número de pasos por los tubos.

1.8. Elemento de la automatización

Verifica las condiciones operativas del sistema automático intervenido aplicando pruebas de funcionamiento. Estos elementos se usan típicamente en sustituir un trabajador pasivo que controla un determinado sistema (ya sea eléctrico, mecánico, entre otros), con una posibilidad nula o casi nula de error, y un grado de eficiencia mucho más grande que el de un trabajador. Los sistemas de control deben conseguir los siguientes objetivos: ser estables y robustos frente a perturbaciones y errores en los modelos y ser eficiente según un criterio preestablecido evitando comportamientos bruscos e irreales.

1.8.1. Scada

Es una aplicación de software, especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores en el control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (controladores) y controlando el proceso de forma automática desde la pantalla del ordenador.

Comprende todas aquellas soluciones de aplicación para referirse a la captura de información de un proceso o planta industrial, para que, con esta información, sea posible realizar una serie de análisis o estudios con los que se pueden obtener valiosos indicadores que permitan una retroalimentación sobre un operador o sobre el propio proceso, tales como:

- Indicadores sin retroalimentación inherente (no afectan al proceso, solo al operador):
 - Estado actual del proceso: valores instantáneos.
 - Desviación o derivación del proceso: evolución histórica y acumulada.
- Indicadores con retroalimentación inherente) (afectan al proceso, después al operador):
 - Generación de alarmas
 - HMI (Human Machine Interface (interfaces hombre-máquina)
- Toma de decisiones
 - Mediante operatoria humana.

- Automática (mediante la utilización de sistemas basados en el conocimiento o sistemas expertos), entre otros.

1.8.2. Concepto del sistema

- Supervisión: acto de observar el trabajo o tareas de otro (individuo o máquina) que puede no conocer el tema en profundidad, supervisar no significa el control sobre el otro, sino el guiarlo en un contexto de trabajo, profesional o personal, es decir con fines correctivos o de modificación.
- Automática: ciencia tecnológica que busca la incorporación de elementos de ejecución autónoma que emulan el comportamiento humano o incluso superior.
- Principales familias: autómatas, robots, controles de movimiento, adquisición de datos, visión artificial, entre otros.
- PLC: hardware industrial que se utiliza para la obtención de datos. Una vez obtenidos, los pasa a través de bus (por ejemplo, Ethernet) en un servidor.

Actualmente, los PLC no solo controlan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, sino que también pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales analógicas para realizar estrategias de control, tales como controlador proporcional integral derivativo (PID). Los PLC actuales pueden comunicarse con otros controladores y computadoras en redes de área local, y son una parte fundamental de los modernos sistemas de control distribuido.

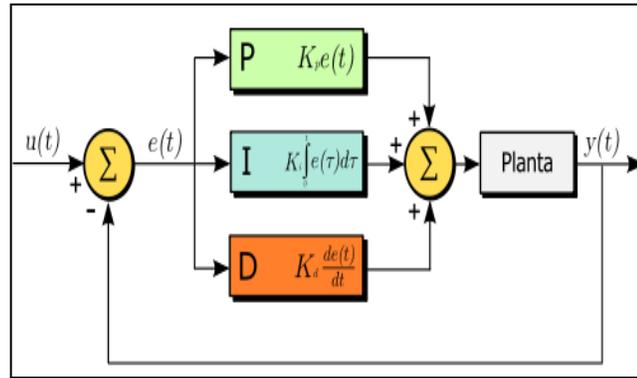
Existen varios lenguajes de programación, tradicionalmente los más utilizados son el diagrama de escalera (Ladder), preferido por los electricistas, lista de instrucciones y programación por estados, aunque se han incorporado lenguajes más intuitivos que permiten implementar algoritmos complejos mediante simples diagramas de flujo más fáciles de interpretar y mantener.

En la programación se pueden incluir diferentes tipos de operandos, desde los más simples como: lógica booleana, contadores, temporizadores, contactos, bobinas y operadores matemáticos, hasta operaciones más complejas como: manejo de tablas, apuntadores, algoritmos PID y funciones de comunicación multiprotocolo, que le permitirían interconectarse con otros dispositivos.

- Proporcional integral derivativo (PID): es un mecanismo de control por realimentación que se utiliza en sistemas de control industriales. Un controlador PID corrige el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener calculándolo y luego sacando una acción correctora que puede ajustar al proceso acorde.

El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor proporcional determina la reacción del error actual. El integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto asegura que, aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso vía un elemento de control como la posición de una válvula de control. Ajustando estas tres constantes en el algoritmo de control del PID, el controlador puede proveer un control diseñado para lo que requiera el proceso a realizar.

Figura 5. Diagrama en bloques de un control PID



Fuente: Controlador PID. http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo. Consulta: 11 de octubre de 2014.

- Funcionamiento de un controlador PID
- Para el correcto funcionamiento de un controlador PID que regule un proceso o sistema se necesita, al menos de los siguientes elementos:
 - Un sensor: que determine el estado del sistema (termómetro, caudalímetro, manómetro, entre otros).
 - Un controlador: que genere la señal que gobierna al actuador.
 - Un actuador: que modifique al sistema de manera controlada (resistencia eléctrica, motor, válvula, bomba, entre otros).
 - El sensor proporciona una señal analógica o digital al controlador, la cual representa el punto actual en el que se encuentra el proceso o sistema. La señal puede representar ese valor en tensión eléctrica, intensidad de corriente eléctrica o frecuencia. En este último caso, la

señal es de corriente alterna, a diferencia de los dos anteriores, que son con corriente continua.

- El controlador lee una señal externa que representa el valor que se desea alcanzar. Esta señal recibe el nombre de punto de consigna (o punto de referencia), la cual es de la misma naturaleza y tiene el mismo rango de valores que la señal que proporciona el sensor. Para hacer posible esta compatibilidad y que, a su vez, la señal pueda ser entendida por un humano, habrá que establecer algún tipo de interfaz (HMI-Human Machine Interface), son pantallas de gran valor visual y fácil manejo que se usan para hacer más intuitivo el control de un proceso.
- El actuador resta la señal de punto actual a la señal de punto de consigna, obteniendo así la señal de error, que determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado (consigna) y el valor medido. La señal de error es utilizada por cada uno de los 3 componentes del controlador PID.

Las 3 señales sumadas, componen la señal de salida. La señal resultante de la suma de estas tres se llama variable manipulada y no se aplica directamente sobre el actuador, sino que debe ser transformada para ser compatible con el actuador que usemos.

1.8.3. Interfaz humano-máquina

Una interfaz hombre-máquina o HMI ("Human Machine Interface") es el aparato que presenta los datos a un operador (humano) y a través del cual este controla el proceso.

SCADA es popular debido a esta compatibilidad y seguridad. Esta se usa desde aplicaciones pequeñas, como controladores de temperatura en un espacio, hasta aplicaciones muy grandes como el control de plantas nucleares.

1.8.4. Componentes del sistema

Los componentes de un sistema SCADA son:

1.8.4.1. Unidad de terminal remota (UTR)

La UTR se conecta al equipo físicamente y lee los datos de estado como los estados abierto/cerrado desde una válvula o un interruptor, lee las medidas como presión, flujo, voltaje o corriente. Por el equipo el UTR puede enviar señales que pueden controlarlo: abrirlo, cerrarlo, intercambiar la válvula o configurar la velocidad de la bomba, ponerla en marcha, pararla.

La UTR puede leer el estado de los datos digitales o medidas de datos analógicos y envía comandos digitales de salida o puntos de ajuste analógicos.

Una de las partes más importantes de la implementación de SCADA son las alarmas. Una alarma es un punto de estado digital que tiene cada valor normal o alarma. Esta se puede crear en cada paso que los requerimientos lo necesiten.

1.8.4.2. Estación maestra

Se refiere a los servidores y el software responsable para comunicarse con el equipo del campo (UTRs, PLCs, entre otros), en estos se encuentra el software HMI corriendo para las estaciones de trabajo en el cuarto de control, o en cualquier otro lado. En un sistema SCADA pequeño, la estación maestra puede estar en un solo computador, a gran escala, en los sistemas SCADA la estación maestra puede incluir muchos servidores, aplicaciones de software distribuido, y sitios de recuperación de desastres.

1.8.4.3. Infraestructura y métodos de comunicación

Los sistemas SCADA tienen tradicionalmente una combinación de radios y señales directas; seriales o conexiones de módem para conocer los requerimientos de comunicaciones, incluso Ethernet e IP sobre *Synchronous Optical Network* (SONET) (fibra óptica) es también frecuentemente usada en la generación de energía eléctrica. Es más, los métodos de conexión entre sistemas puede incluso que sea a través de comunicación inalámbrica.

Para que la instalación de un SCADA sea perfectamente aprovechada, debe de cumplir varias condiciones:

- Ser sistemas de arquitectura abierta (capaces de adaptarse según las necesidades de la empresa).
- Comunicarse con facilidad al usuario con el equipo de planta y resto de la empresa (redes locales y de gestión).
- Ser programas sencillos de instalar, sin excesivas exigencias de hardware. También tienen que ser de utilización fácil.

1.9. Equipos de automatización

Es importante disponer de los equipos de automatización correctos y adecuados para la práctica. Sin embargo, los conceptos, procesos y ejercicios apropiados son los que añaden el valor decisivo.

1.9.1. Actuador de la turbina de vapor

Un actuador es un dispositivo inherentemente mecánico, cuya función es proporcionar fuerza para mover o actuar otro dispositivo mecánico. La fuerza que provoca el actuador proviene de tres fuentes posibles: presión neumática, presión hidráulica, y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide). Dependiendo del origen de la fuerza el actuador se denomina neumático, hidráulico o eléctrico.

Por lo general, los actuadores hidráulicos se emplean cuando lo que se necesita es potencia, y los neumáticos son simples posicionamientos.

- **Actuadores hidráulicos**

Se clasifican en actuadores lineales, llamados cilindros. Y actuadores rotativos en general denominados motores hidráulicos. Los actuadores son alimentados con fluido a presión y se obtiene un movimiento con una determinada velocidad, fuerza, o bien velocidad angular y momento a partir de la pérdida de presión de un determinado caudal del fluido en cuestión.

1.9.2. Mando de la turbina de vapor

El mando con el que se controla la turbina de vapor es un sistema que incluye electrónica, mecánica e hidráulica. Para controlar el funcionamiento de operación de la turbina se tiene un sistema de control, el cual monitorea la velocidad. Cuando el sistema detecta que la velocidad varía respecto al *set point*, el sistema, por medio de una señal, le indica al actuador que regule la presión de aceite, que a su vez genera un movimiento mecánico con el cual se pueda abrir o cerrar la válvula de admisión de vapor, permitiendo de esta manera subir o bajar la velocidad de la turbina de vapor.

1.9.3. Gobernador digital

Es un microprocesador electrónico o bien un dispositivo transductor que convierte una señal de corriente a una presión hidráulica. Conforme a las especificaciones el fabricante determina a qué presión se abre o cierra las válvulas de admisión.

1.9.4. Controlador de carga

El EGCP3 es un controlador de carga eléctrica, con el cual se puede aumentar o disminuir la carga eléctrica producida por el generador Worthington. Este controlador manda una señal eléctrica al mando de la turbina para que el actuador permita la apertura o cierre de la válvula de admisión de vapor, y que de esta forma se pueda disminuir o aumentar la velocidad de la turbina con la cual se obtiene la energía eléctrica del generador.

1.9.5. Regulador de voltaje

También llamado estabilizador de voltaje o acondicionador de voltaje es un equipo eléctrico que acepta una tensión de voltaje variable a la entrada, dentro de un parámetro predeterminado y mantiene a la salida una tensión constante (regulada). Los reguladores de voltaje, son sistemas de control que mantienen el voltaje del generador a un valor predeterminado, o para variarlo de acuerdo a las condiciones de operación del generador, básicamente consisten en un circuito que censa la desviación entre el voltaje del generador y un valor dado, utilizando esa señal de error para controlar el nivel de excitación necesario.

2. ANÁLISIS DE LA SINCRONIZACIÓN Y ELEMENTOS QUE INFLUYEN EN LA OPERACIÓN ACTUAL DE UN TURBOGENERADOR DE ESCAPE, EN UN INGENIO AZUCARERO

2.1. Elementos de operación en turbogenerador de escape

Los turbogeneradores de escape de vapor dentro de la industria azucarera desarrolla varias funciones, entre las cuales destacan: generación de energía eléctrica y vapor de escape. Para describir los elementos que intervienen en la operación de un turbogenerador, se tiene que tomar en cuenta el proceso de generación de vapor de agua; el vapor obtenido en el proceso mencionado es utilizado para generar movimiento interno de las piezas mecánicas en la turbina. El movimiento producido por la turbina, es transmitido a través de un acople mecánico entre el eje de la turbina y el eje del rotor del generador, el cual por medio de un campo magnético genera la energía eléctrica. La turbina cuenta con álabes que generan el movimiento rotacional dentro de la turbina, pero al pasar el vapor entre cada una de ellas, el vapor va disminuyendo de presión hasta llegar al escape de la turbina.

Para detallar el proceso de la generación del vapor utilizado en la turbina de escape, se debe mencionar que influyen elementos importantes en esta secuencia:

- **Patio de caña:** es el lugar donde se hace la recepción de la caña, y a su vez se ejecutan una serie de pasos con los cuales se obtiene la

preparación de la caña, teniendo al final la fibra de la caña que se utiliza para alimentación de los molinos.

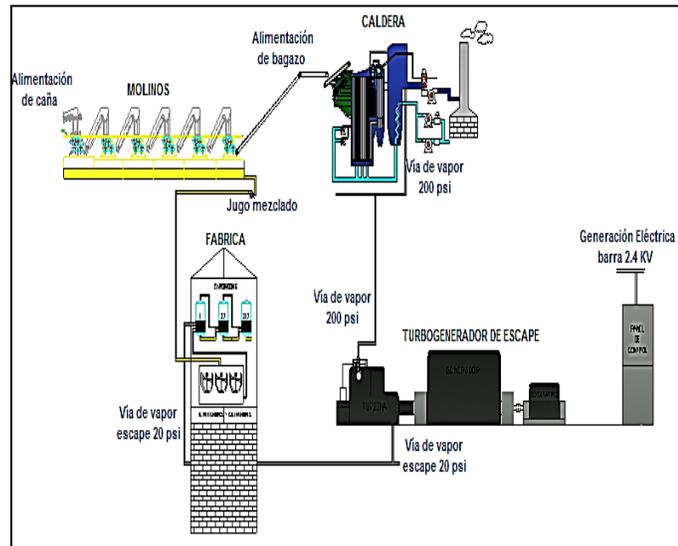
- Molinos: por medio de los molinos se obtiene el bagazo que es utilizado para combustible de la caldera de vapor y también el jugo mezclado que se dirige hacia clarificadores y calentadores de fábrica.
- Caldera de vapor: por medio de la transferencia de calor que proporciona la combustión y el agua proporcionada por las bombas de alimentación, produce un cambio de estado en el líquido, generando así, el vapor sobrecalentado a una presión constante.
- Turbina de vapor: genera movimiento giratorio y vapor de escape para evaporadores de fábrica.
- Generador: por medio del movimiento giratorio de la turbina de vapor, genera energía eléctrica para consumo interno del ingenio.
- Fábrica: lugar de proceso para la producción de azúcar.

Figura 6. **Proceso de la generación de energía en un ingenio azucarero**



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Proceso de la generación de vapor y energía eléctrica en un ingenio azucarero**



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator.

Los elementos que intervienen en la operación de un turbogenerador de escape en un ingenio azucarero, se dividen en los componentes siguientes:

- Generador de vapor de agua (caldera)
- Gobernador de la turbina
- Turbina de vapor de escape
- Generador eléctrico
- Excitatriz del generador
- Panel de control de generador eléctrico

2.2. Información general del turbogenerador de escape Worthington de 4 MW

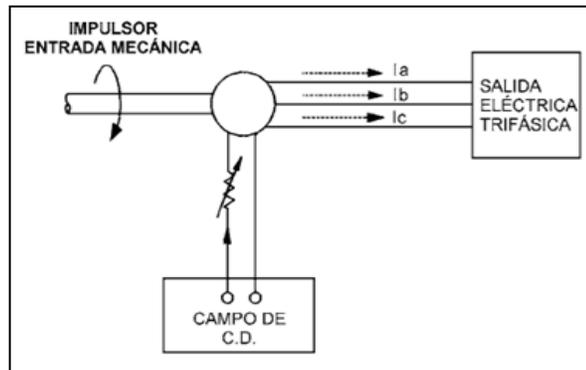
El turbogenerador está compuesto por una turbina de vapor que tiene un gobernador neumático que se controla de forma manual, un generador eléctrico que tiene el eje de su rotor acoplado al eje de la excitación que giran simultáneamente, la corriente que alimenta las bobinas de excitación se suministra a través de unos anillos rozantes y unas escobillas, para la regulación de corriente de excitación se utilizan reóstatos de regulación, los cuales se conectan en el circuito de la excitatriz.

El vapor que entra a la turbina tiene una presión de 200 PSI, el cual se disminuye conforme atraviesa cada una de las etapas de la turbina hasta que llega a una presión de escape de vapor de 20 PSI. El generador síncrono es acoplado al eje de la turbina el cual se encarga de realizar la conversión de energía mecánica en energía eléctrica.

2.2.1. Conexiones eléctricas

Es uno de los numerosos fenómenos que pueden producir trabajo mecánico o calor. La primera transformación se realiza en los motores y la inversa de los generadores electromagnéticos de corriente (dínamos, alternadores). En todos los conductores por los que pasan una corriente hay una producción de calor, la transformación contraria directa, es decir de calor en electricidad, se observa en las pilas termoeléctricas y basta calentar una de las dos soldaduras de dos metales diferentes que forman parte de un circuito para que se engendre en el mismo una corriente. De ellos se deduce que existe energía eléctrica y que el paso de una corriente es en realidad un transporte de energía a lo largo de un circuito.

Figura 8. **Diagrama del generador sincrónico básico**



Fuente: The Power Engineering Education Committee. Power System Relaying Committee.
Tutorial ieee de protección de generadores sincrónicos. p. 1.

El generador síncrono es trifásico y dispone de tres devanados iguales en el estator, dispuestos de forma que queden desplazados entre sí 120° . Durante una vuelta del rotor, los polos norte y sur pasan frente a los tres devanados del estator. Durante la magnetización se genera en cada devanado una tensión alterna monofásica. Las tres tensiones alternas monofásicas tienen el mismo ciclo en el tiempo, pero desplazadas entre sí en la tercera parte de una vuelta, por lo que se dice que tienen la misma fase de oscilación. Por coincidir siempre el desplazamiento del campo magnético giratorio con el desplazamiento del rotor (rueda polar) por lo que se denominan generadores síncronos.

En los generadores síncronos, la velocidad de rotación del rotor que genera el campo magnético y la frecuencia de la señal eléctrica inducida están relacionadas a través de la ecuación:

$$f = p n / 60$$

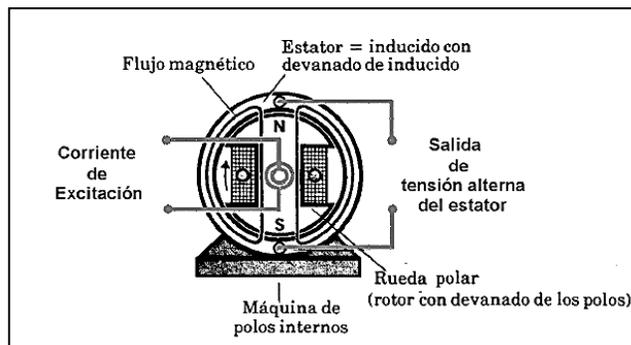
Donde:

f = la frecuencia de la señal eléctrica de salida (ciclos/s o hercios).

p = el número de pares de polos que generan el campo magnético.

n = el número de revoluciones por minuto que da el eje del rotor del generador.

Figura 9. **Esquema básico de un generador síncrono con 2 polos excitados mediante corriente continua**



Fuente: VELNÁSQUEZ TERRANOVA, Diego.

http://www.ute.com.uy/empresa/entorno/Energias_Renovables/eolica/Actividad_2002/Eolica_Generadores.pdf. p. 4. Consulta: 11 de octubre de 2014.

2.2.2. Disposiciones para la manipulación manual del turbogenerador de escape

A continuación, se describen los elementos de manipulación manual de un turbogenerador de escape.

- Válvula principal de compuerta manual para la admisión de vapor
- Válvulas manuales de purga para la turbina de vapor

- Válvula manual para escape de vapor
- Válvula de cierre rápido de la turbina de vapor
- Gobernador manual de la turbina de vapor
- Bomba de lubricación de aceite
- Bomba de enfriamiento del generador eléctrico
- Banco de batería
- Breaker de la excitatriz (DC)
- Dispositivos para la sincronización del turbogenerador
- Breaker principal de 2,4 KV
- Instrumentos de medición

2.2.3. Estator y rotor del generador síncrono

Es un tipo de máquina eléctrica rotativa capaz de transformar energía mecánica (en forma de rotación) en energía eléctrica. Su principio de funcionamiento consiste en la excitación de flujo en el rotor.

- Estator del generador: es la parte fija del generador donde se genera un flujo magnético que produce una tensión alterna de 2,4 KV a la salida de sus bobinas.

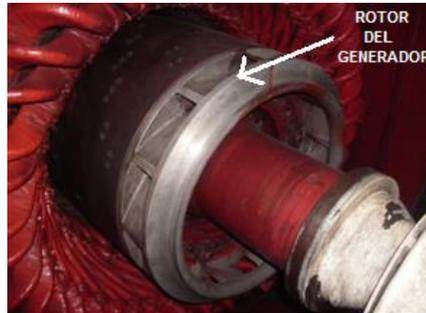
Figura 10. **Estator del generador eléctrico Worthington**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

- Rotor del generador: es la parte móvil del generador que se encuentra acoplado al eje de la turbina de vapor y al eje de la excitatriz.

Figura 11. **Rotor del generador**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

2.3. Descripción del generador eléctrico Worthington

Dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos de sus puntos (llamados polos, terminales o bornes) transformando la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estátor).

Tabla III. **Características del generador eléctrico**

| | PLACA DE DATOS | | |
|--------|----------------|-------------|--------|
| KVA | 5 000 | RPM | 3 600 |
| VOLTS | 2 400 | TEM/ARM | 60 °C |
| AMPS | 1 200 | FIELD | 85 °C |
| F.P. | 0,6 | FIELD VOLTS | 125 |
| KW | 4 000 | FIELD AMPS | 200 |
| FASES | 3 | INST. BOOK | 86 |
| CICLOS | 60 | SERIAL | 105626 |

Fuente: turbogenerador, Ingenio Santa Ana.

2.3.1. Funcionamiento del generador Worthington

A través del generador eléctrico se puede tener la energía eléctrica necesaria para mantener energizados varios transformadores y circuitos dentro de la fábrica, por ejemplo: CCM (centro de control de motores), tableros de iluminación, entre otros.

2.3.2. Arranque del generador Worthington

Al momento de empezar a girar mecánicamente el rotor del generador, ya se está generando energía eléctrica alterna en sus terminales, la cual se rectifica para inyectarla como corriente directa a través de los anillos rozantes de la excitatriz. Con la excitación del generador se logra tener un desfase entre la fem (fuerza electromotriz) y la tensión en las terminales del generador. Con esto ya se logra tener la tensión nominal en las terminales del generador eléctrico.

2.4. Devanados

Son las bobinas de alambre de cobre que se encuentran alojadas dentro del estator (parte fija).

2.4.1. Temperatura en devanados

El aislamiento de los devanados de generador se diseñó solamente para manejar ciertos niveles de temperatura. El material de aislamiento de los devanados se selecciona con base en la capacidad de operación a temperaturas específicas.

2.4.2. Resistencia de aislamiento

La resistencia de aislamiento puede definirse como la resistencia ofrecida a una tensión de corriente que tiende a producir una fuga de corriente a través del aislamiento y de fugas en su superficie. La resistencia de aislamiento varía ampliamente con los cambios de la temperatura, la humedad y el valor de la tensión aplicada.

2.5. Carga máxima

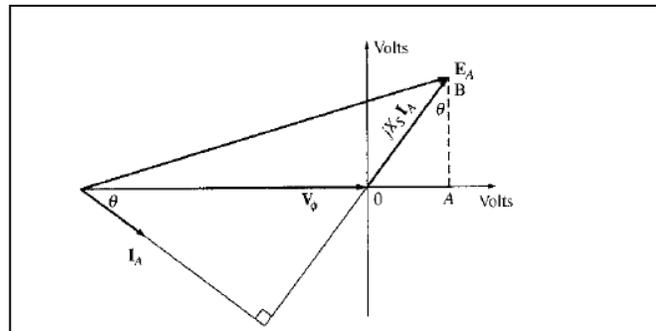
En la práctica la mayoría de los operadores tratan de limitar los KVA y trabajan con los valores establecidos en la placa de datos del generador. Esto se hace para obtener una larga vida para las bobinas, y mantener la unidad y la estabilidad del sistema. Se entiende que la placa de datos del generador puede ser superado sensiblemente sin peligro inmediato de disparo, pero tal aumento de la producción se obtiene en un sacrificio en la duración de la vida de las bobinas.

2.5.1. Factor de potencia

La capacidad de un generador síncrono para producir potencia eléctrica está limitada en principio por el calentamiento interno de la máquina. Puesto que el generador tiene dos devanados diferentes (el inducido y el campo), también tiene dos restricciones separadas. El calentamiento máximo permisible en los devanados del inducido establece los kilovoltamperes máximos admisibles de la máquina, y el máximo calentamiento permisible en los devanados de campo establece el máximo tamaño de E_A . Los tamaños máximos de E_A e I_A juntos establecen el factor de potencia nominal del generador.

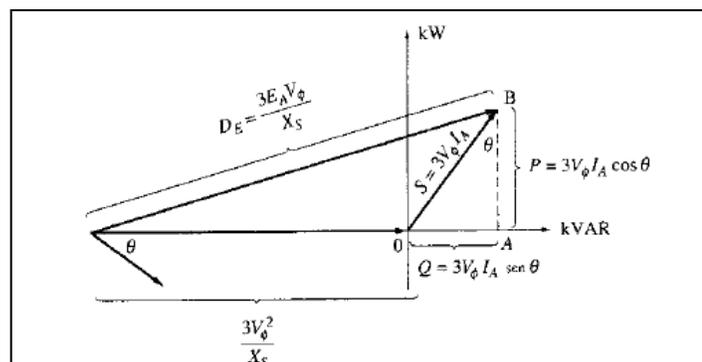
El límite de calentamiento del rotor y del estator, junto con cualquier limitante externa al generador, puede ser expresados en forma gráfica por un diagrama de capacidad. Un diagrama de capacidad es un dibujo de potencia compleja $S=P+jQ$ derivado del diagrama fasorial del generador, suponiendo que V_ϕ es constante en un valor nominal de la máquina.

Figura 12. **Diagrma fasorial de un generador síncrono**



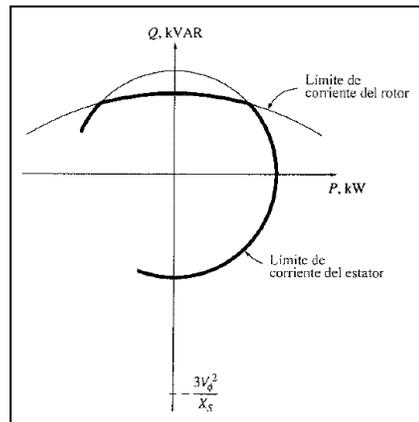
Fuente: CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. p. 336.

Figura 13. **Unidades correspondientes de potencia**



Fuente: CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. p. 336.

Figura 14. Diagrama de capacidad de un generador síncrono



Fuente: CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. p. 337.

Cualquier punto situado entre ambos círculos es un punto de operación segura para el generador.

2.5.2. Tensión

Se conoce como tensión al voltaje a la salida del generador/estator y esta depende de los siguientes elementos:

- La fuerza del campo magnético en el rotor.
- La velocidad de movimiento relativo entre el campo magnético y los conductores del estator.

2.5.3. Estabilidad

Es la capacidad que tiene el generador de alcanzar un punto de equilibrio estable tras la ocurrencia de una perturbación.

2.5.4. Vibraciones

Es el movimiento que oscila o varía con respecto a un punto establecido, este movimiento se puede tener de forma radial, axial y longitudinal, y es efecto de un desbalance mecánico.

El turbogenerador de 4 MW actualmente no cuenta con un sistema que detecte estos desbalances mecánicos. En el turbogenerador pueden ocurrir desbalances mecánicos, que pueden provocar desgaste, daño total de piezas o bien causar un daño físico a personas por vibraciones que provoquen el desacoplamiento de piezas mecánicas del turbogenerador, por cual es importante tener un control de estas vibraciones en puntos críticos, por ejemplo:

- Turbina de vapor.
- Acoplamiento entre los ejes de la turbina de vapor y rotor del generador
- Generador eléctrico.
- Acoplamiento entre los ejes del rotor del generador y rotor de la excitatriz del generador.
- Excitatriz del generador.

2.5.5. Sistema de enfriamiento del generador

La capacidad del generador sincrónico para producir potencia eléctrica está limitada primordialmente por el calentamiento dentro de la máquina, ya que la resistencia eléctrica de los conductores de cobre se incrementa al subir la temperatura, con el consecuente daño de los devanados del generador y pérdidas de eficiencia.

El sistema de enfriamiento del generador Worthington se lleva a cabo por la circulación de agua a través de los enfriadores que se encuentran ubicados en cada uno de los lados del generador eléctrico.

2.6. Descripción de la excitatriz del generador eléctrico Worthington

Dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos de sus puntos (llamados polos, terminales o bornes) transformando la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estátor).

Tabla IV. Datos de la excitatriz

| | Placa de datos | | |
|-----------|----------------|-------------|----------------|
| GENERADOR | DC | TYPE | EDF |
| KW | 40 | FRAME | 93 |
| VOLTS | 125 FL | INST. BOOK | 86 |
| VOLTS | --- NL | PROD. NÚM. | D 174191 |
| AMPS | 320 | SERIAL NÚM. | 704644 9 WH |
| RPM | 3600 | | |

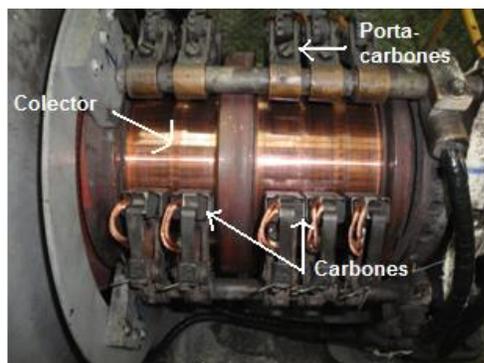
Fuente: Ingenio Santa Ana.

El sistema de excitación de un generador es la fuente de corriente del campo de excitación incluyendo los medios para su control. El sistema consta de lo siguiente:

- El excitador el cual produce una corriente para generar el campo magnético dentro del generador.
- El regulador de voltaje el cual controla la salida del excitador.

- Escobillas o carbones: las escobillas están fabricadas de carbón prensado y se apoyan rozando continuamente contra el colector de la excitatriz del generador a través de la acción de unos resortes que se encuentran en los porta carbones. El material con que están fabricadas las escobillas produce un roce suave equivalente a una lubricación.
- Porta carbones: son elementos que sujetan y canalizan el movimiento de los carbones. Los cuales se deslizan libremente en su caja siendo obligadas a apoyarse sobre el colector por medio de un resorte que carga al carbón con una tensión determinada.

Figura 15. **Porta carbones y carbones en colector de excitatriz del generador eléctrico**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

2.6.1. Alineación de la excitatriz

La desalineación es, sin duda, una de las causas principales de los problemas que se tienen en las máquinas eléctricas.

La desalineación en un turbogenerador puede costar de un 20 a un 30 % de tiempo de paro no programado, partes de repuestos y consumos de energía.

A lo largo del eje y en los acoples entre la turbina, generador eléctrico y su excitatriz debe de tener la alineación correcta para el éxito en su funcionamiento durante se esté operando para la generación de energía eléctrica.

2.7. Descripción de la turbina Worthington

Transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (entiéndase el vapor) y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con palas o álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético.

Tabla V. Datos de la turbina de vapor

| | Placa de datos | | |
|-------------|-------------------|------------------|---------|
| KW | 4000 | Temperatura | 371 °F |
| RPM | 3600 | Vapor de entrada | 200 psi |
| Gobernador | Woodward UG 32 | Vapor de escape | 20 psi |
| Forma | 7T | Inst. Book | 86 |
| Núm. Etapas | 7 | Serie núm. | 16742 |

Fuente: Ingenio Santa Ana.

2.7.1. Constitución general de la turbina Worthington

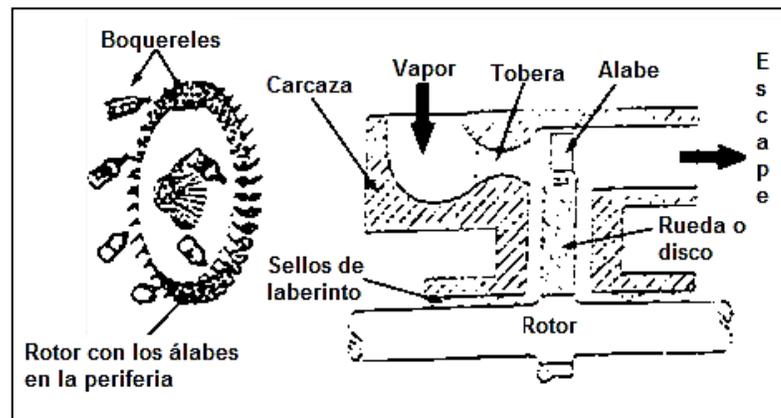
En una turbina se pueden distinguir dos partes: el rotor y el estator. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y que constituyen la parte

móvil de la turbina. El estator también está formado por álabes, no unidos al eje sino a la carcasa de la turbina.

2.7.2. Principio de funcionamiento de turbina Worthington

Este principio se basa en el aprovechamiento de la energía cinética del vapor de agua a una presión de 200 PSI.

Figura 16. Principio de funcionamiento de la turbina de vapor



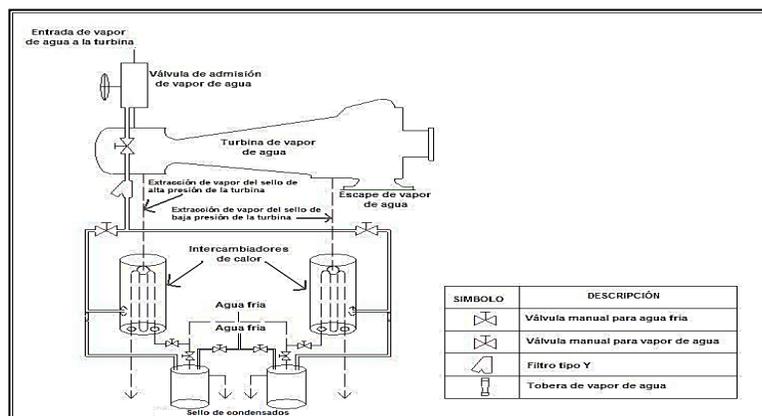
Fuente: EcuRed. <http://www.ecured.cu/index.php/Archivo:TurbinaJ.JPG>. Consulta: 11 de octubre de 2014.

2.7.2.1. Funcionamiento de la turbina Worthington

Cuando el vapor ingresa a la turbina Worthington, hay cierta cantidad de vapor que permanece antes de la primera y al final de la última etapa de turbina, donde se tiene una presión de escape de vapor de 20PSI, la cual es dirigida a la salida de la turbina. En estos lugares de la turbina se debe de extraer este vapor, el cual puede producir condensado que se mezcle con la

lubricación de los rodamientos, y esto a su vez provoque daños más serios a la turbina de vapor.

Figura 17. **Esquema de extracción de vapor de sellos de la turbina Worthington**



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator.

2.7.2.2. Ajustes en las tuberías de vapor de agua

La tubería donde se traslada el vapor de agua que se utiliza a la entrada de la turbina Worthington viene directamente de la caldera, evitando tener muchos accesorios en el trayecto de la caldera y ubicación del turbogenerador, esto con el propósito de mantener la presión de 200 PSI, que se necesita para que la turbina sea eficiente durante su operación.

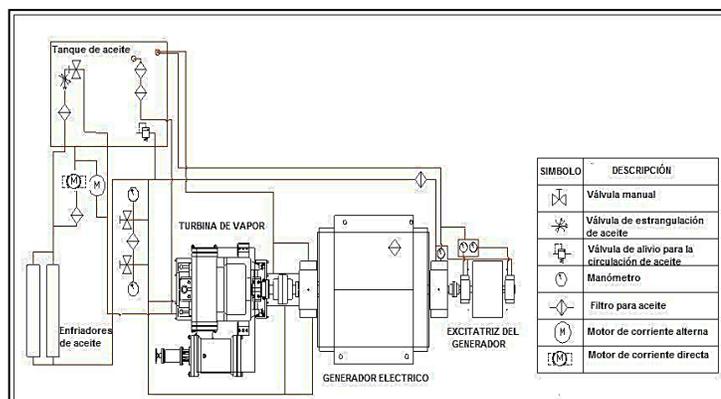
2.8. Sistema de presión de aceite en la turbina Worthington

El sistema de presión de aceite en la turbina, cuenta con una bomba mecánica que se encuentra en la mitad inferior de la turbina de vapor, esta a la vez es impulsada desde el gobernador a través de un manguito del eje de

acoplamiento. El eje del gobernador, a su vez, es impulsado a través de un gusano de acero en el eje de la turbina.

El aceite es bombeado desde el depósito de la bomba de aceite y se dirige a través de una válvula de alta presión y, a continuación atraviesa un filtro para luego ser conducido al enfriador. Desde el enfriador de aceite, el aceite pasa, por medio de una válvula de alivio, para mantener la presión del lubricante que se está suministrando a los rodamientos del turbogenerador. El exceso de lubricante se devuelve al depósito para ser utilizado en un nuevo ciclo de lubricación.

Figura 18. **Esquema actual de lubricación de aceite del turbogenerador de escape de 4 MW**

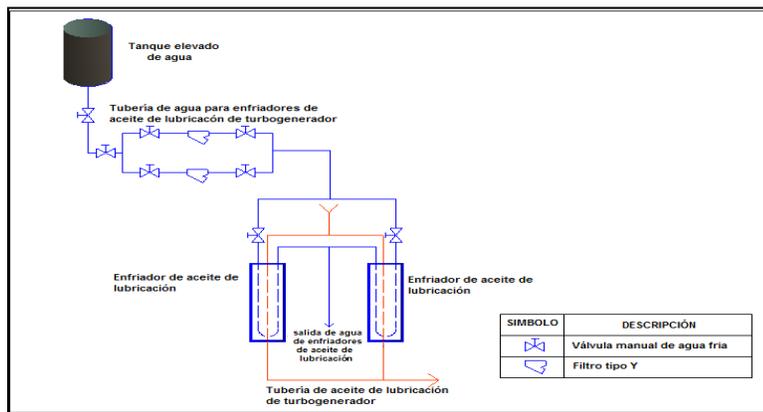


Fuente: elaboración propia, con programa adobe Illustrator.

- **Enfriador de aceite:** es un intercambiador de calor instalado en la línea de aceite con el objetivo de mantener el lubricante a una temperatura constante, especificada por el fabricante del equipo, que no altere las características originales; para controlar un buen funcionamiento debe

tomarse en cuenta la presión y temperatura tanto del agua como del aceite, en la entrada y salida del enfriador.

Figura 19. **Esquema de enfriamiento de la lubricación del turbogenerador de escape Worthington de 4 MW**



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator.

- Filtros de aceite: estos filtros tienen por objetivo recoger todas las impurezas con que se puede contaminar el aceite y, de preferencia, no debe tolerar partículas iguales o mayores al grueso de la película de aceite en los cojinetes.

2.8.1. Sistema de lubricación de cojinetes

La lubricación de los cojinetes del generador eléctrico y del excitador, se obtiene del sistema de lubricación de la turbina.

Durante el arranque debe vigilarse que exista buena lubricación para evitar desgaste en los cojinetes al sacar del reposo al rotor del generador, un

aumento anormal en la temperatura de los cojinetes puede indicar que no son adecuadamente lubricados.

- **Cojinetes radiales:** el rotor de la turbina está sostenido mediante cojinetes deslizantes parciales de 180° de carga radial uno en cada muñón. El alineamiento de estos cojinetes es muy importante para mantener holguras estrechas entre rotor y los sellos, y las holguras estrechas entre el rotor y la carcasa.

Estos cojinetes se fabrican con un recubrimiento de babbit con base de estaño (Sn) que resiste temperaturas en un rango de 150 a 175°F.

- **Cojinetes de empuje:** los cojinetes de empuje mantienen el rotor en su posición axial correcta.

2.8.2. Sistema hidráulico de mando

Este sistema es el que proporciona la presión para que la turbina pueda ser reseteada, y de esta forma el cilindro suba a presión hasta que se enganche con la válvula de la turbina, teniendo este enganche, ya se puede maniobrar la turbina Worthington.

2.8.3. Bomba de aceite

Se trata de una bomba centrífuga que absorbe energía mecánica que proviene de un motor eléctrico, y la transforma en energía que la transfiere a un fluido como energía hidráulica la cual permite que el fluido pueda ser transportado de un lugar a otro, a un mismo nivel o a diferentes niveles y a diferentes velocidades.

2.8.4. Bomba auxiliar de aceite

La bomba auxiliar suministra aceite a los sistemas de lubricación durante el arranque y paradas del turbogenerador así, también de proporcionar períodos de presión de aceite para abrir las válvulas de admisión para iniciar la turbina.

Adicionalmente a estas bombas, también existe una bomba de energía, accionada por un motor de corriente directa, esta bomba suministra aceite a los cojinetes en caso de fallar las bombas principales y auxiliares.

2.8.5. Tanque de aceite

Este es un depósito rectangular, sus dimensiones varían dependiendo del tamaño de la turbina, se encuentra localizado en la parte trasera del gobernador a un nivel más bajo que este. Las líneas de retorno de aceite están dispuestas de modo que entran al tanque horizontalmente, justamente por encima del nivel de aceite y la descarga desde las válvulas de alivio.

2.8.6. Válvulas del sistema de aceite

Las válvulas de alivio de presión, también llamadas válvulas de seguridad, están diseñadas para liberar fluido cuando la presión interna supera el umbral establecido. Su misión es evitar una explosión, el fallo de un equipo o tubería por un exceso de presión.

2.9. Gobernador de velocidad Woodward

El gobernador posee un dispositivo de sobre velocidad o emergencia que desconecta la alimentación del vapor cuando se excede en el 10 % la velocidad de la operación (velocidad máxima), con el gobernador se controla normalmente la velocidad para que sea constante.

- Funcionamiento: al subir la velocidad de la turbina, las partes se mueven hacia afuera en virtud de la fuerza centrífuga y hacen que la transmisión abra una válvula piloto que admite y libera aceite en cualquier lado del pistón o a un lado el pistón accionado por resortes, el movimiento del pistón controla las válvulas de vapor.

Figura 20. **Gobernador Woodward instalado actualmente**

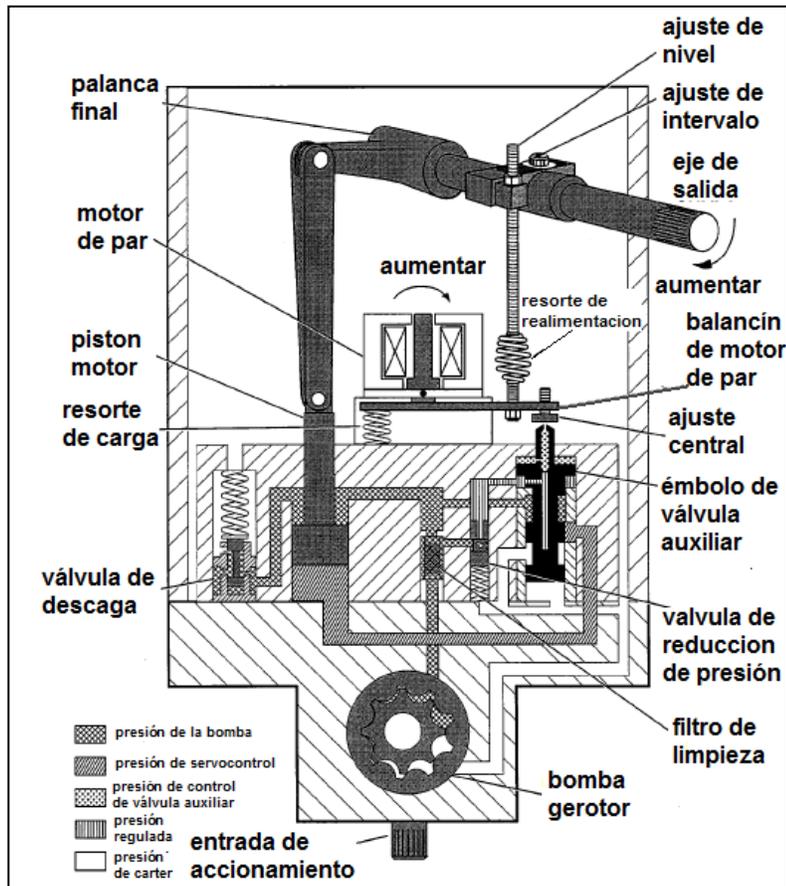


Fuente: Ingenio Santa Ana.

2.9.1. Esquema

A continuación, en la figura 21 se presenta en el siguiente esquema el funcionamiento del gobernador Woodward.

Figura 21. Esquema de funcionamiento del gobernador Woodward



Fuente: Woodward, Manual SP37515. p. 9.

2.9.2. Sincronización

El gobernador controla la velocidad de la turbina, la que afecta directamente la frecuencia de la corriente eléctrica producida en el generador. La regulación de velocidad, se expresa como un porcentaje de la velocidad nominal, es el cambio que se tiene en la velocidad al momento de cambiar gradualmente la salida de potencia de la turbina.

2.9.3. Límite de carga

El límite de carga hidráulica es el límite de la carga que se pueden poner en el gobernador mediante la restricción del ángulo de rotación de su eje terminal.

2.9.4. Reducción de carga

Se puede tener una reducción de vapor en la turbina por medio de la regulación del cilindro en dirección hacia debajo de la turbina, con este movimiento se regulan las válvulas de entrada de vapor y así, mismo se reduce la carga de vapor en la turbina.

2.9.5. Aumento de carga

Al igual que se puede reducir la entrada de vapor, también se puede aumentar en la entrada de la turbina, por medio de la regulación del cilindro en dirección hacia arriba de la turbina, con este movimiento se regulan las válvulas de entrada de vapor, y asimismo se aumenta la carga de vapor en la turbina.

2.10. Protecciones eléctricas

El generador eléctrico Worthington cuenta con relevadores de corriente, los cuales son dispositivos que detectan corrientes con valores por encima de lo que se considera aceptable, y cuando esto sucede se inicia la operación necesaria para aislar al generador eléctrico.

2.10.1. Tipos de relé

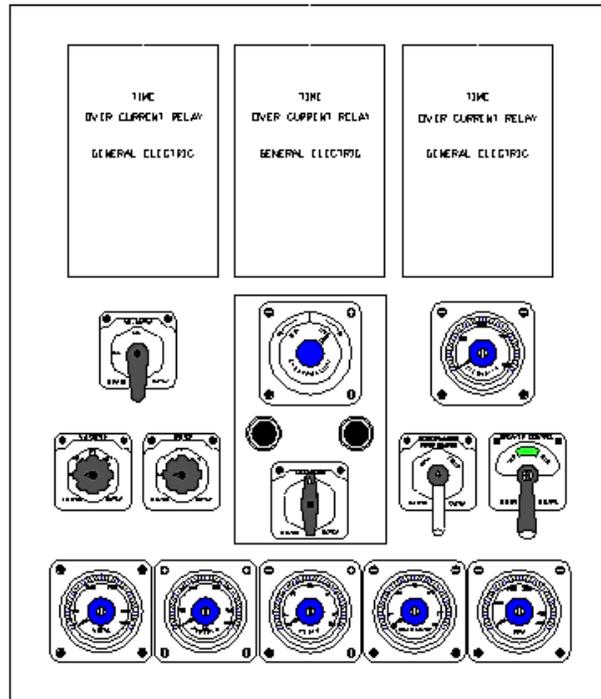
El generador eléctrico cuenta con 3 relés, los cuales se utilizan para la protección de sobre corriente en cualquiera de las tres fases. Y también con un relé de potencia eléctrica, se requiere de un único relé, debido a que la potencia suele ser la misma en las tres fases. Según la norma IEEE, estos relevadores tienen asignado el núm. 51 y 52 respectivamente.

- Relevador 51: es un relé con una característica de tiempo inverso o de tiempo fijo que funciona cuando la intensidad de un circuito de carga alterna (AC) sobrepasa un valor dado.
- Relevador 52: es el relé que se utiliza para cerrar e interrumpir un circuito de potencia de carga alterna (AC) bajo condiciones normales, o para interrumpir este circuito bajo condiciones de falla o de emergencia.

2.10.2. Instalación

Actualmente, el generador cuenta con un panel donde se encuentran los dispositivos de control para la sincronización del generador y así también, los relés de protección que se mencionaron anteriormente.

Figura 23. **Panel eléctrico del generador**

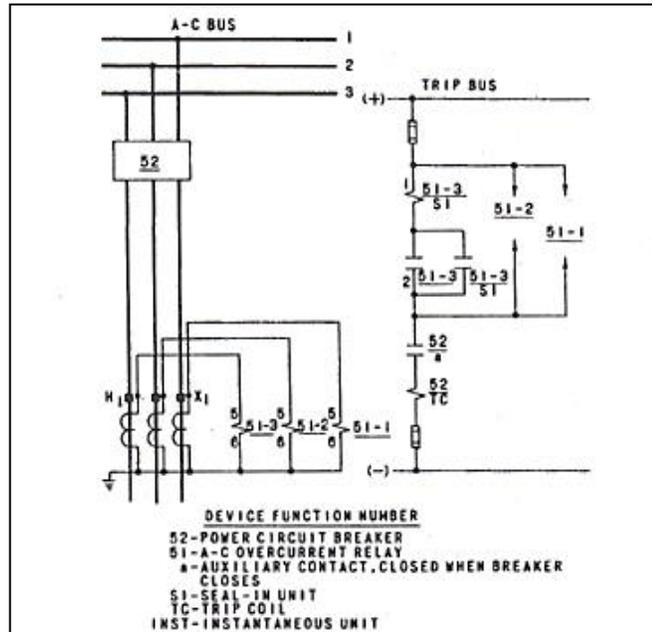


Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator.

2.10.3. **Conexiones**

Los diagramas de conexión para los distintos tipos de relé se muestran en la figura 24.

Figura 24. Diagrama de relé de protección



Fuente: General Electric. <http://www.gedigitalenergy.com/products/manuals/iac/geh2059.pdf>. p.

12. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

2.11. Análisis de instrumentos de medición en la operación de un turbogenerador de escape Worthington

El turbogenerador cuenta con pocos dispositivos de medición como lo son: manómetros para la medición de la presión en las líneas de vapor, sistema de aceite, agua de enfriamiento, entre otros. Para la medición de la temperatura en las chumaceras se utilizan termómetros de mercurio de lectura local.

El tacómetro que se utiliza actualmente es un dispositivo electromecánico que toma lectura de la velocidad de rotación de la turbina, este instrumento de medición generalmente va colocado en el gobernador de la turbina, en donde

cualquier vibración ligera de la turbina, se traduce en una correspondiente medición de la velocidad.

El voltímetro, el cual indica el voltaje de salida del generador; amperímetro que indica la corriente en cada una de las fases; indicadores del factor de potencia; frecuencímetro encargado de monitorear la frecuencia del generador.

Para el caso de la excitatriz se tienen instrumentos de medición que indican los valores de corriente directa en el banco de baterías que se utilizan para la excitación del generador, estos instrumentos son de voltaje y de corriente directa.

2.12. Análisis de la sincronización de la turbina de vapor Worthington

Los parámetros que se analizan son los siguientes:

- Temperatura de cojinetes (en funcionamiento normal)
- Temperatura de aceite (en funcionamiento normal)
- Presión de aceite
- Desplazamiento axial
- Holgura en cojinetes radiales
- Potencia a plena carga
- Verificación de un arranque:
 - Paso por velocidades críticas
 - Facilidad-dificultad de sincronización
 - Tiempo de arranque

Tabla VI. **Pasos para la sincronización de la turbina de vapor Worthington**

| Núm. de paso | Descripción |
|--------------|---|
| 1 | Abrir válvulas de purga de vapor. |
| 2 | Revisar válvulas de tubería de enfriamiento. |
| 3 | Accionar bomba eléctrica para la lubricación de aceite. |
| 4 | Resetear la turbina. |
| 5 | Empieza a abrir poco a poco la válvula de admisión de vapor. |
| 6 | Se empieza a rodar el rotor de la turbina, hasta que suba sus revoluciones a 3 400 rpm, que es la velocidad en la cual la turbina ya puede ser gobernada. |
| 7 | Cuando la turbina ya puede ser gobernada, la bomba eléctrica de lubricación se pasa de control manual a control automático. |
| 8 | Se abre por completo la válvula de admisión de vapor de la turbina. |
| 9 | Sabiendo que el eje de la turbina ya tiene una velocidad de 3 400 rpm y que la válvula de admisión de vapor se encuentra abierta en su totalidad, con el gobernador manual de la turbina, se empieza a subir a una velocidad de 3 600 rpm y teniendo una frecuencia de 60hz, en estos momentos la turbina de vapor se encuentra sincronizada. |

Fuente: elaboración propia.

2.13. Análisis de la sincronización del generador eléctrico Worthington

Ya sincronizada la turbina de vapor, se procede a la sincronización del generador eléctrico, porque hasta este momento no se está generando energía eléctrica a la salida del generador. Para sincronizar el generador se cierra el *breaker* de la excitatriz y por medio del reóstato de excitación se conseguirá elevar el voltaje a la salida del generador.

Hay que tomar en cuenta que no es solo de conectar físicamente el generador a la barra de 2,4KV, También es necesario necesario conocer los pasos que se utilizan para sincronizar (acoplar) un generador a la red eléctrica.

Hay que considerar bastante que los generadores no se acoplan en serie porque no presentan ningún interés práctico y además es inestable y peligroso. Por lo cual el turbogenerador que se estudia se acopla en paralelo a la red eléctrica.

- Condiciones para la sincronización (acoplamiento) de los generadores que se encuentran en paralelo.

Antes de efectuar el acoplamiento en paralelo de un generador con otro ya en servicio, es preciso estar seguros de que se cumplen las siguientes condiciones:

- Igualdad de las frecuencias.
- Igualdad de los valores eficaces de las f.e.m. (fuerza electromotriz)
- Igual en la sucesión de fases
- Maniobras de acoplamiento

El acoplamiento de un generador a la red exige la máxima atención por parte del o los operadores encargados de dicha operación.

Se pone en marcha el motor de corriente continua que acciona el generador y seguidamente se maniobra sobre el regulador de velocidad para conseguir que esta sea lo más aproximada posible a la velocidad síncrona correspondiente a la frecuencia de la red. Para comprobarlo se observa el frecuenciómetro conectado a los bornes del generador.

Se maniobra el reóstato que regula la intensidad de la corriente de excitación que recorre las bobinas inductoras hasta conseguir que la fuerza

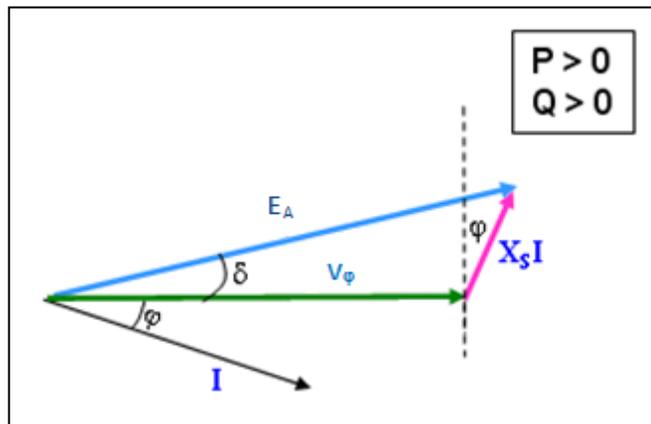
electromotriz generada en el bobinado inducido del generador (medida por su voltímetro) sea algo superior que la tensión de la red.

Es importante mencionar que al momento del acoplamiento del generador, este debe de tener un factor de potencia en atraso, en el cual la potencia total está dada por:

$$S=P + Q = \frac{EA V\varphi \text{SEN } \delta}{X_s} + j \frac{EA \text{COS } \delta - V\varphi^2}{X_s}$$

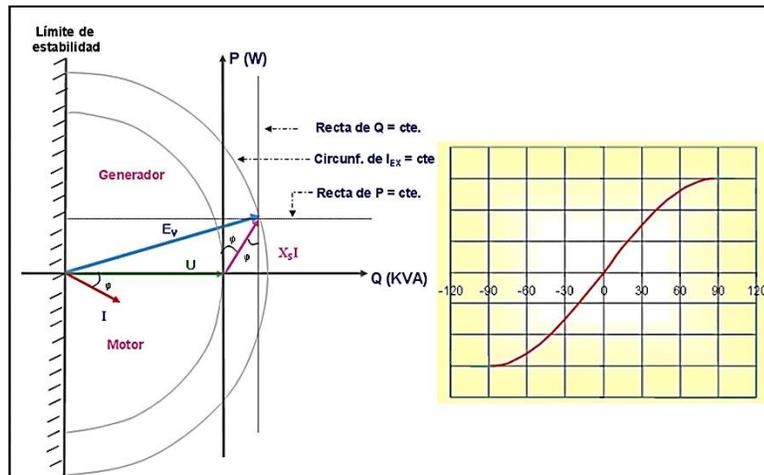
En donde la potencia reactiva esta dada por: $Q = \frac{EA \text{COS } \delta - V\varphi^2}{X_s}$ por lo tanto $EA \text{COS } \delta > V\varphi$ para que el generador pueda suministrar potencia reactiva al sistema y no actuar como un motor el cual consume energía de la red eléctrica.

Figura 25. **Diagrama fasorial del generador síncrono con factor de potencia en atraso**



Fuente: elaboración propia, con programa, con programa adobe Illustrator.

Figura 26. Diagrama de estabilidad del generador síncrono



Fuente: elaboración propia, con programa, Adobe Illustrator.

Efectuadas la maniobras anteriores, es preciso afinar la igualdad de frecuencias y tensiones, al mismo tiempo hay que observar el sincronoscopio. Después con la perilla de sincronismo, se cierra el *breaker* principal entre la barra y el turbogenerador. Cumpliendo con las maniobras anteriores el turbogenerador ya se encuentra aportando energía eléctrica a la red de 2,4 KV del sistema.

Todas las operaciones se realizan de forma manual en lo cual se pueden cometer varios errores al momento de la sincronización, los cuales pueden dañar físicamente al personal que realiza las maniobras, daños severos en todos los componentes del turbogenerador y también afectar la producción de la fábrica.

3. ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE UN TURBOGENERADOR DE VAPOR DE ESCAPE EN EL PROCESO DE UN INGENIO AZUCARERO

El tema de automatización proporcionará una visión más amplia de lo que puede ayudar esto a una industria azucarera, ya que se va a dar en la misma un proceso de mecanización de las actividades industriales, donde se simplificará el trabajo y así, el turbogenerador podrá ser gobernado de manera automática, lo que indica que se va dar un proceso más rápido y eficiente.

El objetivo de la automatización es llegar a fábricas totalmente automatizadas, mediante sistemas manufactureros integrados. Hasta ahora se han dado avances en la producción de equipos individuales o con sistemas parciales de integración.

3.1. Planificación de producción y control

Adoptadas las tecnologías en condiciones apropiadas, los aumentos de producción son muy significativos. El turbogenerador por sí solo, no asegura una mejor estabilidad y productividad, si no se las introduce con personal técnico adecuado, reorganización de la producción y control.

Para la productividad y estabilidad de la automatización en el turbogenerador de escape, se determinarán los siguientes tipos de automatización:

- Automatización rígida: la automatización tradicional o rígida se basa en equipos dedicados a producir bienes homogéneos.

El turbogenerador de escape en un ingenio azucarero debe contar con una automatización rígida, porque su propósito es utilizarlo para producir un trabajo final durante muchos años.

- Automatización flexible: es un conjunto de tecnologías basadas en la microelectrónica, que hacen posible el diseño y la fabricación de bienes relativamente heterogéneos en lotes pequeños y medianos. Este tipo de automatización permite modificar tareas sin cambiar equipos, introduciendo nuevas instrucciones en segundos.

Los principales componentes de la automatización flexible son: máquinas herramientas con control numérico computarizado (MHCN), robots, entre otros.

Se dan diferentes motivos para la adopción de las tecnologías de automatización de tipo flexible: algunos de estos motivos son: disminución de costos laborales y de trabajo calificado, calidad, reducción de tiempo de entrega, mejora de condiciones laborales.

3.2. El panorama global y la variable cambio tecnológico en el estudio prospectivo

Todas las carreras de ingeniería están inmersas en la tecnología, razón por la cual, haciendo una relación simple se puede decir, si la dinámica de cambio de la tecnología es intensa.

También se sabe, que el fenómeno de la globalización económica tiene su fuerza y fundamento en el desarrollo de la tecnología.

De hecho, los sistemas de Instrumentación, medición y automatización implementados en un turbogenerador, son herramientas fundamentales que el ingeniero utiliza para tener un control sobre el funcionamiento y variables que utiliza para mantener estable la operación de esta máquina eléctrica; se confirma la teoría, ya que actualmente casi todos los sistemas trabajan en base a microprocesadores, y están desplazando o modernizando a los sistemas basados en otras tecnología como la neumática, la electromecánica, y aún la electrónica de transistores.

3.3. Estrategias a nivel punto

Cuando se define o se plantean estrategias de control automático que responda a las necesidades establecidas para mantener un punto bajo de control se requiere definir las variables que se desean controlar, sus variables de manipulación y los valores de *set point* que deberá tomar.

Para el caso del turbogenerador en estudio, la variable es el vapor de escape, este es utilizado en los equipos de la fábrica, para lo cual se establece que su valor de *set point* debe ser un valor de 20 PSI a la salida de la turbina.

3.3.1. Selección de la variable de control

Para el caso del turbogenerador se desea tener un control automático que sea óptimo, ya que la variable de control se obtendrá de una forma directa, la cual se estará recibiendo de un instrumento instalado a la salida de vapor de escape y no será calculada a partir de otras mediciones. Se establece que,

cualquier forma que se obtenga la variable seleccionada, esta variable debe obtenerse con suficiente precisión para incorporarse al lazo de control y obtener una acción correcta.

Las variables de diseño de un proceso se calculan a partir de: ecuaciones de diseño, relaciones termodinámicas, balances de materia y energía. El rendimiento de un proceso depende del mantenimiento armónico de todas estas ecuaciones y por ello es lógico seleccionar la variable de control de entre las variables de diseño del proceso.

3.3.2. Selección de las variables de manipulación

Las variables de manipulación son aquellas cantidades que actúan en forma independiente en el sistema de control y pueden ser cambiadas por un control directo, las variables de manipulación deben ser las que tengan el mayor efecto sobre el proceso para alternar los puntos de ajuste.

3.3.3. Selección de los puntos de ajuste (*set point*)

Cuando se establece la variable base de control es necesario fijar los valores que deben tomar las otras variables para lograr el control deseado, estas variables y sus respectivos valores son los puntos de ajuste (*set point*) del sistema de control.

Debido a que la variable base de control puede ser medida en forma directa o calculada a través de otras mediciones, se puede no necesitar control supervisado, si la variable base es medida directamente, como se mencionó que será la del control del turbogenerador de escape, esta se vuelve un punto de ajuste y solo se necesita control directo, si la variable base es una cantidad

calculada, entonces es necesario definir un control supervisado que determine los mejores valores de los puntos de ajuste para lograr que la variable base de control se mantenga en su valor optimo.

Se debe tomar en cuenta que cuando se automatiza se incrementa la producción, por lo que se debe considerar no saturar el equipo a manipular pues esto hace que no se pueda controlar en esta situación.

3.3.4. Definición del sistema de control

Una vez realizado el análisis del funcionamiento del turbogenerador de escape, es conveniente hacer una definición clara de los alcances y objetivos que tendrá el sistema de control; se debe decidir el grado de robustez del sistema, la flexibilidad para adaptarse a cambios operativos, su confiabilidad ante situaciones de emergencia o condiciones extremas de operación. Un sistema de control nunca controla todo y siempre existe la necesidad de ser supervisado por el hombre; esto implica que, dentro de los alcances y objetivos del proyecto, se establezca el nivel de interacción que tiene el hombre con la máquina, esto redundará en una correcta selección o especificación de la interfaz hombre-máquina.

3.4. Estrategias a nivel del proceso

Cuando se automatiza un proceso, lo que se busca es desarrollar estrategias de control que permitan optimizar la producción mediante ahorro de energéticos y materias primas, incrementos en la vida útil de los equipos, estabilidad de proceso, sostenimiento de calidad de productos, eliminación o reducción de accidentes, disminución de fallas, desarrollo de programas de mantenimiento preventivo y a este conjunto de estrategias se le conoce como

control supervisado el cual se puede efectuar en forma manual o en forma automática.

3.4.1. Control supervisado manual

En este caso la información de proceso es asimilada por el personal encargado de elaborar reportes, los cuales a su vez son interpretados en forma personal por distintos individuos, quienes generan decisiones para orientar la producción hacia metas determinadas. Cabe señalar que la información de proceso bien puede hacerse obteniendo en forma completamente automática y que los reportes también hayan sido elaborados por un programa computacional, sin embargo, el esquema de control del turbogenerador de escape hasta este momento, se lleva a cabo en forma manual, en el sentido de que no es producido en forma automática, por una lógica computacional, sino que es resultado de las acciones de individuos que hacen juicios personales para tomar decisiones, estas decisiones son entonces implementadas en los sistemas de control de procesos de la planta para ser ejecutadas. Los formatos de las lecturas que se toman actualmente en el funcionamiento del turbogenerador de escape, se presentan en los apéndices 1 y 2.

3.4.2. Control supervisado automático

El control supervisado automático o control supervisado computarizado normalmente está basado en hacer cumplir una función que tiene como objetivo la optimización de las utilidades del turbogenerador de escape.

Cabe mencionar que el control supervisado computarizado no ejecuta las acciones de control sobre el proceso sino que determina el valor óptimo de los

puntos de ajuste (*set points*) que debe tener el turbogenerador de escape para que su funcionamiento se encuentre en el punto más estable de su operación.

3.4.3. Modelos de control supervisado automático

La mayoría de los sistemas de control supervisado automático tiene al menos uno de los siguientes tipos de modelos.

3.4.3.1. Modelos físicos

Estos se obtienen a partir de las relaciones matemáticas entre las variables de operación de un proceso, estas relaciones pueden ser expresiones que representen el camino de una reacción: balances de materia, balances de energía, consumos de materias primas o de energéticos para lograr una dada producción, relaciones de eficiencia de los equipos, tiempos y secuencias óptimas de arranques o paros.

Las expresiones matemáticas pueden ser de estado estable o dinámicas, los modelos físicos de estado estable para control supervisado se usan generalmente en plantas continuas, cuando se busca optimizar la producción en función de las variables de proceso, como lo es el caso del turbogenerador de escape que se está estudiando, los modelos dinámicos se usan en plantas intermitentes, en donde las secuencias de arranques, paros, o procesos productivos se deben efectuar bajo un determinado esquema para optimizar la producción.

3.4.3.2. Modelos empíricos del procedimiento

Estos modelos existen cuando la complejidad del proceso impide obtener un modelo físico y es necesario recurrir a la experiencia de operación para generar un modelo aproximado de comportamiento del funcionamiento del turbogenerador de escape, se busca vaciar en la computadora la experiencia de los operadores mas diestros, con el fin de producir un modelo de toma de decisiones que sea consistente y englobe la máxima experiencia de planta disponible, estos modelos están basados en dos tipos de técnicas: inteligencia artificial y sistemas expertos.

3.4.3.3. Modelos económicos

Estos modelos difieren de los modelos físicos en que los modelos económicos relacionan matemáticamente factores económicos en lugar de variables de proceso, los indicadores matemáticos más usados en estos modelos son los índices de desempeño y los indicadores de contribución.

Los índices de desempeño establecen cocientes entre lo que un proceso está costando o produciendo y lo que debería costar o producir, en este caso el modelo económico busca optimizar las variables del proceso para obtener índices de desempeño adecuados en cada parte del turbogenerador de escape, los indicadores de contribución son funciones que determinan la aportación al costo, o a las ganancias de la planta, de cada sección del proceso, el modelo de control supervisado busca optimizar la operación haciendo que los indicadores de contribución sean máximos o mínimos según convenga.

Para el caso del turbogenerador de escape, se estará utilizado un modelo físico, porque lo que se necesita son las relaciones matemáticas entre

las variables de operación, las cuales expresan el balance de vapor a la salida de la turbina, con lo cual es crítico y establece la eficiencia de los equipos instalados en la fábrica.

3.5. Estrategias a nivel de planta

Entre las industrias más importantes se encuentra la generación de energía eléctrica en los ingenios azucareros, cada una de ellas presenta diferentes problemas operativos y funcionales, lo que determina tipos y niveles de automatización.

En la industria de generación eléctrica los objetivos promediales son la seguridad y confiabilidad; por lo que es recomendable pensar en niveles de control que permitan la optimización, coordinación y diagnóstico de fallas en el proceso.

Los actuales estándares de funcionamiento y operación (seguridad, confiabilidad, disponibilidad y eficiencia) de las plantas industriales se han incrementado considerablemente, para satisfacer estos requerimientos se hace necesario un mejor y mayor nivel de automatización, al operar una planta sin contar con un nivel adecuado de automatización ocasiona la falta de competitividad en el mercado al desaprovechar energéticos, materias primas, recursos humanos y no contar con calidad sostenida en los productos finales.

La tecnología digital hizo su aparición en el área de instrumentación y control, facilita y amplía enormemente el nivel de automatización de los procesos sin embargo para la correcta implantación de estrategias de control, es importante contar con herramientas auxiliares tales como: programas para

identificación de procesos, simulación, sintonización de controles, control estadístico de procesos.

3.5.1. La automatización como herramienta competitiva

Se considera que el automatizar un proceso es hacer que ciertas operaciones rutinarias se efectúen en forma consistente bajo la acción de elementos mecánicos, eléctricos o computacionales, esto aun cuando puede representar la realidad de muchas plantas, es restringir considerablemente el potencial de uso de los sistemas de control modernos, en la actualidad todos los sistemas de control basan su eficiencia y versatilidad en el manejo ágil de la información que se genera en el proceso y que llega al sistema, todos los sistemas de control modernos usan bases de datos como su punto central de funcionamiento.

Esto lleva a considerar que el uso de un sistema de control puede extenderse más allá de la simple toma de decisiones para abrir o cerrar válvulas, mantener temperaturas o mover actuadores con fines específicos.

Un sistema de control contiene un banco de información de proceso el cual está siendo actualizado continuamente y al cual se tiene acceso fácil, si se usa esta información inteligentemente, se puede realizar la toma de decisiones operativas y administrativas de una manera más eficiente y confiable.

La automatización consiste en organizar, de una manera inteligente, cada flujo de información que exista en el turbogenerador de escape. El objetivo final de la automatización es dar a tiempo la información apropiada a quien toma decisiones en la planta donde se encuentra el turbogenerador de escape y asegurar que este pueda implementar sus acciones en forma eficiente. Bajo

esta definición es necesario considerar que la automatización debe ser llevada a cabo usando técnicas de ingeniería de control de procesos, para asegurar que los lazos de control automático se realizan adecuadamente, usando técnicas de informática, para aprovechar el potencial total del sistema de control.

3.5.2. Entendimiento del proceso

Para automatizar un turbogenerador de escape es indispensable, primero entender que un 50 % del beneficio obtenido en una automatización proviene del análisis funcional inicial del proceso, y el 50 % restante es obtenido por el hecho de llevar a cabo los resultados de este análisis funcional con equipo de control moderno.

Es importante mencionar que entender un proceso no significa solamente saber que variable responde ante cualquier cambio, sino también es necesario saber como ocurre este cambio, esto permite considerar que es necesario hacer un estudio técnico de una situación, para entenderla correctamente y sobre esta base plantear la automatización.

3.5.3. Definición del diagrama de información de la planta

Hay que considerar que automatizar un proceso usando un sistema de información ineficiente, usualmente produce un proceso que hace cosas ineficientes, pero muy rápido, esto indica que es necesario hacer un análisis estructurado de las necesidades de información de cada sección del proceso, para definir correctamente qué, cómo y a quién le debe llegar la información. Una vez definidas estas necesidades, se puede proceder a estructurar el diagrama de flujos de información del proceso, para realizar la automatización,

mientras no se tenga un diagrama de información, será muy probablemente ineficiente y los beneficios esperados no se obtendrán.

3.5.4. Integración de objetivos

Es importante integrar los objetivos de la automatización con los de la empresa, para ello se definirá el costo y tiempo de retorno de la inversión en los equipos para la automatización del turbogenerador de escape a corto mediano y largo plazo.

3.5.5. Rentabilidad de la automatización

El beneficio de una automatización debe verse cuantitativamente, y más allá de consideraciones subjetivas como apoyo a la competitividad y modernización. La rentabilidad de una automatización debe cuantificarse y se deben establecer los beneficios económicos que se obtendrán de ella, para esto se realiza un estudio tecnoeconómico para la implementación de esta automatización en el turbogenerador de escape, en el cual se define claramente el objetivo de la automatización.

En estudios de inversión se ha podido determinar que la calidad sostenida incrementa de manera directa la rentabilidad de un proceso, la razón de esto es que, para sostener la calidad a lo largo de un proceso productivo, es necesario reducir la variabilidad en cada punto del proceso. Esto trae consigo una disminución en reprocesamientos, desperdicios de energía y materiales, tiempos de entrega, rechazos. En estos casos resulta evidente que una automatización es, no solo conveniente y necesaria, sino mandataria para lograr el objetivo, la cuantificación del beneficio es fácilmente loggable mediante

un análisis estadístico de las variaciones actuales y del potencial de planta existente.

Otro caso en el cual una automatización es fácilmente justificable económicamente es la reducción en el consumo de energéticos de una planta.

Es necesario mencionar que en algunos casos el beneficio de la automatización es difícil de determinar numéricamente, porque afecta aspectos como pérdida de competitividad o permanencia en un sector del mercado. En estos casos, sin embargo, debe buscarse de manera cuantitativa el impacto de la automatización para determinar en base a hechos su conveniencia.

En términos generales puede decirse que un sistema de control automático a nivel planta puede justificarse en plantas que presenten las siguientes características:

- Plantas con grandes producciones: en estos casos el solo manejo acertado de los inventarios es razón suficiente para justificar la automatización a nivel planta.
- Plantas muy complejas: en estas plantas es muy difícil para el personal de operación asimilar todos los factores que hay que conjugar para operar la planta en su punto más rentable. Por otra parte estos factores pueden cambiar diariamente, lo cual hace la búsqueda combinacional sumamente compleja.
- Plantas sujetas a perturbaciones frecuentes: aun cuando los lazos de control de las variables de proceso pueden compensar algunas de estas perturbaciones, ciertos cambios externos, tales como: cambios en las

composiciones de las materias primas, alteraciones en la composición o calidad de los energéticos, variaciones en los precios de los productos y materias primas, y en general, todas aquellas perturbaciones externas a la planta, no pueden ser compensadas por los lazos de control, en estos casos la única opción es una estrategia de control a nivel planta.

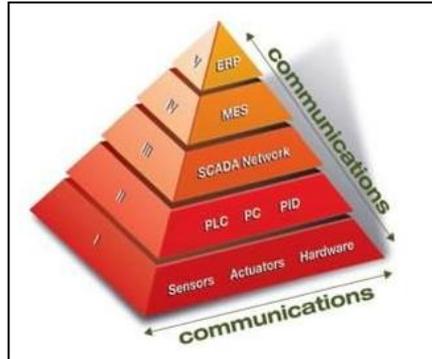
4. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO EN UN TURBOGENERADOR DE VAPOR DE ESCAPE DE 4 MW, EN EL PROCESO DE UN INGENIO AZUCARERO

4.1. Plan de implementación

La automatización se debe planear de arriba hacia abajo, pero se debe implementar de abajo hacia arriba, se debe definir primero el diagrama de información, estableciendo jerarquías o niveles de calidad de la información, frecuencias, formatos. Después es necesario estructurar el mejor sistema. Se debe empezar desde los sensores y elementos primarios, hasta la computadora final.

Cuando se habla de automatización, y para representar los distintos niveles de automatización que se van a implementar en la automatización del turbogenerador de vapor de escape, se recurre a la figura siguiente:

Figura 27. **Pirámide de automatización industrial**



Fuente: Colegihogar. <http://www.colegihogarcaixanova.com/blog/?cat=3>. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

4.2. Estandarización del equipo

Como se desea implementar una red de control para el turbogenerador de escape de 4 MW, se deben asegurar estándares para la instrumentación, los sistemas de control y los sistemas computacionales. En la tabla VII, se tienen los estándares de comunicación utilizados para la automatización.

Tabla VII. **Estándares de comunicación en serie**

| Comunicación en serie de interconexión entre equipos electrónicos utilizados para la automatización del turbogenerador | | | | | |
|---|-------|-------|--------|----------|--------|
| RS232 | RS422 | RS485 | 4-20mA | Ethernet | Modbus |

Fuente: elaboración propia.

- Fabricantes de equipos de automatización ver anexo 1
- Estándares de comunicación ver anexo 2

- Comparación entre buses y protocolos ver anexo 3

El lazo de corriente de 4-20mA se utiliza para las comunicaciones entre equipos industriales. De hecho es enviar una señal analógica a través de un lazo de corriente con un par de cables trenzados.

4.3. Análisis del proceso

Para la implementación del sistema de control del turbogenerador de escape de 4 MW, lo primero que se busca es la automatización de lo que se tiene funcionando.

Para este análisis en el proceso se deben establecer claramente las bases o leyes físicas, químicas, termodinámicas, eléctricas, bajo las cuales se rige el funcionamiento del turbogenerador. Esto quiere decir que se va a estudiar el funcionamiento desde su punto de vista técnico ingenieril para entender las bases en que se fundamenta. El resultado de este análisis será un entendimiento sólido del porqué ocurren las cosas y permitirá una comprensión global y profunda de lo que se quiere controlar. Siguiendo la premisa de que es imposible controlar adecuadamente lo que no se conoce certeramente, el análisis de proceso es una herramienta fundamental y es el inicio de una correcta estructuración de cualquier sistema de control.

Es por ello que se enfatiza el realizar un análisis técnico, tanto cualitativo como cuantitativo, del funcionamiento del turbogenerador que se pretende automatizar. Esto, aunado a la experiencia acumulada en la planta de operación del turbogenerador, permitirá que se determinen las mejores variables de control, sus respectivas variables de manipulación, los valores

correctos y alcanzables de los *set-points*, las estrategias de control correctas y, en general, todo lo que rodea a la definición de un sistema de control.

En la tabla VIII, se representan las lecturas de las variables que se tienen actualmente de forma manual en la operación del turbogenerador Worthington de 4 MW; y en la tabla VIII, se representan las variables propuestas para tener una lectura de forma automática.

Tabla VIII. **Mediciones actuales en el turbogenerador de escape de 4 MW**

| Variables medibles y controlables en el funcionamiento actual del turbogenerador de escape de 4 MW | |
|---|-----------------|
| Descripción | Unidades |
| Presión de vapor de admisión de la turbina | PSI |
| Presión de vapor de escape de la turbina | PSI |
| Presión de aceite del gobernador Woodward UG-32 manual, de la turbina de vapor. | PSI |
| Presión de aceite en las chumaceras del turbogenerador | PSI |
| Temperaturas de aceite en las chumaceras del turbogenerador | °F |
| Voltaje de barra de 2,4 Kv | V ac |
| Amperaje del turbogenerador | A ac |
| Frecuencia | HZ |
| Factor de potencia | cosφ |
| Revoluciones por minuto | RPM |
| Generación de energía eléctrica | KW |
| Voltaje de excitación | V dc |
| Amperaje de excitación | A dc |
| Presión de vapor de admisión de la turbina | PSI |
| Temperatura de vapor de admisión de la turbina | °F |
| Presión de vapor de escape de la turbina | PSI |
| Temperatura de vapor de escape de la turbina | PSI |
| Presión de aceite del actuador Woodward UG-40 de la turbina de vapor | PSI |
| Presión de aceite en la chumaceras del turbogenerador | PSI |
| Temperatura de aceite en las chumaceras del turbogenerador | °F |
| Temperatura de agua a la entrada del enfriador de la lubricación del turbogenerador. | °F |
| Temperatura de aceite a la salida del enfriador de la lubricación del turbogenerador. | °F |
| Amperaje del motor de la bomba del tanque de lubricación del turbogenerador. | A ac |

Continuación de la tabla VIII.

| | |
|--|----------|
| Amperaje del motor de la bomba del tanque de lubricación del turbogenerador. | A dc |
| Posición axial del eje del turbogenerador | mil/pulg |
| Temperatura de agua a la entrada del enfriador del generador eléctrico | °F |
| Voltaje de barra 2,4 Kv | V ac |
| Amperaje del turbogenerador | A ac |
| frecuencia | HZ |
| Factor de potencia | cosφ |
| Revoluciones por minuto | RPM |
| Temperatura de embobinado del generador eléctrico | Ω |
| Generación de energía eléctrica | KW |
| Voltaje de excitación | V dc |

Fuente: elaboración propia.

4.4. Sistema de control

Ya teniendo el análisis de las variables que se van a controlar en el funcionamiento del turbogenerador es conveniente hacer una definición clara de los alcances y objetivos que tendrá el sistema de control. Se debe decidir el grado de robustez del sistema, la flexibilidad para adaptarse a cambios operativos, su confiabilidad ante situaciones de emergencia o condiciones extremas de operación.

Es importante hacer notar que un sistema de control nunca controla todo y siempre existe la necesidad de ser supervisado por el hombre, esto implica que dentro de los alcances y objetivos del proyecto de automatizar el turbogenerador de escape de 4 MW, se debe establecer el nivel de intersección que tenga el hombre con la máquina. Esto redundará en una correcta selección o especificación de la interfaz hombre-máquina.

4.4.1. Diagrama básico de control

En base al análisis del proceso y a los alcances y objetivos establecidos para el sistema de control, es necesario definir estrategias de control a nivel punto, a nivel sistema y, se pretende implementar un control supervisado automático. El planteamiento de estrategias debe iniciarse a nivel punto, estableciendo los lazos de control (lazos simples, cascadas, desacoplados) y funciones de control lógico, adecuados para controlar cada variable del proceso.

- Esquema actual de enfriamiento del generador eléctrico: ver apéndice 3.
- Esquema actual de enfriamiento de la lubricación del turbogenerador de escape: ver apéndice 4.
- Esquema actual de extracción de vapor de sellos de la turbina: ver apéndice 5.
- Esquema actual de la lubricación de aceite del turbogenerador de escape de 4 MW: ver apéndice 6.
- Esquema propuesto de instrumentación para automatizar la lubricación del turbogenerador de escape de vapor de 4 MW: ver apéndice 7.

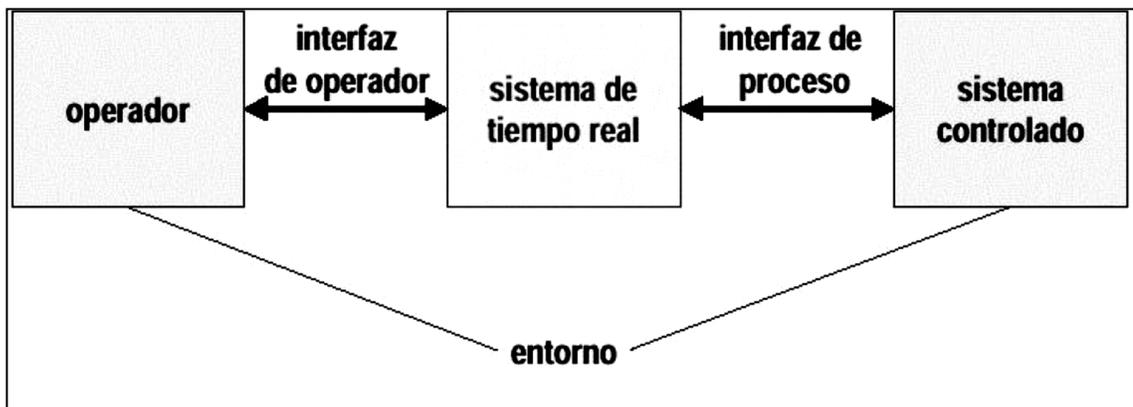
Típicamente en estos diagramas se asigna una numeración secuenciada para identificar cada pieza de equipo existente en el funcionamiento del turbogenerador de escape de 4 MW.

4.4.2. Interfaz hombre-máquina

Una parte importante de la estructuración de un sistema de control es la definición de cómo debe interactuar el sistema con el operador. Habiendo definido las necesidades funcionales del sistema, queda la tarea de estructurar

la forma en que el usuario u operador interactúa con el sistema. En la figura 28, se representa como el operador interactúa con el sistema controlado.

Figura 28. Interfaz hombre máquina



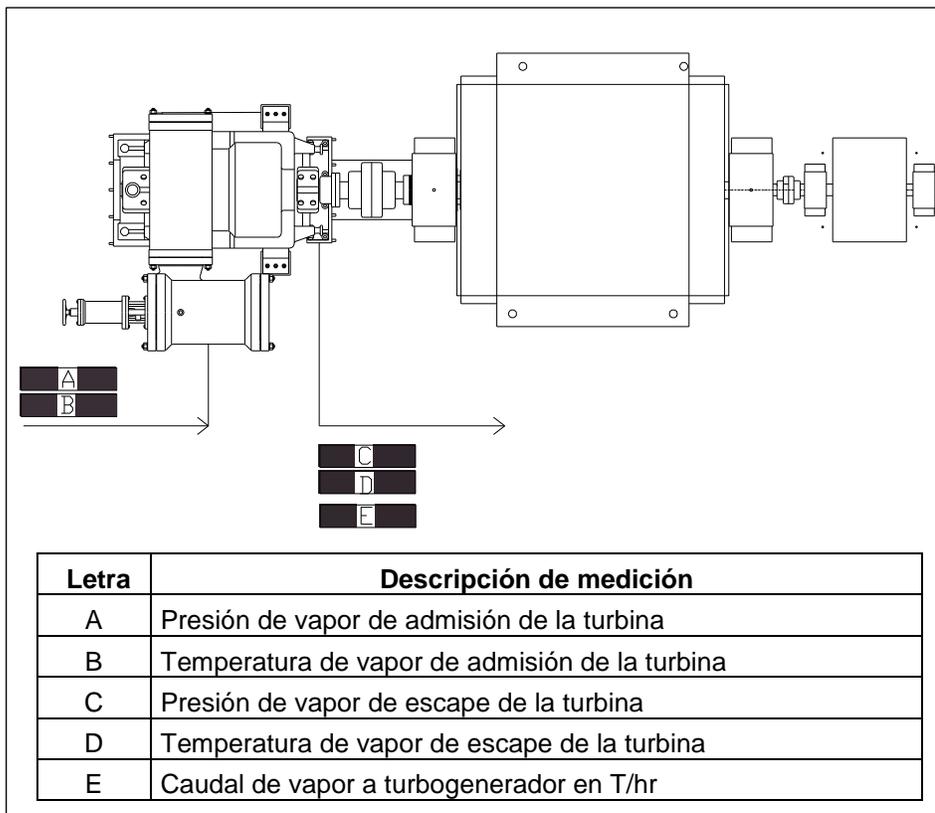
Fuente: elaboración propia.

En los sistemas de controles modernos la interfaz hombre-máquina está constituida por una pantalla de rayos catódicos (CRT), en la cual se presenta la información del funcionamiento del turbogenerador de escape de 4 MW de una manera ordenada. Algunos sistemas presentan la información en una forma predeterminada, dejando al usuario únicamente la tarea de especificar qué variables desea presentar. En otros casos el usuario puede especificar la forma en que desea que se presente la información en pantalla, quedándole al usuario la tarea de organizar la presentación de la información.

Para la propuesta de automatización del turbogenerador de escape de 4 MW, la información se presentará en una pantalla de computadora, donde se presentará el funcionamiento del turbogenerador desglosado en 4 pantallas de forma ordenada, siendo estas representaciones de circuito de vapor, lecturas de

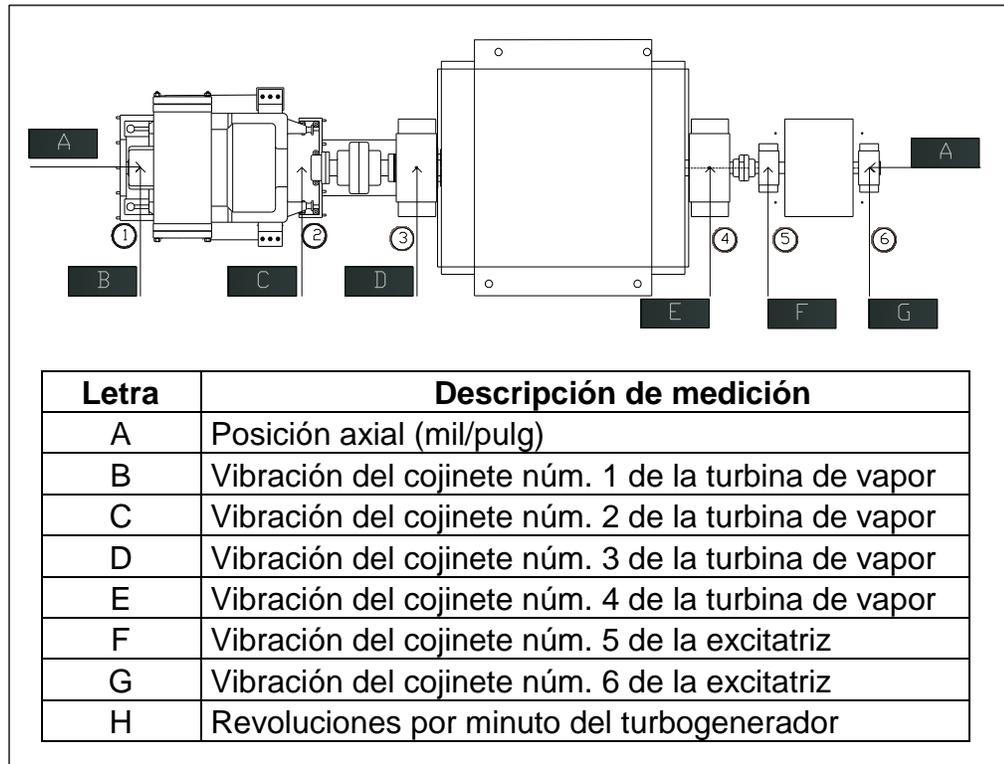
vibraciones, circuito de lubricación y temperaturas del generador eléctrico, las cuales se representan en las figuras 29, 30, 31 y 32, respectivamente.

Figura 29. **Esquema propuesto de lecturas del circuito de vapor del turbogenerador de escape de 4 MW**



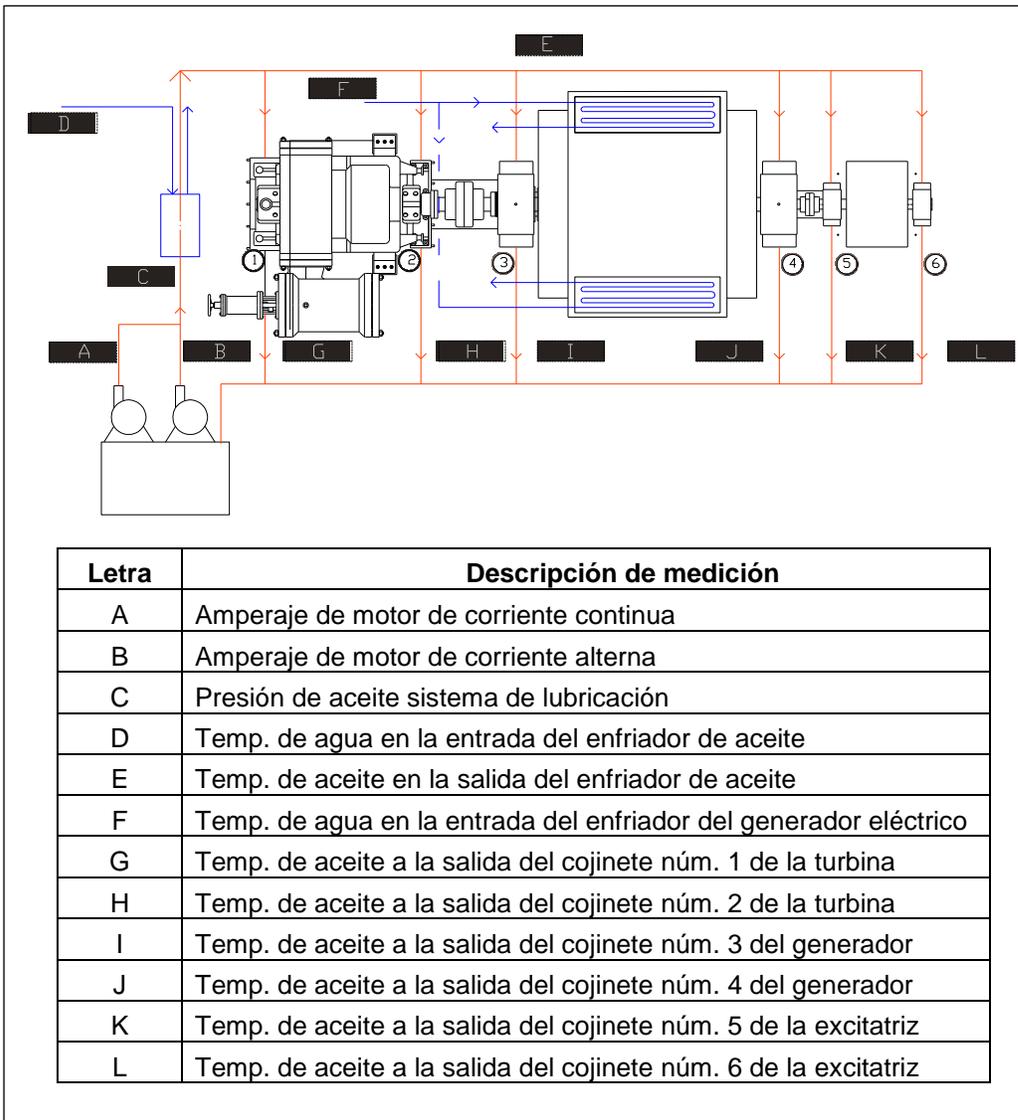
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Esquema propuesto de lecturas de vibraciones del turbogenerador de escape de vapor de 4 MW**



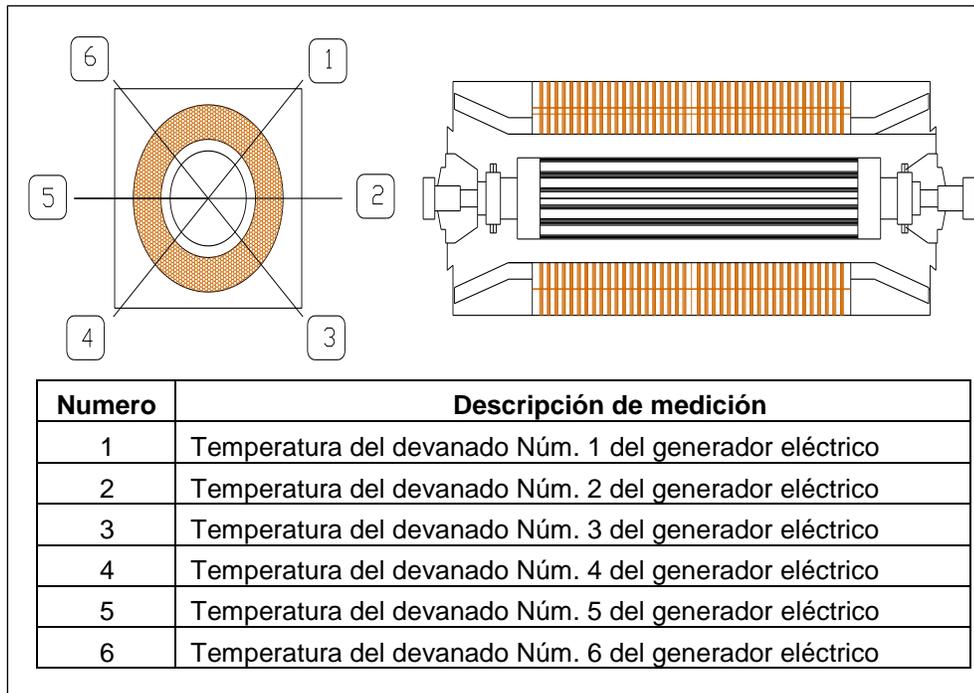
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Esquema propuesto de lecturas de lubricación del turbogenerador de escape de 4 MW



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Esquema propuesto de lecturas de temperatura del generador eléctrico**

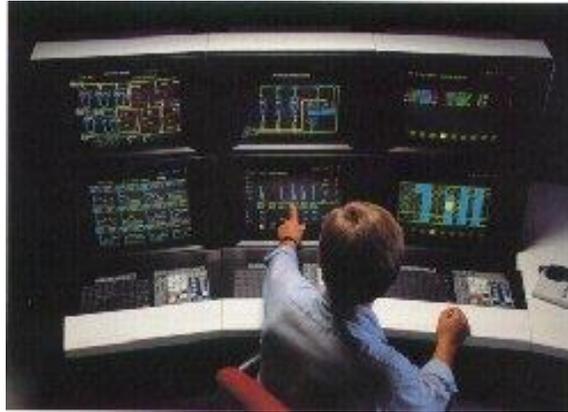


Fuente: elaboración propia.

4.4.3. Informática del proceso

El sistema operativo de la computadora se encarga de gestionar los procesos. Este software administra las instrucciones que otros programas informáticos destinan al microprocesador, analiza el estado de ejecución y organiza la memoria dedicada a las tareas.

Figura 33. **Panel de control de un proceso automatizado**

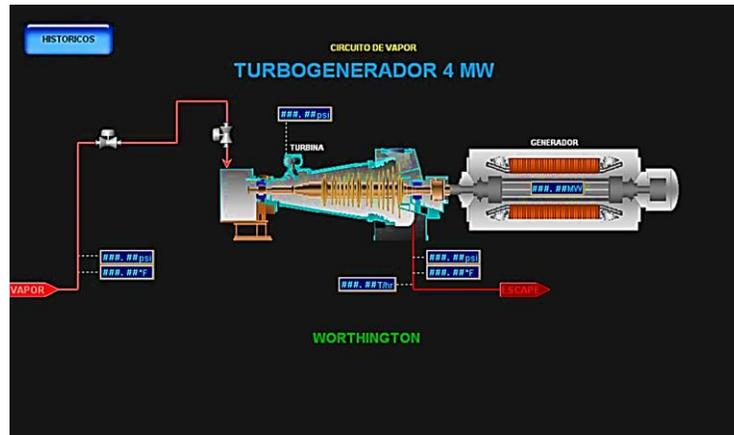


Fuente: Ingenio Santa Ana.

Para la automatización el turbogenerador de escape de 4 MW, se propone observar, desde una pantalla de computadora, las variables generales más importantes del funcionamiento del turbogenerador, pantalla con estaciones manual/automático e históricas de valores selectos.

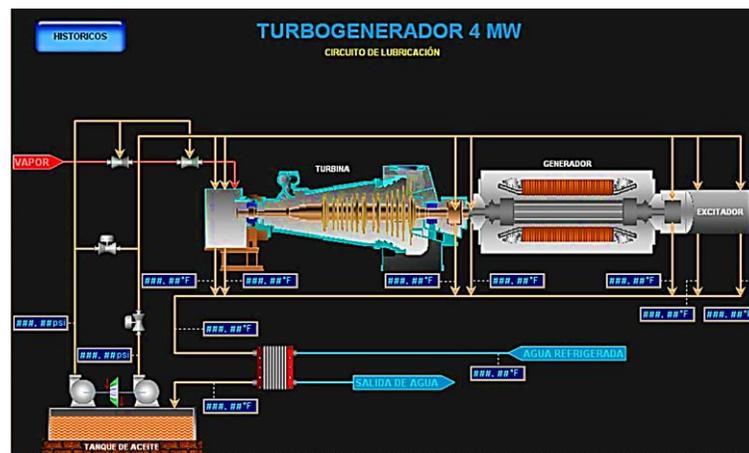
En las figuras 34, 35, 36 y 37, se tienen las pantallas propuestas para el control del turbogenerador de escape de 4 MW en un Ingenio azucarero, utilizando FactoryTalk Studio-Site Edition de Rockwell.

Figura 34. Pantalla propuesta del circuito de vapor



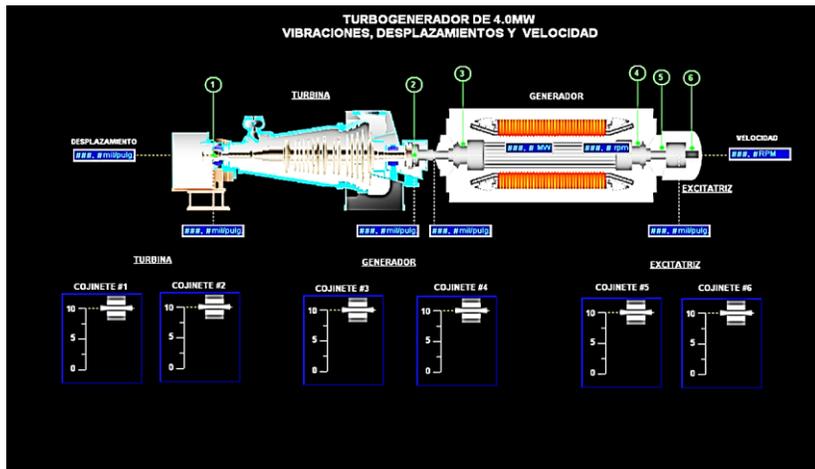
Fuente: elaboración propia, con programa, AutoCAD.

Figura 35. Pantalla propuesta del circuito de lubricación



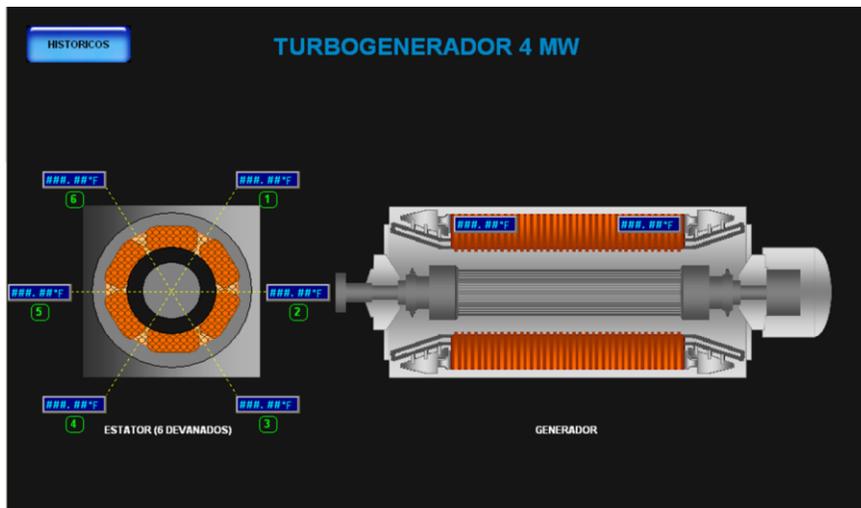
Fuente: elaboración propia con programa AutoCAD.

Figura 36. Pantalla propuesta de medición de vibraciones, desplazamientos y velocidad



Fuente: elaboración propia con programa AutoCAD.

Figura 37. Pantalla propuesta de medición de temperatura del generador Worthington



Fuente: elaboración propia con programa AutoCAD.

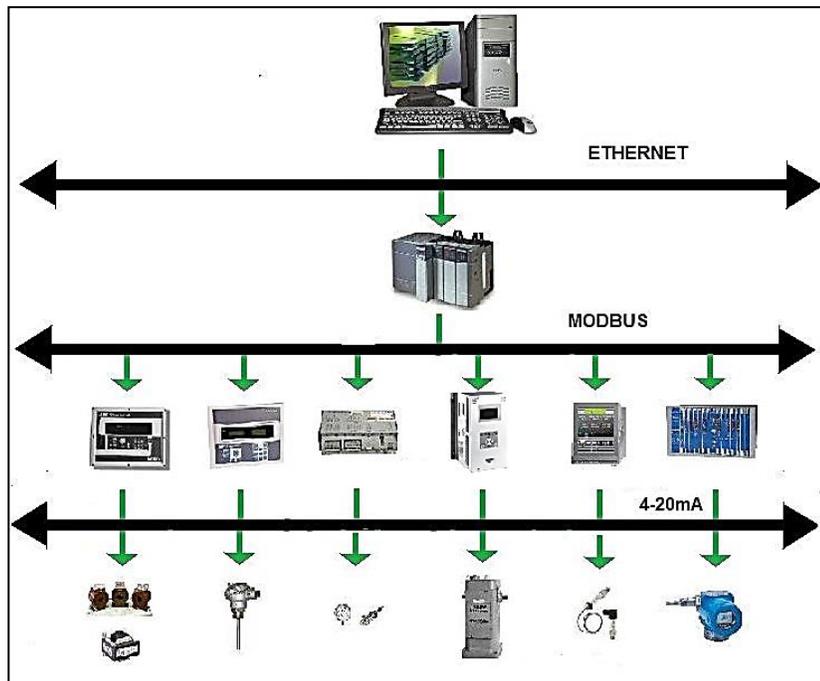
4.4.3.1. Estructuración de la red de comunicación para automatización del turbogenerador de escape de 4 MW

En este punto se definen los niveles de información de los protocolos de comunicación necesarios para hacer llegar la información. Los primeros se refieren a la jerarquización y clasificación de la información de proceso; los segundos a la forma en que la información debe presentarse.

Los niveles de información de proceso deben establecerse en función de las necesidades de cada persona o grupo de personas que demandan dicha información. Así, el gerente puede necesitar únicamente información económica de costos de producción y generación eléctrica, movimientos de inventarios, tendencias en la producción. El ingeniero encargado puede necesitar información concerniente a costos energéticos en cada sección del proceso, cantidades producidas en cada turno, paros de planta, niveles de inventarios, a su vez el ingeniero del proceso necesita la información detallada de qué está pasando en el proceso.

La frecuencia con la cual se genera la información está también relacionada con el nivel jerárquico al cual se desea enviar la información. El gerente puede satisfacer sus necesidades con un informe impreso cada día, el ingeniero encargado puede necesitar un informe impreso por turno; el responsable de la operación del turbogenerador, un resumen impreso del comportamiento de ciertas variables, y a su vez necesita acceder a una pantalla para ver todos los puntos del proceso en cualquier momento. En la figura 38 se representa la estructura de la red de comunicación propuesta, para la automatización del turbogenerador Worthington de 4 MW.

Figura 38. **Estructura de comunicación propuesta para automatizar el turbogenerador Worthington de 4 MW en un ingenio azucarero**



Fuente: elaboración propia, con programa de Adobe Illustrator.

4.4.4. Selección del equipo de control

Como ya se encuentran definidas las características funcionales y las necesidades de la informática del proceso, es necesario seleccionar el equipo para trabajar lo que se pretende. En este caso, las opciones tienden a ser muy variadas y es fácil perderse en un mar de posibilidades y fabricantes de equipo. Para la selección de un equipo adecuado se verifica que cada proveedor de equipo entienda las necesidades de qué se desea controlar en el funcionamiento del turbogenerador de escape de 4 MW y, por otro lado, se verifica que el proveedor ofrezca el equipo adecuado.

4.4.4.1. Controlador de la velocidad de la turbina de vapor

El control de velocidad de la turbina de vapor Woodward 505 es un microprocesador utilizado para el control de velocidad de la turbina de vapor. Está diseñado para funcionar con turbinas de vapor de todos los tamaños. Asimismo, para operar turbinas de vapor utilizando uno o dos actuadores para impulsar las entradas de las válvulas de vapor. Los controles digitales son programables. El 505 puede configurarse para funcionar como unidad o en conjunto con una planta de sistema de control distribuido.

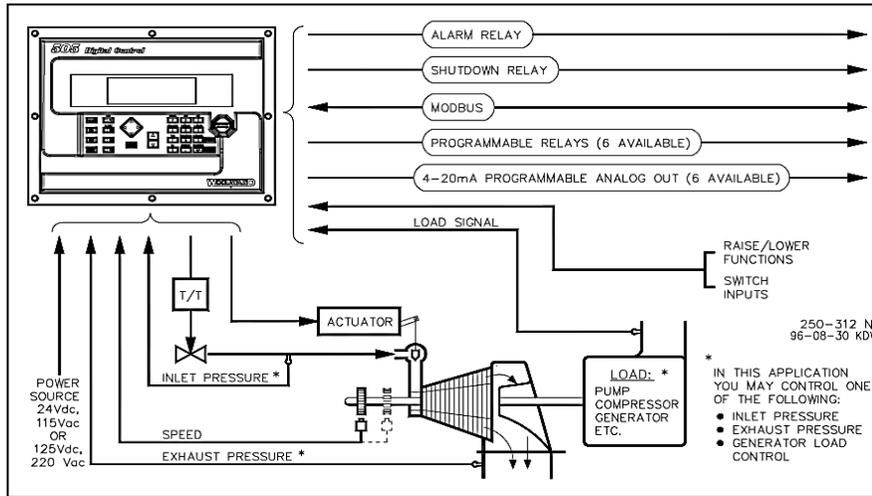
El 505 es un campo configurable de control de la turbina de vapor para el control del operador. Tiene un amplio panel de control que incluye la pantalla, y un conjunto de teclas que se encuentran en la parte frontal para realizar ajustes en el programa de línea, y el funcionamiento del sistema de la turbina de vapor. En la figura 39, se presenta la forma del microprocesador 505 que se propone para el control de la turbina Worthington. En la figura 40 se muestra la forma de interactuar el microprocesador 505 con la turbina de vapor.

Figura 39. **Microprocesador 505 para el control digital de la turbina Worthington**



Fuente: General Electric. Manual 85017V1. *505 Digital Governor for Steam Turbines*. (Rev. B).

Figura 40. **Control de la válvula de vapor de la turbina**



Fuente: General Electric. Manual 85017V1 505 Digital Governor for Steam Turbines. (Revisión B). p. 5.

4.4.4.1.1. SPC (controlador de posición)

Es un controlador que posiciona al servomotor, el cual gobierna al actuador UG-40 de la turbina de vapor. Esta servoválvula es controlada por un sistema que maneja señales de 4-20mA que indica la posición de control de la válvula, que puede ser ajustada por los parámetros a través de un ordenador personal. El diagrama de conexiones del SPC se puede observar en el anexo 4.

En la figura 41 se presenta la forma del SPC de marca Woodward el cual se propone para poder controlar el actuador UG40. Este SPC será monitoreado por el microprocesador 505 de control de la turbina Worthington.

Figura 41. **SPC (control de posición)**



Fuente: Manual 26236 (Rev. H). *Woodward Installation and Operation SPC Servo Position Controller*. p. 1.

4.4.4.2. **Control de carga**

El microprocesador Woodward EGCP-3 LS es un controlador de carga (activa y reactiva, sincronizador automático y repartidor de carga proporcional con otros generadores, que también usen EGCP-3 LS).

El EGCP-3 LS es un microprocesador utilizado para el control automático del funcionamiento correcto del generador eléctrico. El LS se puede operar solo o en red, junto con otras unidades EGCP-3 LS. Las interacciones del EGCP-3 LS se pueden observar en el anexo 5. El EGCP-3 LS cuenta con:

- Control y protecciones
 - Secuencia configurable al inicio
 - Monitoreo de presión de aceite (de circulación/disponible)
 - Control de la temperatura del refrigerante

- Control de la tensión de la batería
- Protección del exceso de velocidad
- Capacidad de control
 - Interruptor/contactador de sincronización de tiempo de espera en caso de alarmas.
 - Interruptor/contactador para señalización de las alarmas de bobina de disparo.
 - Falta de coincidencia de rotación de fase.
 - Detección de alarmas de error en la red de comunicación.
 - Velocidad/desfase de frecuencia.

En la figura 42 se presenta la forma del EGCP-3 LS de marca Woodward el cual se propone para poder controlar la carga eléctrica del generador Worthington.

Figura 42. **Controlador de carga EGCP-3 LS**



Fuente: Manual 85018V1 (Rev. B). *Woodward Installation and Operation 505E Digital Governor for Extraction Steam Turbines*. Volume 1. p. 1.

4.4.4.2.1. Regulador de voltaje automático (AVR)

El microprocesador DECS-200 es un sistema de control de excitación. Contiene toda la funcionalidad necesaria para limitar, controlar y proteger a un generador del funcionamiento fuera de la capacidad normal de la máquina.

El DECS-200 es un sistema de control de excitación para controlar la tensión de salida, VAR o el factor de potencia del generador síncrono y también, para modificar y controlar la cantidad de excitación de corriente continua aplicada al campo de excitación del generador eléctrico. El DECS-200 es adecuado para adaptarse a cualquier tamaño de generador eléctrico.

El diagrama típico de las conexiones del DECS-200 se puede observar en el anexo 6. En la figura 43 se presenta la forma del regulador de voltaje automático, el cual se propone para controlar y proteger la excitación del generador eléctrico Worthington.

Figura 43. **Regulador de voltaje automático DECS-200**



Fuente: BALER ELECTRIC. DECS-200 Digital Excitation Control System. Request Publication 9360100990. ILLINOIS, U.S.A. p. 1.

4.4.4.3. Actuador Woodward UG-40

El actuador UG-40 se utiliza en las turbinas de vapor para reemplazar a los gobernadores de tipo UG32 o UG40. Como se describió en el capítulo 2, actualmente el actuador de turbina de vapor, es completamente manual, por lo que se buscó la opción de un actuador que tuviese la misma base para no tener problemas de montaje, el actuador UG-40, proporcionando las ventajas del control electrónico y sistemas de intercambio de carga con la conveniencia de un UG40 existente.

El actuador UG40 convierte una determinada señal de entrada eléctrica a una proporcional salida hidráulica. El actuador permite la fuerza para controles analógicos y digitales Woodward.

Está construido con el mismo tipo de material que los gobernadores de la serie UG. La bomba de aceite está diseñada para proporcionar una larga vida con un mínimo mantenimiento. El actuador propuesto es estándar y utiliza los mismos ejes de salida, la palanca de accionamiento, la fuerza de los pistones, y los enlaces del pistón. La base se ajusta para cualquier unidad diseñada para un gobernador UG. Los procedimientos de mantenimiento son similares a los que necesita un gobernador UG40.

La señal eléctrica de 0 ± 60 mA es proporcionada por el controlador de posición (SPC), que a su vez es gobernado por el controlador de velocidad de la turbina de vapor (505). Se utiliza una señal de 0 ± 60 mA para controlar en posiciones mucho más cortas, la posición de las levas que permiten el ingreso del flujo de vapor en la turbina.

Las dimensiones del actuador propuesto Woodward UG-40, se pueden observar en el anexo 7. En la figura 44 se presenta la forma del actuador Woodward UG-40, el cual se propone para reemplazar el gobernador manual que se tiene actualmente en la turbina de vapor Worthington.

Hay que tomar en cuenta que el tiempo muerto de un actuador es de milisegundos. por lo que se facilita un control de velocidad muy fino en comparación con un gobernador neumático.

Figura 44. **Actuador Woodward UG40**



Fuente: Technical Manual Woodward 37515. p. 5.

4.4.4.4. Protecciones eléctricas

Las protecciones eléctricas son de mucha importancia para la seguridad del generador eléctrico que compone al turbogenerador Worthington, como también, para la persona encargada de su operación. Si ocurre una falla y las protecciones eléctricas no están funcionando correctamente, se puede dañar la

máquina y también ocasionar daños humanos. Por lo cual se propone instalar un relevador multilin SR 489.

El microprocesador propuesto EGCP LS-3 cuenta con las protecciones para el generador eléctrico, pero, como se sabe, todos los equipos no son perfectos, y a la hora de ocurrir un desperfecto del equipo, el generador eléctrico se quedaría sin protecciones, es por ello que se propone un relevador multilin SR 489 que cumple con las características de protección para el generador eléctrico, también este relevador cuenta con entradas para RTD's que pueden ser utilizadas para mediciones de temperatura en diferentes puntos del turbogenerador. En la figura 45 se presenta la forma del relevador multilin SR 489, el cual se propone para protección del generador eléctrico Worthington.

Figura 45. Descripción el relevador multilin SR489



Fuente: Manual de Instrucciones relé de protección SR489. p. 7.

Este relevador está diseñado para la protección de generadores síncronos y de inducción. Las características de este relevador, además de protección de los generadores, permiten obtener un registro de los eventos que ocurren, por medio de la computadora se puede realizar los cambios necesarios en los ajustes de protección. Los rangos de ajustes de protección son más amplios, y ellos pueden realizar mediciones de tensión, corriente, potencia instantánea, energía entregada por el generador, protección de temperatura del rotor y estator. En el anexo 8 se presenta el diagrama unifilar del relevador donde se muestran las protecciones para las cuales está diseñado.

Hay que tomar en cuenta que las curvas de protección del relevador multifunciones cumplen con las normas ANSI, IEEE y NEMA. Y que también presenta ventajas sobre los relevadores de estado sólido, especialmente en el bajo costo de mantenimiento, el cual se toma en consideración, para proponer la instalación del mismo en dicho proyecto.

Tabla IX. **Listado de temperaturas y parámetros de operación del relevador que pueden programarse en el relevador SR489**

| | Nombre | Alarma °C | Disparo °C |
|-------|-----------------------|------------------|-------------------|
| RTD 1 | Cojinete trasero | 90 | 98 |
| RTD 2 | Cojinete delantero | 90 | 98 |
| RTD 3 | Estator fase A | 110 | 120 |
| RTD 4 | Estator fase B | 110 | 120 |
| RTD 5 | Estator fase C | 110 | 120 |
| RTD 6 | Aceite de lubricación | 87 | 92 |
| RTD 7 | Agua de enfriamiento | 95 | 100 |

Fuente: Manual de instrucciones relé de protección SR489.

Las terminales eléctricas físicas de conexión del relevador; SR489 ver anexo 9.

- Descripción del protocolo de comunicación

La información almacenada en el SR489 está agrupada como ajustes y valores actuales. Los puntos de ajuste solo pueden ser leídos y escritos por una computadora maestra. Los valores actuales solo pueden ser leídos.

El 489 contiene un área de mapa de memoria definida por el usuario, esta área le permite el remapeo de la direcciones de los valores actuales y registros de puntos de ajuste, para adaptarlo a un SCADA con varios elementos de comunicación. Para los detalles del cableado del SR489 ver anexo 10.

- RTD'S

El SR 489 puede controlar hasta 12 entradas de RTD's para el estator, y también para el control de otras temperaturas. El tipo de cada una de RTD son programables como: 100 Ω Platino, 100 Ω de níquel, 120 Ω níquel, cobre o 10 Ω . RTD debe de tres hilos. Para el cableado de las RTD's hacia el SR489 ver anexo (11).

4.4.4.5. Protecciones mecánicas

Protege al transformador contra todo efecto producido en el interior de la cuba del mismo. Se basa en el hecho de que las irregularidades en el funcionamiento de los transformadores dan lugar a calentamientos locales en los arrollamientos y consiguientemente a la producción de gases de aceite cuya

cantidad y rapidez en su desarrollo crecen sensiblemente a medida que se extiende la avería.

4.4.4.5.1. Protecciones de vibraciones

El funcionamiento actual del turbogenerador de vapor de escape, no cuenta con un sistema que aporte información sobre las vibraciones mecánicas que puedan existir en el funcionamiento incorrecto del turbogenerador. Tomando en cuenta esto, es de suma importancia contar con un sistema que monitoree las vibraciones normales y las anormales en la operación del turbogenerador, para llevar un mejor control tanto visual como también almacenado y poder llevar un registro del comportamiento del turbogenerador.

4.4.4.5.2. Medidor de vibraciones propuesto

Las mediciones de las vibraciones se harán con el equipo Bently Nevada 3 500, el cual está separado por 15 módulos o compartimientos que sirven para diferentes funciones. En la figura 46 se presenta la forma del medidor de vibraciones Bently Nevada, el cual se propone para monitorear este tipo de mediciones.

Figura 46. **Bently Nevada 3500**



Fuente: Bently Nevada 3500 ENCORE Series Condition Monitoring System. <http://www.gemcs.com/en/bently-nevada-monitoring/continuous-online-monitoring/3500-series.html>. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

La medición se realiza con un transductor de vibraciones, este es un dispositivo que produce una señal eléctrica según el movimiento vibratorio al cual está sujeto.

Tabla X. **Tipos de transductores**

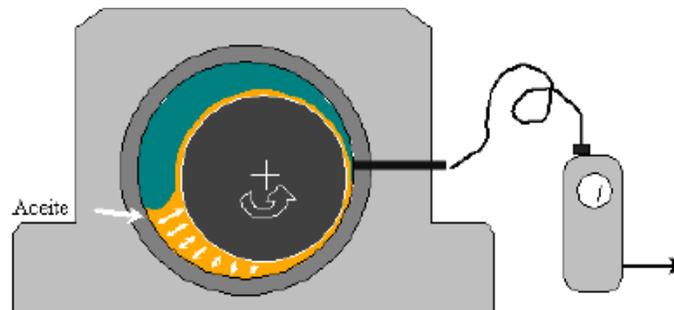
| Nombre | Sensible a |
|----------------------|-------------------|
| Sensor de proximidad | Desplazamiento |
| Sensor de velocidad | Velocidad |
| Acelerómetro | Aceleración |

Fuente: elaboración propia.

El sensor de proximidad, también llamado sensor de corriente de remolino, o transductor de desplazamiento es una unidad de montaje permanente, y necesita un amplificador que condicione la señal para generar un voltaje de salida, proporcional a la distancia entre el transductor y la extremidad

de la flecha. Su operación está basada en un principio magnético y por eso, es sensible a las anomalías magnéticas en la flecha.

Figura 47. **Esquema de un sensor de proximidad**

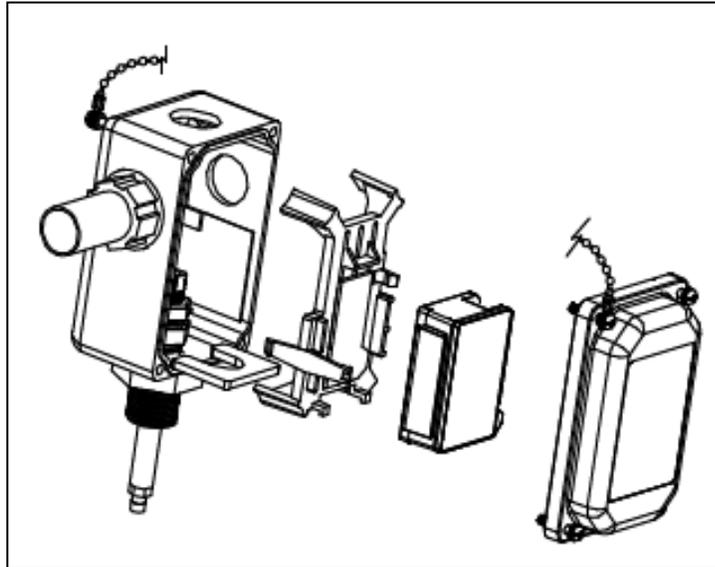


Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Existen transductores de proximidad más sofisticados como el Proxpac, este contiene un sensor de proximidad propio que no es más que un sensor dentro de la tapa del alojamiento. Este diseño tiene las ventajas de no necesitar un cable de entrada (sonda) elimina la necesidad de un sensor de proximidad separado del alojamiento.

Para las mediciones de vibraciones en el turbogenerador de 4 MW, se propone utilizar los sensores de proximidad Proxpac. sus dimensiones se pueden observar en el anexo 12. En la figura 48 se presenta la forma de este sensor, el cual se propone para obtener las mediciones de vibración en el turbogenerador Worthington.

Figura 48. **Sensor de proximidad PROXPAC**



Fuente: Bently Nevada 3500 ENCORE Series Condition Monitoring System. <http://www.ge-mcs.com/download/sensors-and-transducers/178554.pdf>, p. 1.

Consulta: 7 de noviembre de 2014.

4.4.4.6. Protecciones de sobre velocidad

El único disparo de sobre velocidad que existe en el turbogenerador consiste en un elemento mecánico montado en el eje de la turbina, el cual tiende a desplazarse hacia afuera por la acción de la fuerza centrífuga con lo cual acciona otro elemento que interrumpe el circuito hidráulico y se cierran las válvulas de admisión y de entrada de vapor mediante un resorte.

Este dispositivo es de vital importancia, pues es el único que ve que la turbina no gire a velocidades mayores al 100 % de la velocidad nominal, es recomendable ajustarlo para que no exceda el 70 % de la velocidad nominal. Pero en el caso que no se tuviera tan cerca el disparo de la turbina, es

importante tener un respaldo automático del exceso de velocidad, el cual pueda proteger de velocidades fuera de lo normal del turbogenerador.

4.4.4.6.1. Sistema propuesto de protección contra sobrevelocidad-ProTech 203

El sistema de protección contra sobre velocidad Protech 203 controla tres escobillas magnéticas (MPU) individuales para proteger contra excesos de velocidad a turbinas de vapor, así como a otros tipos de maquinaria motriz. El sistema sustituye a los dispositivos de protección contra sobre velocidad mecánicos, especialmente en aplicaciones de alta velocidad (por encima de las 10,000 rpm) cuando estos dejan de ser fiables.

- **Beneficios del ProTech 203**

La facilidad de calibración y ensayo, la precisión y repetitividad son las características de este sistema. El dispositivo ProTech es diferente a los dispositivos mecánicos de exceso de velocidad que requieren ensayo y error considerable para establecer el punto de ajuste del exceso de velocidad. Debido a que es un sistema digital para la detección de velocidad, el valor deseado se programa desde la parte frontal del panel. La exactitud se logra a través de las tres unidades digitales que indican el sentido y la velocidad dentro de 0,1 %. Ningún dispositivo de exceso de velocidad mecánico puede igualar este nivel de precisión.

Además, se recomienda que las dos protecciones de sobre velocidad actúen sobre la máquina, y que el disparo electrónico se debe anticipar al disparo mecánico. En la figura 49 se presenta la forma del sistema de

protección contra sobre velocidad ProTech 203, el cual se propone como protección de sobre velocidad.

Figura 49. **Sistema de protección contra sobrevelocidad-ProTech 203**



Fuente: Woodward ProTech 203, Overspeed Protection System. Product Specification 85562 (Rev. J), p. 10.

4.5. **Sistemas de control computarizado**

Estos sistemas son útiles para los procesos que manejan varios lazos de control. Cuentan con facilidades para la adquisición de datos, su almacenaje masivo, presentación de los mismos, gráficos dinámicos y, en general, la mayoría de las necesidades de información de procesos que el usuario pudiera necesitar.

4.5.1. **Redundancia y respaldo**

Un sistema de control debe pensarse como una pieza de equipo que puede fallar y, por lo tanto, debe protegerse para tales eventualidades. Para ello se busca que el sistema sea redundante, esto es que las partes del equipo que soportan funciones importantes tengan un duplicado que esté funcionando

y actualizándose simultáneamente, como ejemplo: la base de datos del sistema de control del turbogenerador, la cual casi siempre es redundante, existen dos secciones de la memoria del sistema en las cuales se tiene exactamente la misma información en todo tiempo. En caso de que alguna parte de la memoria llegara a fallar, inmediatamente se utiliza la información almacenada en su sección gemela.

El concepto de respaldo se emplea para describir las diferentes formas en que se puede enfrentar una falla del sistema de tipo mecánico, tal como falta de energía eléctrica, falla de una pantalla, un teclado o una unidad de disco que intervengan en la operación del turbogenerador.

Al estructurar un sistema de control es necesario definir claramente el tipo de respaldo y redundancia necesarios en el sistema. A continuación se mencionan las características más importantes de los tipos de respaldo y redundancia más comunes que se proponen para el turbogenerador de escape de 4 MW.

4.5.2. Respaldo manual

En este caso cuando falla el sistema de cómputo el operador puede hacer ajustes en forma manual por medio de dispositivos conectados en paralelo al sistema de funcionamiento del turbogenerador. El respaldo manual del turbogenerador está compuesto de los siguientes elementos:

- Protecciones eléctricas
 - 3 relés de tipo electromecánico de sobreintensidad de la barra de 2,4 KV.

- Interruptor de barra de 2,4 KW.
- Interruptor de líneas del generador eléctrico.
- 3 relés de tipo electromecánico de sobreintensidad de la líneas del generador eléctrico.

- Sincronización del turbogenerador
 - Perilla para sincronizar.
 - Sincronoscopio.
 - Instrumentos de medición de voltaje y corriente ac.
 - Selector para visualizar el voltaje en la barra de 2,4 KV o en las líneas del generador eléctrico.
 - Selector de control del breaker para conectarse a la barra de 2,4 KV.

- Operación del turbogenerador
 - Instrumentos de medición de generador:
 - Voltaje ac y dc
 - Corriente ac y dc
 - Frecuencia
 - Factor de potencia
 - Revoluciones por minuto

 - Control de operación de la turbina de vapor:
 - Selector de control de carga de la turbina
 - Disparo mecánico de la turbina por sobrevelocidad

4.5.3. Respaldo manual automático

En este tipo de respaldo se tienen los dispositivos electrónicos que determinan la condición del sistema de control y, en caso de falla de este último, coloca el o los lazos fallados en posición manual. El respaldo automático del turbogenerador está compuesto de:

El relé multilin SR489 que sirve de respaldo para las protecciones eléctricas, que, a su vez, nos muestra las mediciones de los instrumentos de la operación mencionados en el respaldo manual.

4.5.4. Switcheo manual redundante

En este caso se tiene una unidad del sistema de control continuamente encendida, al ocurrir una falla el operador elimina el sistema actual y lo reemplaza por el de respaldo.

Para este tipo de switcheo, el respaldo manual mencionado anteriormente, se instala de forma paralela al sistema de operación del turbogenerador, por el caso de que existiera una falla en los equipos electrónicos.

4.5.5. Switcheo automático redundante

Igual que el anterior, este se encuentra de una forma paralela como respaldo de la operación manual.

4.5.6. Partes de repuesto en línea

En este caso se tienen unidades de respaldo conectadas en línea y en paralelo, las cuales son incorporadas cuando ocurre una falla.

4.5.7. Partes de repuesto fuera de línea

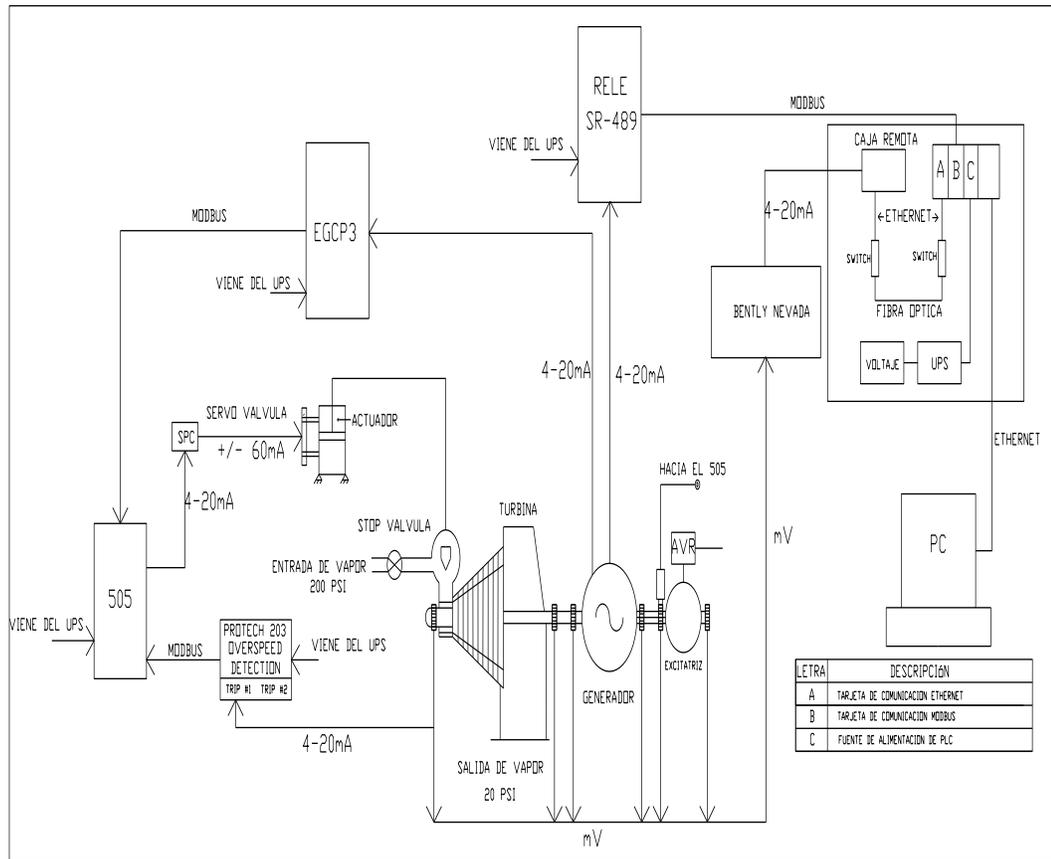
Este respaldo consiste simplemente en mantener partes de repuesto en el almacén para casos de falla. Es importante hacer un análisis de problemas potenciales y de los tipos de falla que un sistema de control pueda tener.

- Repuestos críticos en la operación del turbogenerador
 - Relés de tipo electromecánico de sobreintensidad (51)
 - Transformadores de medición CT's y PT's
 - Carbones para excitatriz
 - Instrumentos de medición de voltaje y corriente ac y dc
 - Instrumentos de medición de temperatura
 - Instrumentos de medición de presión

4.6. Arquitectura de control

A continuación, en la figura 50 se muestra la arquitectura del control para la automatización del turbogenerador de escape de 4 MW.

Figura 50. **Arquitectura de control para la automatización del turbogenerador de escape de 4 MW**



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator.

4.7. Proceso de sintonización

La velocidad, el control auxiliar y cascada utilizan controladores PID. La respuesta de cada lazo de control puede ajustarse para obtener una respuesta óptima, sin embargo, es importante conocer qué es un controlador PID y qué efectos tiene en los ajustes de respuesta del controlador. Estos corresponden a

la categoría P (proporcional), I (integral), y D (derivados). Los términos representados por el microprocesador 505, se muestran de la siguiente manera:

P = ganancia proporcional (%)

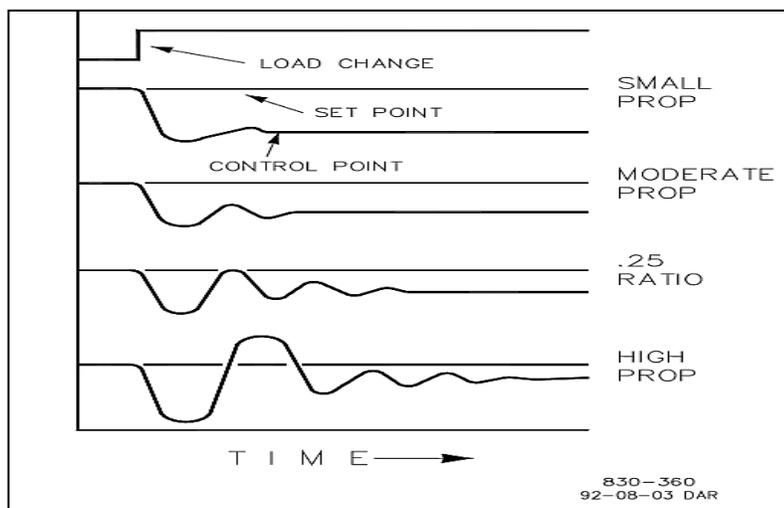
I = ganancia integral (%)

D = derivada (determinado por DR y I)

Proporcional

La cantidad de cambio en el controlador está directamente relacionada con los cambios en el proceso y con los ajustes de la ganancia proporcional en el controlador, el cambio en la salida del controlador es proporcional al cambio de proceso. Si no hay cambio en el proceso, no habrá también en la salida desde el controlador (o cambio de la válvula), independientemente de la desviación.

Figura 51. **Efectos de ganancia, configuración proporcional**



Fuente: Woodward. Installation and operation, manual 85017V2. p. 93.

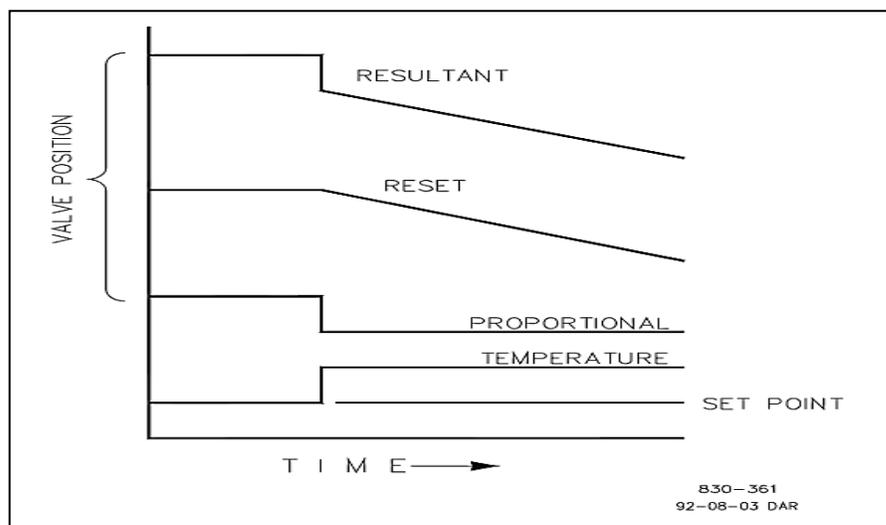
Integral

Compensación integral para el proceso y puntos de ajuste para los cambios de carga. El control integral, a veces llamado reset, establece medidas adicionales a la original respuesta proporcional cuando la variable del proceso se encuentra fuera de los puntos de ajuste. El control integral está en función de la magnitud y la duración de la desviación.

El valor de la acción integral está en función de:

- La magnitud de la desviación
- La duración de la desviación
- El aumento proporcional de ajuste
- Ajuste de la integral

Figura 52. **Respuesta proporcional e integral en un circuito abierto**



Fuente: Woodward. Installation and operation, manual 85017V2. p. 94.

La acción resultante es la curva superior que muestra el paso de respuesta proporcional que termina tan pronto como la medida deja de cambiar; entonces la acción integral (o restablecer) se agrega a la acción proporcional en una cantidad igual a la integral de la desviación. En otras palabras, la acción continua de restablecimiento (en uno o en ambos sentidos), siempre que hay una diferencia (desviación) entre el punto de control y la medición del proceso.

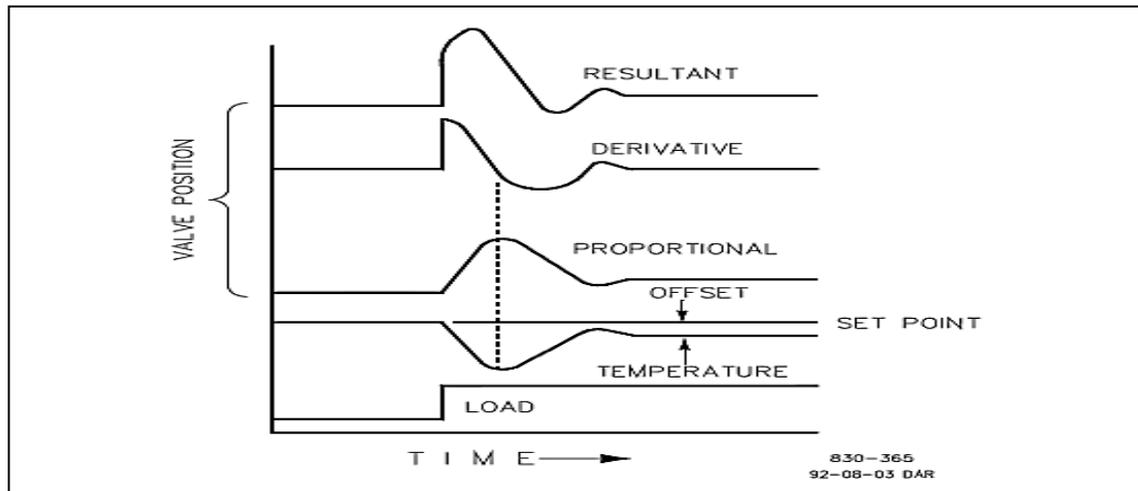
Derivada

La derivada proporciona una corrección temporal que sirve para compensar la transferencia a lo largo y reducir el tiempo de estabilización de los disturbios (perturbaciones momentáneas) en el proceso. La acción de la derivada tiene lugar en solo tres tiempos:

- Cuando el proceso comienza a cambiar
- Cuando la tasa de cambio tiene lugar en el proceso
- Cuando el proceso deja de cambiar

El resultado neto de la acción derivada es oponerse a cualquier cambio en el proceso y se combina con la acción proporcional para reducir el tiempo de estabilización. La derivación no eliminará la compensación.

Figura 53. **Acción proporcional y derivativo en un lazo cerrado**



Fuente: Woodward. Installation and operation, manual 85017V2. p. 98.

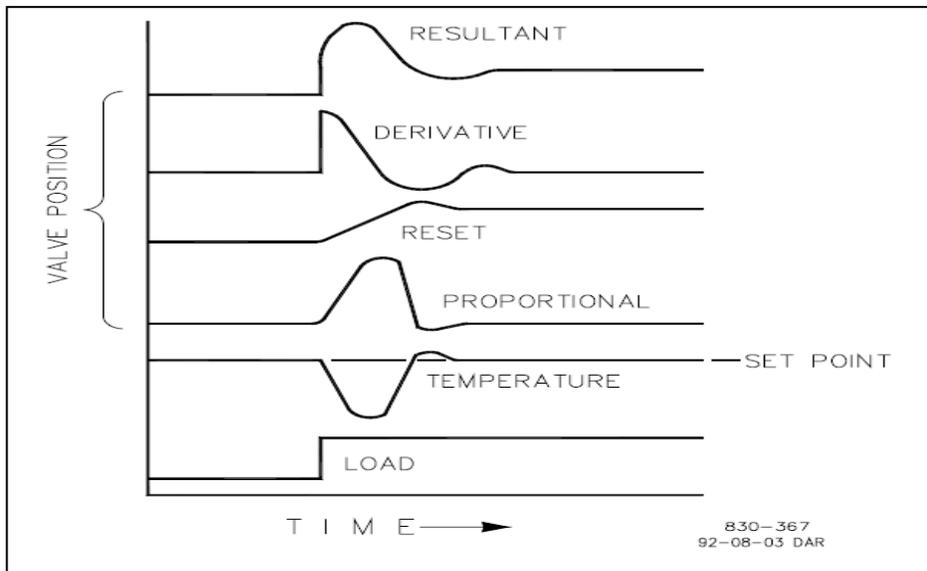
En la figura 53 se muestran los actos derivados al oponerse a un cambio en el proceso en cualquiera dirección. La línea punteada indica la acción derivada pasando de cero, al oponerse a la desviación hacia el proceso. Se observa que la compensación aún existe entre el punto de ajuste deseado y el punto de control que inclinó el resultado del cambio de carga. La curva superior es la salida del controlador resultante, proporcional más derivados.

Proporcional + integral + derivada (circuito cerrado)

En la figura 54 se muestra la relación que tiene la posición de la válvula cuando se da la interacción del PID en el lazo cerrado de control, cuando se tiene un cambio en la velocidad de la máquina. A medida que la velocidad varía, la acción proporcional mueve la válvula de control proporcional a la medida en que cambió la velocidad. La ganancia integral se suma a la acción proporcional como consecuencia de la magnitud del tiempo (duración) de la

desviación; y la derivada corrige temporalmente la base de la velocidad a la que se mueve la medición en cualquier dirección. En la curva resultante (en la parte superior) muestra una corrección (en este caso), pero la válvula tendrá la posición necesaria para mantener el punto de ajuste de la velocidad establecida.

Figura 54. **Acción proporcional, integral y derivativo en un lazo cerrado**



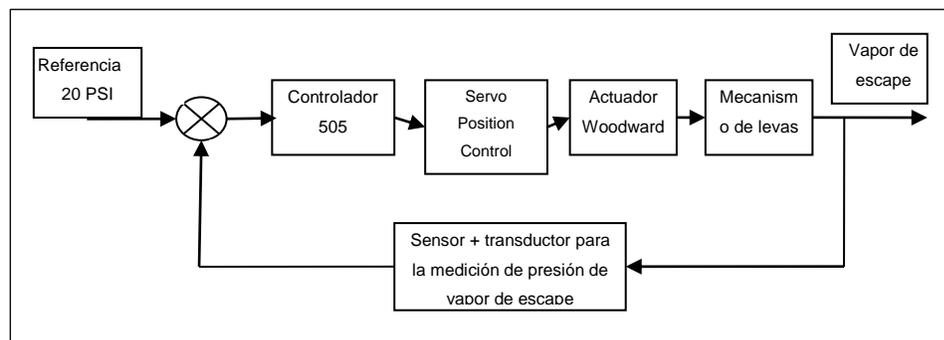
Fuente: Woodward. Installation and operation, manual 85017V2. p. 99.

4.7.1. **Modelo matemático de la ecuación de estado**

Tanto los especialistas como ingenieros dedicados al control automático de sistemas físicos dinámicos necesitan que cada uno de los componentes que formarán parte del sistema de control automático esté formalizado mediante sus respectivos modelos matemáticos. La naturaleza de los objetos a ser controlados es no lineal, y para aquellos procesos termoenergéticos, las dinámicas que resultan de los balances de materiales y energía requieren que

se le introduzcan mediante ecuaciones algebraicas de enlace simple y doble variadas, las propiedades termodinámicas y los resultados tabulados experimentalmente que ajustan la transferencia de calor.

Figura 55. **Modelo matemático del sistema de control para la turbina de vapor Worthington**

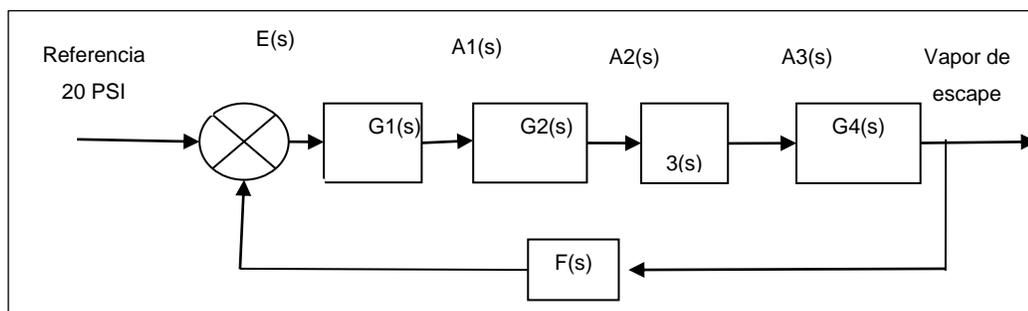


Fuente: elaboración propia.

4.7.1.1. Análisis-solución de la ecuación de estado

Es una ecuación diferencial en la que aparece de forma explícita la variable independiente.

Figura 56. **Sistema de control con variables asignadas**



Fuente: elaboración propia.

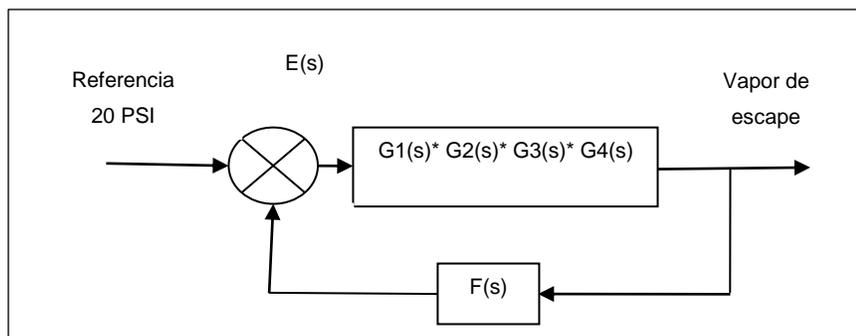
Se determinará la función de transferencia, la cual es la relación de la variable de salida de un proceso, sobre la entrada al mismo.

Matemáticamente se describe como:

Función de transferencia donde: $G(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$ ecuación 1

Aplicando reducción de diagramas, se tiene lo siguiente:

Figura 57. **Modelo simplificado del sistema de control con variables asignadas**



Fuente: elaboración propia.

Ahora se tiene:

$$E(s) = R(s) - C(s) * F(s) \text{ ecuación 2}$$

$$C(s) = E(s) * (G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s)) \text{ ecuación 3}$$

Sustituyendo la ecuación 2 en la ecuación 3, se tiene lo siguiente:

$$C(s) = (R(s) - C(s) * F(s)) * (G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s)) \quad \text{ecuación 4}$$

Simplificando la ecuación 4.

$$C(s) = (R(s) * (G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s)) - C(s) * F(s) * (G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s))) \quad \text{ecuación 5}$$

Despejando C(s) de la ecuación 5.

$$C(s) + C(s) * F(s) * (G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s)) = (R(s) * (G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s))) \quad \text{ecuación 6}$$

Sacando el factor común C(s) de la ecuación 6.

$$C(s)(1 + F(s) * G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s)) = R(s) * G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s) \quad \text{ecuación 7}$$

Obteniendo la solución de la ecuación matemática del lazo de control para la turbina del turbogenerador Worthington de 4 MW.

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s)}{(1 + F(s) * G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s))} \quad \text{ecuación 8}$$

Esta ecuación es una fracción, lo cual indica que se tiene una retroalimentación a través de un lazo de control cerrado.

Todas las funciones aparecen en el denominador, lo cual indica que es un lazo de control de tipo cerrado.

Ecuación característica

$$(1 + F(s) * G1(s) * G2(s) * G3(s) * G4(s)) = 0 \text{ ecuación 9}$$

4.8. Software de control del proceso

En la actualidad existe un gran número de paquetes computacionales para control de procesos. Un buen paquete de control de procesos debe ser capaz de ejecutar funciones de control convencionales, detectar y reportar condiciones de alarma, comunicarse con controladores, producir gráficos dinámicos claros y fáciles de configurar, permitir la escritura de programas en lenguajes convencionales, realizar auto sintonización y efectuar control supervisado.

4.9. Reestructuración de la organización operativa

Cuando el turbogenerador ha sido operado en forma manual y con este proyecto se incorpora un sistema de control automático, es necesario revisar las prácticas y políticas operativas para adecuarlas a las nuevas estrategias de control. En una operación manual es común que las variables del proceso se encuentren en sus valores correctos y que los equipos funcionen normalmente. Al incorporar un sistema de control gran parte de la información del proceso se concentra en un cuarto de control. Así, si en operación manual era necesario recorrer la planta para obtener información del funcionamiento del turbogenerador, ahora basta con solo verificar una pantalla para tener la misma información, probablemente con mayor precisión.

Figura 58. **Sala de control para operación del turbogenerador Worthington de 4 MW**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

4.10. Capacitación de recursos humanos

El programa de capacitación debe incluir dos aspectos fundamentales: el aspecto motivacional, en el cual se busca que el obrero de menor preparación vea al nuevo sistema como una herramienta que le permitirá hacer su trabajo más fácilmente, y el cognoscitivo, en el cual es necesario darle a los usuarios los conocimientos necesarios para manejar el sistema.

Es importante considerar dentro del programa de capacitación a todo aquel personal que tenga relación con el sistema de control, esto es, operarios, personal de mantenimiento, ingenieros y personal directivo. A cada uno de estos grupos se le debe diseñar un programa específico de capacitación con objetivos determinados de acuerdo a su nivel de conocimiento y a las necesidades que el nuevo sistema demande.

4.10.1. Nuevas políticas operativas

En algunas plantas que han automatizado procesos previamente manuales, los operadores se han enfrentado al problema de pasar demasiado tiempo en el cuarto de control y poco tiempo en el campo. La experiencia de estas plantas lleva a establecer recorridos de campo con fines diferentes al control en si, y más enfocados hacia el funcionamiento correcto de los equipos. Para hacer un recorrido de campo eficiente cuando se tiene un sistema de control automático es necesario hacerlo con una mentalidad de búsqueda de situaciones anormales y de verificación de situaciones correctas.

5. ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DE LA PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL TURBOGENERADOR DE ESCAPE DE 4 MW, UTILIZANDO DE REFERENCIA EL BALANCE ENERGÉTICO CALDERA-TURBOGENERADOR EN UN INGENIO AZUCARERO

5.1. Datos de los diferentes parámetros utilizados para el balance de energía

Esta parte muestra las lecturas o mediciones promedios de las diferentes variables que serán de utilidad para realizar los cálculos del balance energético.

Tabla XI. **Valores promedio de presión y temperatura de la caldera núm. 1**

| | |
|-------------|----------|
| Presión | 203 PSIG |
| Temperatura | 445 °F |

Fuente: elaboración propia.

5.2. Equipos consumidores de vapor sobrecalentado

Tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, como cualquier otro ciclo de potencia, su eficiencia está acotada por la eficiencia termodinámica de un ciclo de Carnot que opera entre los mismos focos térmicos.

5.2.1. Vapor requerido por la turbina de vapor Worthington

Estos datos se obtienen con base en los datos proporcionados en los catálogos de operación suministrados por los fabricantes.

$$\text{Potencia} = 4000\text{KW} \frac{1\text{HP}}{0.746\text{KW}} = 5361.93\text{HP}$$

5.3. Cálculos realizados al turbogenerador Worthington de escape de 4 MW

Es importante destacar que como los rotores de estos equipos superan las velocidades críticas, no pueden ser considerados como rígidos y requieren un alto grado de balanceo para poder realizar las maniobras de arranque y parada en forma segura y con vibraciones dentro de límites aceptables para el funcionamiento.

5.3.1. Consumo teórico de vapor

Determina la cantidad de libras de vapor necesarias para producir un kilovatio hora. Para realizar este cálculo se vale de la fórmula siguiente:

$$m_t = \frac{(3412.14)}{h_1 - h_2}$$

Donde:

m_t = consumo teórico o ideal de vapor; libra por kilovatio-hora

3412.14 = equivalente en BTU/hora a 1 kilovatio-hora

h_1 = entalpia del vapor a la entrada de la turbina de la unidad térmica inglesa/libra.

h_2 = entalpia del vapor a la salida de la turbina de la unidad térmica inglesa/libra.

Para encontrar h_1 , se utiliza la información de la tabla XI, tomando en cuenta una caída para la presión y la temperatura del 12 y 10 % respectivamente. De manera que se tiene una presión a la entrada de la turbina de 193,34 PSIA a una temperatura de 445 °F, con el apoyo de las tablas de vapor en la sección de sobrecalentamiento e interpolando se obtiene:

Tabla XII. **Interpolación de presión y temperatura de la caldera núm. 1**

| Presión | Temperatura | | |
|-------------|-------------|---------|---------|
| | 400 °F | 445 °F | 450 °F |
| 180 PSIA | 1214,5 | | 1243,7 |
| 193,34 PSIA | 1212,09 | 1238,92 | 1241,90 |
| 200 PSIA | 1210,9 | | 1241,0 |

Fuente: elaboración propia.

Con el valor de $h_1 = 1238,92$ BTU/lb

Para encontrar h_2 se toma como punto de partida que la descarga será a una presión de 32 PSIA, y partiendo de que en la turbina se realiza un proceso isoentropico, donde $s_1=s_2$, donde s es la entropía; s_1 se determina en las tablas de vapor sobrecalentado, y mediante la utilización de la ecuación:

$$s = s_f + (x)(s_{fg})$$

Donde:

s = entropía de acuerdo a las condiciones de vapor; unidad térmica inglesa/libra, grados Rankine.

s_f = entropía del líquido; unidad termica inglesa/libra, grados Rankine.

s_{fg} = entropía de vaporización; unidad térmica inglesa/libra, grados Rankine.

x = título del vapor en la descarga de la turbina; fracción decimal.

De acuerdo con las condiciones de entrada y salida del vapor en la turbina y con el apoyo de las tablas de vapor e interpolando se obtiene:

$$S_f = 0,373298$$

$$S_{fg} = 1,32132$$

$$S_g = 1,69458$$

Sustituyendo en la ecuación, se obtiene:

$$X = \frac{S_g - S_f}{S_{fg}}$$

$$X = 0,999971241$$

La ecuación para encontrar h_2 es:

$$h_2 = h_f + (x)(h_{fg})$$

Donde:

h_2 = entalpia total del vapor; unidad térmica inglesa/libra

h_f = entalpia del líquido; unidad térmica inglesa/libra

h_{fg} = entalpia de vaporización; unidad térmica inglesa/libra

Los valores de h_f y h_{fg} se encuentran con la ayuda de las tablas de vapor saturado; interpolando:

$$h_f = 222,57$$

$$h_{fg} = 942,79$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$h_2 = h_f + (X * h_{fg})$$

$$h_2 = 1\ 165,332886$$

Como ya se tienen los valores de todas las variables, el consumo teórico de vapor es de:

$$m_t = \frac{(3412,14)}{h_1 - h_2}$$

$$m_t = 46,36\ lb/kwh$$

5.3.2. Consumo real de vapor

Como lo que se utiliza es el valor real, se recurre a la siguiente fórmula para determinar el consumo del turbogenerador:

$$m_T = \left[\frac{m_t}{\eta_g \times n} + (\text{pérdidas}) \right]$$

Donde:

m_T = consumo real del vapor; libra/kilovatio-hora

m_t = consumo teórico de vapor; libra/kilovatio-hora

ξ_g = rendimiento termodinámico de la turbina, que varía entre 0,70 ~ 0,75

n = eficiencia del generador, que varía entre los valores de 0,91 ~ 0,94

Pérdidas por condensación = 3 % ~ 5 %, por fugas = 2 % ~ 3 %

Sustituyendo en la ecuación y tomando 5% de perdidas, se obtiene:

$$mT = \left[\frac{46,36 \frac{Lb}{kwh}}{0,75 \times 0,94} + (1,5) \right]$$
$$mT = \frac{67,26 Lb}{kwh}$$

El turbogenerador tiene una capacidad máxima de 4 000 KW y la carga con la que funciona es de 3 500 KW, de manera que la carga de operación está en el 87,5 % de la capacidad de generación, con lo cual el consumo real es de:

$$\frac{lb \text{ de vapor}}{\text{hora}} = mT \times kw \text{ real}$$

$$\frac{lb \text{ de vapor}}{\text{hora}} = \frac{67,26 lb}{kwh} \times 3\,500 kw = \frac{235,410 lb \text{ de vapor}}{\text{hora}}$$

5.3.3. Eficiencia o rendimiento térmico (e_t)

Establece la relación entre el calor útil y el suministrado a la máquina para generarlo. El rendimiento con base en un kilovatio se calcula mediante la expresión:

$$e_t = \left[\frac{3\,412,14}{mT \times (h_1 - hf_2)} \right] \times 100$$

Donde:

e_t = rendimiento en porcentaje

m_T = consumo real del vapor; libra/kilovatio-hora

h_1 = entalpia del vapor a la entrada de la turbina; unidad térmica inglesa/libra

h_{f2} = entalpia del líquido a la presión absoluta del vapor de escape; unidad térmica inglesa/libra

Teniendo los valores anteriores, se sustituye en la ecuación anterior, se obtiene:

$$e_t = \left[\frac{3\,412,14}{\frac{67,26\text{ lb}}{\text{kwh}} \times (1\,238,92 - 222,57)} \right] \times 100$$

$e_t = 5\%$

5.3.4. Razón de calor (HEAT-RATE)

Determina la cantidad de energía que necesita la unidad o turbina para desarrollar determinada potencia de salida o kilovatio-hora; se puede expresar en términos de unidad termica inglesa/kilovatio-hora o kilocaloría-hora/kilovatio-hora. Se encuentra mediante la expresión:

$$\text{Heat - Rate} = \frac{mT \times (h_1 - h_2)}{P}$$

Donde

P = potencia de salida del generador

Sustituyendo:

$$\text{Heat - Rate} = \frac{\frac{235\,410 \text{ lb de vapor}}{\text{hora}} \times \left(\frac{1\,238,92 \text{ BTU}}{\text{lb}} - \frac{1\,165,33 \text{ BTU}}{\text{lb}} \right)}{3\,500 \text{ Kw}}$$

$$\text{Heat - Rate} = \frac{4\,949,66 \text{ BTU}}{\text{kwh}}$$

5.4. Balance térmico y pérdidas de energía en la caldera núm. 1

Para que el balance térmico sea válido todos los datos registrados deben tomarse cuando el equipo o instalación se encuentre operando en condiciones de estado estable, vale decir, sin variaciones en su funcionamiento.

- Datos de molienda

Caña molida = 18 500 ton/día en todo el ingenio

Bagazo total = 1 816 ton/día en la caldera núm. 1

Bagazo quemado = 1 725,2 ton/día

Bagazo ahorrado = 90,82 ton/día (5 %)

Humedad del bagazo = 50 %

Temperatura del agua de alimentación = 214 °F

Presión de operación en caldera 203 PSIG

Temperatura del vapor sobrecalentado 445 °F

Exceso de aire = 36 %

Temperatura de gases a la entrada de chimenea = 328 °F

Coeficientes característicos del rendimiento de la producción de vapor (tomados de la página 633 de Hugot):

μ = coeficiente que incluye las pérdidas en sólidos no quemados --- 0,99
 β = coeficiente que incluye las pérdidas debidas a la radiación ----- 0,95
 α = coeficiente que incluye las pérdidas debidas a la combustión incompleta ----- 0,95

Con la utilización de la ecuación siguiente (ecuación 570, página 623 de Hugot), se determina el valor calorífico neto del bagazo húmedo:

$$V.C.N. = 7\,650 - 8\,730w$$

Donde w = humedad del bagazo

$$= 50\%$$

$$V.C.N. = 7\,650 - (8\,730 \times 0,50)$$

$$V.C.N. = 3\,285 \frac{BTU}{lb}$$

$$Energía\ del\ bagazo\ (consumida) = \frac{ton}{día} \times \frac{1\ día}{24\ hrs} \times \frac{2\,000\ lb}{1\ ton} \times (V.C.N.)$$

Energía del bagazo (consumida)

$$= \frac{1\,725,2\ Ton}{día} \times \frac{1\ día}{24\ hrs} \times \frac{2\,000\ lb}{1\ ton} \times \frac{3\,285\ BTU}{lb}$$

$$Energía\ del\ bagazo\ (consumida) = 472,27 \frac{MBTU}{h}$$

5.4.1. Datos de la caldera núm. 1

Flujo de vapor: 280 000 lb/hora (consumo máximo del turbogenerador)

Área = 4 305,56 pies²

Temperatura de pared=140 °F

Presión = 212,67 PSIA

Temperatura de vapor = 440,55 °F

Temperatura ambiente = 94 °F

Temperatura de gases = 328 °F

Eficiencia de combustión = 64 %

Primero se calculan los tipos de energía de acuerdo a los datos anteriores:

5.4.1.1. Energía disponible

Es la energía que da origen la cantidad total de bagazo que se genera en un día.

$$\text{Energía disponible} = \frac{1\,816\ \text{Ton}}{\text{día}} \times \frac{1\ \text{día}}{24\ \text{hrs}} \times \frac{2\,000\ \text{lb}}{1\ \text{ton}} \times \frac{3\,285\ \text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$\text{Energía disponible} = 497,13 \frac{\text{MBTU}}{\text{h}}$$

5.4.1.2. Energía consumida

Este tipo de energía es el dato que se obtuvo a través de la molienda y tiene un valor de:

$$\text{Energía del bagazo (consumida)} = 472,27 \frac{\text{MBTU}}{\text{h}}$$

5.4.1.3. Energía generada

Para este cálculo se necesita la entalpía del vapor a la presión y temperatura de operación, con el apoyo de las tablas de vapor e interpolando, se obtiene:

Tabla XIII. Interpolación de presión y temperatura para la energía generada de la caldera núm. 1

| Presión | Temperatura | | |
|-------------|-------------|-----------|--------|
| | 400 °F | 440,55 °F | 450 °F |
| 200 PSIA | 1210,9 | | 1241,0 |
| 212,67 PSIA | 1208,4 | 1233,46 | 1239,3 |
| 225 PSIA | 1206,0 | | 1237,6 |

Fuente: elaboración propia.

$$h1 = 1\ 208,4 + 25,059 = 1\ 233,46$$

Teniendo que $h = 1\ 233,46$ BTU/Lb y conociendo el flujo generado, se tiene que:

$$\text{Energía generada} = \frac{1\ 233,46\ \text{BTU}}{\text{lb}} \times 280,000\ \frac{\text{Lb}}{\text{h}}$$

$$\text{Energía generada} = 345,37\ \frac{\text{MBTU}}{\text{h}}$$

5.4.1.4. Pérdidas por condensación

Teniendo que $V.C.N. = 3\ 285\ \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$ y que la humedad del bagazo = 50 %

Se puede determinar las pérdidas con condensación a través de la fórmula siguiente:

$$PC = \frac{[100 \times (562 - 4,82)(\% \text{ de humedad bagaz})]}{V.C.N}$$

$$PC = \frac{[100 \times (562 - 4,82)(0,50)]}{3\ 285}$$

$$PC = 8,48 \%$$

5.4.1.5. Pérdidas por convección y radiación

Este tipo de pérdidas se encuentra con la expresión:

$$PCR = \frac{\left\{ 0,94(0.174) \left[\left(\frac{T_{pared} + 460}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{amb} + 460}{100} \right)^4 \right] + 0,296(T_{pared} - T_{amb}) \times 1,25 \right\}}{(AREA \times energia \text{ de bagazo} \times \% \text{ bagazo consumido})}$$

$$PCR = \frac{\left\{ 0,94(0.174) \left[\left(\frac{140 + 460}{100} \right)^4 - \left(\frac{94 + 460}{100} \right)^4 \right] + 0,296(140 - 94) \times 1,25 \right\}}{(4\ 305,56 \times 472,27 \times 0,10)}$$

$$PCR = 0,0087 \%$$

5.4.1.6. Eficiencia de la caldera núm. 1

Ya teniendo las pérdidas y la eficiencia de combustión, se puede determinar la eficiencia de la caldera:

$$Eficiencia \text{ de la caldera} = eficiencia \text{ de combustión} - (PC - PCR)$$

$$\text{Eficiencia de la caldera} = 64 \% - (8,48 \% - 0,0087 \%)$$

$$\text{Eficiencia de la caldera} = 55,53 \%$$

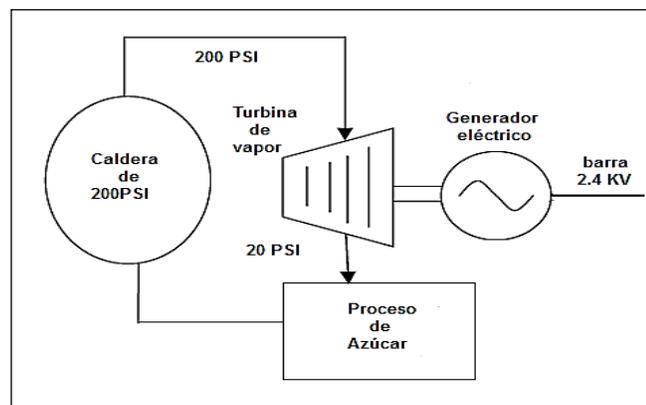
5.5. Evaluación técnica económica

Consiste en presentar los elementos de juicio que permitan a los encargados de formular, administrar y ejecutar proyectos en el ingenio, tomar la decisión de invertir o no a corto, mediano o largo plazo.

5.5.1. Análisis económico del proyecto

La evaluación del tiene como finalidad, analizar la conveniencia o inconveniencia en el uso de recursos destinados a la ejecución del proyecto, dirigido a la solución de un problema o a la satisfacción de necesidades. Los criterios que se utilizaron garantizaron, la eficiencia financiera, económica, social y ambiental.

Figura 59. **Diagrama esquemático de la transformación de las energías: (calorífica a mecánica y de mecánica a eléctrica)**



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator.

En el capítulo núm. 2, se describió la forma en que actualmente se opera el turbogenerador Worthington de 4 MW, así también, cómo es el funcionamiento individual de cada parte que lo conforma.

Por lo cual, en el estudio económico de este proyecto se tomarán en cuenta los costos que se tienen al momento de: producción de vapor, generación de energía eléctrica y el costo de la automatización del turbogenerador.

5.5.2. Costo de producción de vapor a 900 PSI para generar la energía eléctrica

El vapor utilizado para generar electricidad pasa por un turbogenerador de no condensación (1,5 MW de capacidad) en una cantidad de 15,454 kg/h dando una producción de 1 MW de energía eléctrica que es consumida en el funcionamiento del ingenio.

- Costo del consumo eléctrico de los equipos de la caldera

Tomando en cuenta que para producir 1lb de vapor por hora se necesita 2.12 lb de bagazo. Sabiendo que el bagazo es un desecho de la caña, se puede considerar que tienen un costo despreciable, por el cual no se considera, en dicho proyecto.

El consumo de energía eléctrica para la operación normal de la caldera por día promedio, según los equipos instalados en la caldera es de: 56 234 Kwh.

El costo de la energía consumida en los equipos de la caldera, en la temporada de zafra es de Q 0,98/Kwh, lo que representa un costo de:

$$C.E. = 56\,234 \text{ Kwh} * \frac{Q\,0,98}{\text{Kwh}}$$

$$C.E. = Q\,55\,109,32 \text{ por día}$$

- Costos por tratamiento de agua

Para el tratamiento del agua de alimentación de la caldera se tienen los siguientes químicos, incluyendo el costo por día:

Tabla XIV. **Costo de tratamiento de agua por día de la caldera**

| Costo de tratamiento de agua por día de la caldera | | | |
|---|------------------------|--------------|------------------|
| Químico | Cantidad diaria | Costo | Total |
| Soda líquida | 17,53 lb/día | Q. 0,97/lb | Q. 17,00 |
| Químico 237 | 10,00 lb/día | Q. 29,46/lb | Q. 294,60 |
| Químico 204 | 7,75 lb/día | Q. 20,34/lb | Q. 157,64 |
| Químico 271 | 5,00 lb/día | Q. 26,55/lb | Q. 132,75 |
| Químico 284 | 1,50 lb/día | Q. 27,38/lb | Q. 41,07 |
| Total tratamiento agua por día: | | | Q. 643,06 |

Fuente: elaboración propia.

- Costos de mano de obra por operación de la caldera

En época de zafra, las calderas se encuentran operando las 24 horas del día y para ello se cuenta con operarios para 3 diferentes turnos, entre los cuales se tienen: diurno (turno A), mixto (turno B) y el nocturno (turno C), ver costos en la tabla XV.

Tabla XV. **Costos de mano de obra por día de operación de la caldera**

| Costos de mano de obra por día de operación en la caldera | | | | | |
|---|-------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Puesto | Salario día | Salario Hora | Turno A | Turno B | Turno C |
| Operador caldera | Q 110,30 | Q 16,46 | Q 137,71 | Q 159,94 | Q 197,57 |
| Auxiliar caldera | Q 44,14 | Q 7,28 | Q 58,26 | Q 70,75 | Q 87,39 |
| Electricista | Q 97,49 | Q 14,68 | Q 117,50 | Q 142,67 | Q 176,24 |
| Instrumentista | Q 100,18 | Q 15,06 | Q 120,48 | Q 146,30 | Q 180,72 |
| Camequero | Q 48,00 | Q 7,81 | Q 62,54 | Q 75,94 | Q 93,81 |
| Peón | Q 43,64 | Q 7,21 | Q 57,70 | Q 70,06 | Q 86,55 |
| Costo de mano de obra por turno | | | Q 554.19 | Q 665.66 | Q 822,28 |
| Costo total de mano de obra al día | | | | | Q 2 042,13 |

Fuente: elaboración propia.

5.5.2.1. Mantenimiento de la caldera

Para el costo de la producción de vapor se involucran los costos de mantenimiento de la generadora de vapor, durante la época de la reparación, el cual es de: Q 385 300,00.

Para tener los costos de mantenimiento de la caldera por día, se tomará el periodo de zafra el cual dura aproximadamente 150 días, y es:

$$C.M = \frac{Q\ 385\ 300,00}{150\ días}$$

$$C.M = Q\ 2\ 568,67\ por\ día$$

- Costo total de operación de la caldera

Tomando en cuenta que la caldera produce:

$$Q_c = 19\ 000 \frac{lb}{h}$$

Totalizando el costo para la operación de la caldera por día es:

$$C.O = \text{costo energía zafra} + \text{costo tratamiento agua caldera} \\ + \text{costo operación caldera} + \text{costo mantenimiento}$$

$$C.O = Q\ 55\ 109,32 + Q\ 643,06 + Q\ 2\ 042,13 + Q\ 2\ 568,67$$

$$C.O = Q\ 60\ 363,18$$

- Costo de vapor por libra

El costo por hora es:

$$\frac{C.O}{h} = \frac{Q\ 60\ 363,18}{24h}$$

$$\frac{C.O}{h} = Q\ 2\ 515,13$$

De donde, para producir 1 libra de vapor es:

$$\text{Costo vapor} = \frac{\frac{C.O}{h}}{\text{producción de vapor caldera } 1 \frac{lb}{h}}$$

$$\text{Costo vapor} = \frac{\frac{Q\ 2\ 515,13}{h}}{195\ 000 \frac{lb}{h}}$$

$$\text{Costo vapor} = \frac{Q \cdot 0,013}{lb}$$

5.5.3. Costos de generación eléctrica

Considerando que el turbogenerador utilizado para la venta de energía eléctrica al Sistema Nacional Interconectado (SNI), tiene una capacidad de 15 MW. Se tomará el costo del mantenimiento y la mano de obra de operación y reparación, para determinar cuál es el costo de la generación de energía eléctrica.

5.5.3.1. Costo de mantenimiento del turbogenerador

El costo de mantenimiento promedio del turbogenerador es de:

$$CM = Q \cdot 200 \cdot 600,00$$

5.5.3.2. Costo de mano de obra de operación y reparación del turbogenerador

El costo de la mano de obra anual de operación y reparación es de:

$$CMO = Q \cdot 220 \cdot 812,10$$

5.5.3.3. Costos de generación por kilowatt hora

Se va a tomar como referencia el costo que tiene una libra de vapor de la caldera de 900 PSI, la cual se utiliza únicamente para la generación de energía eléctrica. Como se puede observar en la sección 5.2.2. La caldera

núm. 1 se encuentra únicamente para la alimentación de la turbina del turbogenerador Worthington.

Los datos de placa del turbogenerador que se utiliza directamente para la venta de energía son los siguientes:

- Eficiencia de 13,2 lb/KW, es decir que para producir 1 KW. necesita 13,2 lb. de vapor.
- Capacidad de 15 MW. = 15 000 KW.

$$\text{Costo de generación} = \text{Eficiencia} \times \text{costo vapor}$$

$$\text{Costo de generación} = \frac{13,2 \text{ lb}}{\text{Kwh}} \times \frac{Q0,013}{\text{lb}}$$

$$\text{Costo de generación} = \frac{Q 0,17}{\text{Kwh}}$$

Por lo tanto, el costo de Generación por 1Kwh es de: Q 0,17

5.5.3.4. Costo anual de generación

Tomando en cuenta que el promedio anual de los últimos años de generación eléctrica por el turbogenerador de 15 MW es de: 10 000 KW.

$$\text{CGE de } 10\text{Mwh} = \text{Costo de generación} \times \text{Kwh vendidos} \times \frac{24h}{d} \times 150d$$

$$\text{CGE de } 10\text{Mwh} = \frac{Q 0,17}{\text{Kwh}} \times 10,000\text{Kw} \times \frac{24h}{d} \times 150d$$

$$CGE \text{ de } 10Mwh = Q 6 120 000,00$$

5.5.3.5. Costo total de generación eléctrica

$$CTGE = \text{Costo de mantenimiento} + \text{Costo mano de obra y operación} \\ + CGE \text{ de } 10Mwh$$

$$CTGE = Q 200 600,00 + Q 220 812,10 + Q 6 120,000.00$$

$$CTGE = Q6 541 412,1$$

Considerando el tipo de cambio actual Q 7,85 por US \$1,00, se obtiene que el CTGE en US \$ es de:

$$CTGE = \$833 300,90$$

5.5.4. Costos de inversión del proyecto

El equipo necesario para la puesta en marcha del presente proyecto se muestra en la tabla XVI.

Tabla XVI. Costos de inversión del proyecto

| Descripción | Cantidad | Precio Unitario | Precio Total |
|---|----------|-----------------|--------------|
| Transmisor y sensor con lectura 4-20mA para medición de presión | 2 | \$713,37 | \$1 426,74 |
| Transmisor temperatura de vapor con lectura mV | 2 | \$328,15 | \$656,31 |
| Termocopla tipo K alta temperatura 32-2300 G/F 4-20mA | 2 | \$569,55 | \$1 139,11 |
| Transmisor y sensor Proximitor 4-20mA | 6 | \$1 131,69 | \$6 790,15 |

Continuación de la tabla XVI.

| | | | |
|--|-----|-------------|-------------|
| Tacómetro MC896657 | 1 | \$841,43 | \$841,43 |
| Amperímetro de carátula ac | 1 | \$254,78 | \$254,78 |
| Amperímetro de carátula dc | 1 | \$254,78 | \$254,78 |
| Transmisor de presión manométrica de 1 A 2 Mpa (14 A 290 PSI) | 1 | \$815,49 | \$815,49 |
| Transmisor de temperatura YTA320 con comunicación hart con sensor y termopozo integrado de 9" | 3 | \$2 213,66 | \$6 640,97 |
| Sensor Bently Nevada con lectura mV | 6 | \$370,39 | \$2 222,35 |
| Transmisor Smar conn lectura 4-20mA | 6 | \$342,42 | \$2 054,52 |
| Modulo de 8 RTD 1794-IR8 | 1 | \$1 417,62 | \$1 417,62 |
| Cable belden 1 PAR #18 AWG 1032A | 200 | \$1,07 | \$213,91 |
| Caja remota | 1 | \$11 260,35 | \$11 260,35 |
| Computadora Optiplex 760/D, C2Q, 2.33Ghz, 2X1Gb, 1X250Gb, Dvd+/-RW, WXP+WVBSp MONITOR DE 19" | 1 | \$1 500,00 | \$1 500,00 |
| Microprocesador 505 | 1 | \$14 000,00 | \$14 000,00 |
| SPC (control de posición) | 1 | \$5 000,00 | \$5 000,00 |
| Actuador Woodward UG40 | 1 | \$15 000,00 | \$15 000,00 |
| Controlador de carga EGCP-3 LS | 1 | \$7 000,00 | \$7 000,00 |
| Regulador de voltaje automático DECS-200 | 1 | \$15 490,45 | \$15 490,45 |
| Relé de protección SR489 núm. Modelo: 489-P5-HI-A20-E. Con comunicación RS-232, RS-485, Ethernet alimentación: 125 Vdc CT de fase: 5A salida: 4-20 mA Cat. 489-P5-HI-A20-E. General Electric | 1 | \$7 346,82 | \$7 346,82 |
| Transformador potencial ratio 4:1 120/480 VOLTS. AC. | 3 | \$200,00 | \$600,00 |
| Transformador de corriente ratio 2000:5 tipo cuadrado, aislamiento 600V | 3 | \$250,00 | \$750,00 |
| Bently Nevada 3500 | 1 | \$15 000,00 | \$15 000,00 |
| Sistema de protección contra sobrevelocidad-ProTech 203 | 1 | \$14 509,55 | \$14 509,55 |
| Elaboración de gráficos | 1 | \$10 000,00 | \$10 000,00 |
| Red de comunicación | 1 | \$10 000,00 | \$10 000,00 |
| Tubería y accesorios | 1 | \$30 000,00 | \$30 000,00 |
| Procesador control Logix 8 MB, 1756-L63 Allen Bradley | 1 | \$6 554,95 | \$6 554,95 |

Continuación de la tabla XVI.

| | | | |
|---|---|-------------|---------------------|
| Gabinete de 2200 x 1200 x 600mm para Procesador control Logix y accesorios | 1 | \$1 800,00 | \$1 800,00 |
| Fuente de poder 85/265VAC. 1756-PA75R Allen Bradley | 1 | \$802,77 | \$802,77 |
| Fuente de poder 19-32VCC, 1756-PB75 Allen Bradley | 1 | \$735,50 | \$735,50 |
| Tarjeta de comunicación Ethernet para procesador control Logix (red administrativa) | 1 | \$1 100,00 | \$1 100,00 |
| Tarjeta de comunicación Modbus para procesador control Logix (red de campo) | 1 | \$307,20 | \$307,20 |
| Mano de obra instrumentistas | 1 | \$10 000,00 | \$10 000,00 |
| Mano de obra electricistas | 1 | \$10 000,00 | \$10 000,00 |
| Obra civil | 1 | \$2 000,00 | \$2 000,00 |
| TOTAL | | | \$215 485,74 |

Fuente: elaboración propia.

Costo de la inversión = US \$215 485,74

5.5.5. Costo de venta de 10 MW

El costo de venta de energía es de US \$ 0,06 por Kwh.

Por lo tanto, el costo de venta de 10 MW durante 150 días de zafra es:

$$CV_{10MW} = 10\,000Kw \times \frac{24h}{d} \times 150d \times \frac{\$0,06}{Kwh}$$

$$CV_{10MW} = \$2\,160,000$$

5.5.6. Utilidad neta de la venta de los 10 MW

La utilidad que se obtendrá por la venta de los 10 MW durante los 150 días de zafra es:

$$\begin{aligned} \text{Utilidad neta} &= CV_{10MW} - CTGE \\ \text{Utilidad neta} &= \$ 2\,160,000 - \$833\,300,90 \\ \text{Utilidad neta} &= \$ 1\,326\,699,09 \end{aligned}$$

5.5.7. Tiempo de recuperación de la inversión

$$\text{Tiempo de recuperación} = \frac{\text{Costo de la inversión}}{\text{Utilidad neta}}$$

$$\text{Tiempo de recuperación} = \frac{\$215\,485,74}{\$ 1\,326\,699,09}$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de recuperación} &= 0,17 \text{ años} \\ &\text{equivalente a 2 meses} \end{aligned}$$

5.6. Análisis costo-beneficio del proyecto

Este método se aplica con el fin de evaluar la eficiencia con que se utilizan todos los recursos en un proyecto determinado. Si los ingresos superan a los costos el proyecto es aceptable, en caso contrario el proyecto debe ser rechazado.

El criterio formal de decisión cuando se utiliza la relación beneficio/costo para evaluar alternativas, consiste en aceptar todos aquellos cuya relación beneficio/costo sea 1 o superior a 1. Si el resultado es menor que 1, indica que

el valor actual de los ingresos es menor que el valor de los costos y no se estaría recuperando la inversión.

$$\frac{\textit{Beneficio}}{\textit{Costo}} = \frac{\textit{ingresos}}{\textit{egresos}}$$

$$\frac{\textit{Beneficio}}{\textit{Costo}} = \frac{CV_{10MW}}{CTGE}$$

$$\frac{\textit{Beneficio}}{\textit{Costo}} = \frac{\$ 2\,160\,000}{\$833\,300,90}$$

$$\frac{\textit{Beneficio}}{\textit{Costo}} = 2,59$$

Como la relación beneficio/costo es mayor de 1, esto implica que los ingresos son mayores a los egresos, entonces el proyecto se recomienda para su ejecución.

5.6.1. Valor presente neto

Es una alternativa para tomar decisiones sobre una inversión, lo cual permite determinar de antemano si una inversión vale la pena o no realizarla, y de esta forma no hacer alguna mala inversión que en un futuro provoque pérdidas.

El valor presente neto (VPN) puede desplegar tres posibles respuestas, las cuales pueden ser:

$$VPN < 0$$

$$VPN = 0$$

$$VPN > 0$$

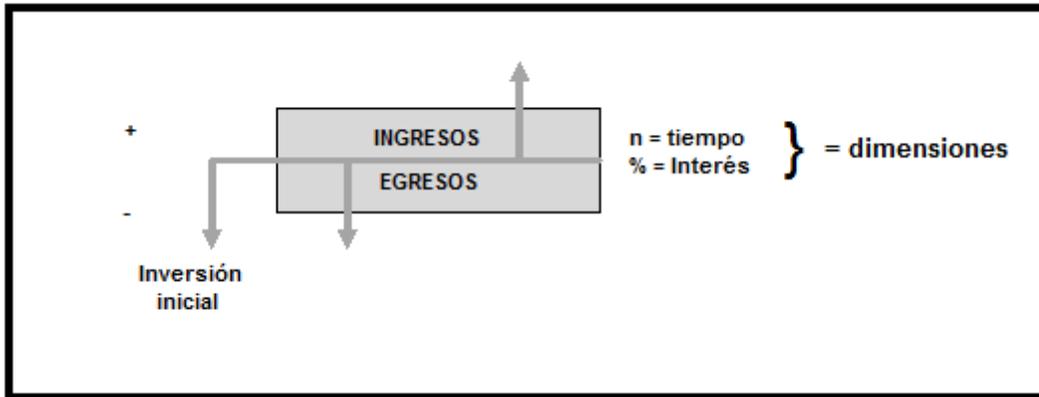
Cuando el $VPN < 0$ y el resultado es un valor negativo muy grande alejado de cero, está alertando o previniendo que el proyecto no es rentable, ya que se está estimando que habrán pocos ingresos y en el tiempo que se pretende recuperar la inversión no se logrará, pero cuando da un $VPN < 0$ cercano a cero está indicando, que la opción puede ser rentable y se pretende obtener una tasa de utilidad muy grande.

Cuando el $VPN = 0$ está indicando que exactamente se está generando el porcentaje de utilidad que se desea, y cuando el $VPN > 0$, está indicando que la opción es rentable y que inclusive podría incrementarse el porcentaje de utilidad.

5.6.2. La tasa interna de retorno

Es el promedio geométrico de los rendimientos futuros esperados de dicha inversión, y que implica por supuesto de una oportunidad para reinvertir.

Figura 60. Diagrama de flujo de efectivo



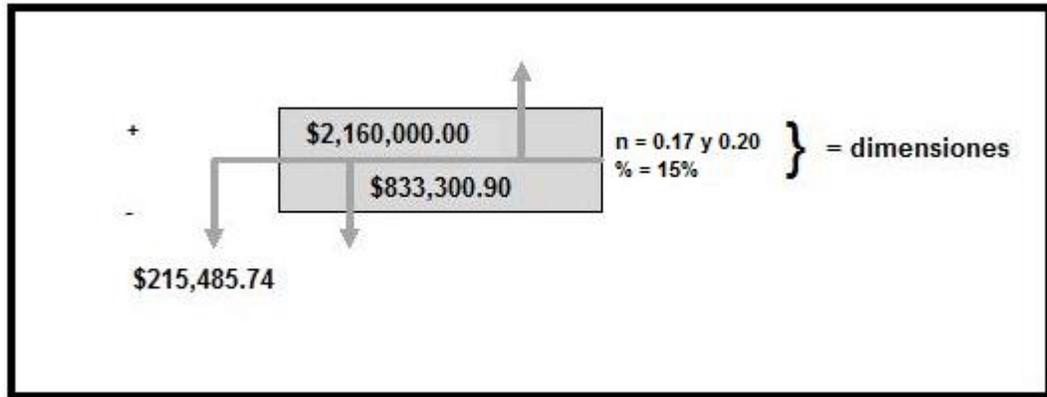
Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator.

Tabla XVII. Flujo de efectivo del proyecto

| | | |
|------------------------------------|--------------|--------------|
| Inversión inicial (costo proyecto) | \$215 485,74 | \$215 485,74 |
| Costo anual (CTGE) | \$833 300,90 | \$833 300,90 |
| Ingreso/año (costo de venta 10 MW) | \$ 2 160,000 | \$ 2 160,000 |
| Tiempo de recuperación en años | 0,17 | 0,2 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. Diagrama de flujo de efectivo del proyecto



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator.

A través de la ecuación siguiente se calcula el valor presente neto

$$VPN = -Inversión + (ingreso - egreso) \left(\frac{(1 + \%)^n - 1}{\% \times (1 + \%)^n} \right)$$

$$VPN = -Inversión + (utilidad neta) \left(\frac{(1 + \%)^n - 1}{\% \times (1 + \%)^n} \right)$$

Para el proyecto se analizará el VPN con 0,17 y 0,2 años

Donde:

n = 0,17 y 0,2 años

% = 15 % (tasa de interés del proveedor)

Utilizando $n=0,17$

$$VPN = -\$215\,485,74 + (\$1\,326\,699,09) \left(\frac{(1 + 0,15)^{0,17} - 1}{0,15 \times (1 + 0,15)^{0,17}} \right)$$

$$VPN = -\$7\,817,56$$

Para 0,17 años dio un valor negativo el cual indica que no es rentable el proyecto.

Ahora se utilizan $n=0,2$ años

$$VPN = -\$215\,485,74 + (\$1\,326\,699,109) \left(\frac{(1 + 0,15)^{0,2} - 1}{0,15 \times (1 + 0,15)^{0,2}} \right)$$

$$VPN = \$2\,832,29$$

El resultado muestra que el proyecto si es favorable para un periodo de 0,2 años.

5.6.3. La tasa interna de retorno

Conceptualmente se define como la tasa máxima de utilidad que puede pagarse u obtenerse en la evaluación de una alternativa.

La tasa interna de retorno se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$P = \text{Anualidad (o mensualidad)} \left(\frac{P}{A}, i, n \right).$$

Donde:

$$\frac{P}{A} = \frac{((1+i)^n - 1)}{i \times (1+i)^n}$$

$$0 = -Inversión + (utilidd\ neta) \left(\frac{P}{A}, i, n \right)$$

Utilizando $i=60\%$ se encuentra que:

$$0 = -\$215\,485,74 + (\$ 1\,326\,699,09) \left(\frac{P}{A}, 50\%, 0,2 \right) = -8\,807,01$$

Como dio un valor negativo, ahora se utilizan $i=40\%$ y ahora se encuentra que:

$$0 = -\$215\,485,74 + (\$ 1\,326\,699,09) \left(\frac{P}{A}, 40\%, 0,2 \right) = 368,61$$

Teniendo ya el valor negativo y el positivo se procede a utilizar la interpolación matemática para hallar la tasa de interés que se busca:

Tabla XVIII. **Tasa de interés para el retorno del proyecto**

| | |
|----------|-----------|
| 40 | 368,61 |
| <i>i</i> | 0 |
| 50 | -8 807,01 |

$$\frac{40 - 50}{40 - i} = \frac{368,61 - (-8\ 807,01)}{368,61 - 0}$$
$$i = 40,40 \%$$

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, la tasa de interés es superior a la que se estableció por el sistema bancario (15 %). Este valor (40,40 %) indica con qué interés va a retornar la inversión de \$215 485,74.

CONCLUSIONES

1. Por medio del estudio tecnoeconómico, se pudo determinar que el costo de la inversión de la propuesta de automatizar el turbogenerador de escape de 4 MW en un ingenio azucarero, se recupera en plazo de 0,2 zafras de 150 días, lo que hace que el proyecto sea rentable.
2. Se logró describir el funcionamiento de las calderas, turbinas, turbogeneradores y los elementos de automatización.
3. Se analizaron todos los elementos que influyen en la operación manual de la turbina de vapor del turbogenerador de escape y con esto se logró determinar, qué piezas eran las que se debían modificar y cuáles se debían agregar para tener la máquina en automático.
4. Se estableció la estructura del sistema de automatización, donde se realizó la selección de las variables y las estrategias a nivel de proceso, para tener la automatización como una herramienta competitiva.
5. Se implementó el sistema de control automático, donde se representan en 4 gráficos las mediciones y lecturas correspondientes a la operación del turbogenerador de escape.
6. Con el estudio tecnoeconómico se logró determinar que la caldera núm. 1, que genera el vapor para el funcionamiento del turbogenerador de escape Worthington, tiene una eficiencia del 55,53 %. Tomando en cuenta que la caldera núm. 1 genera 140 toneladas cortas equivalente a

280 000 lb de vapor hora, y con los datos se logró obtener que el consumo real de la turbina de vapor del turbogenerador es igual a 235 410 lb de vapor hora. Se puede considerar pérdida de 44 590 lb de vapor en la tubería de la caldera hacia la turbina.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis más detallado sobre las pérdidas de energía de la caldera núm. 1, debido a que la eficiencia de combustión es demasiado baja.
2. Realizar un análisis termográfico en todo el contorno de la caldera para determinar si existen pérdidas de energía por falta de aislamiento térmico.
3. Revisar la tubería de vapor que sale de la caldera núm. 1 hacia la entrada de la turbina de vapor Worthington, ya que según los cálculos realizados se tienen pérdidas de vapor en este trayecto.

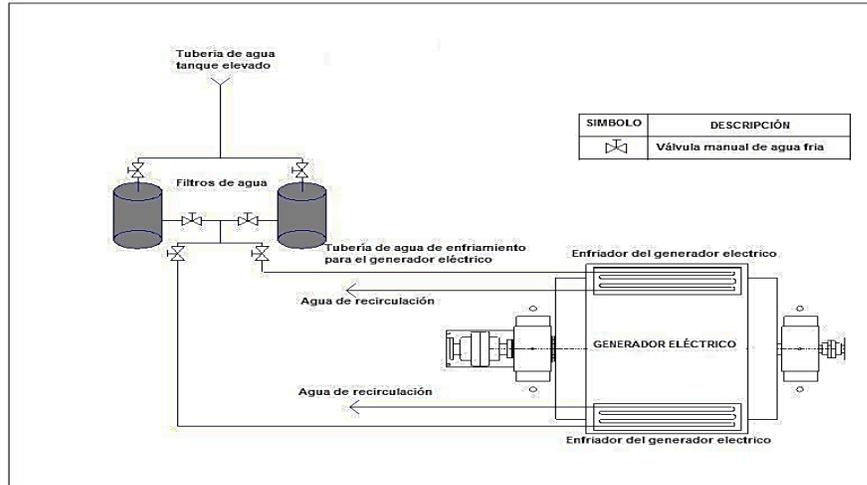
BIBLIOGRAFÍA

1. BLANK, Leland. *Ingeniería económica*. 5a ed. México, McGraw-Hill Interamericana, 2004. 92 p.
2. CENGEL, Yunus A. *Termodinámica*. 5ª ed. México. McGraw-Hill Interamericana, 2006. 181 p.
3. CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. 4a ed. México, McGraw-Hill Interamericana, 2005. 327 p.
4. GE MULTILIN. *489 Generator Management Relay Instruction Manual*. 2008. 314 p.
5. HUGOT, E. *Manual para ingenieros azucareros*. México 1984. 182 p.
6. JUÁREZ FERRER, José. *Desarrollo de procedimientos operativos del equipo de una central termoeléctrica y mejoras al sistema de gobierno en turbinas*. Trabajo de graduación de Ing. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, División de Estudios de Post-Grado, Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 1999. 180 p.

7. LANDAVERRY VILLEDA, César Adalberto. *Actualización del balance energético del ingenio los Tarros*. Trabajo de graduación de Ing. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1996. 363 p.
8. Manual de Instalación, Operación y Mantenimiento de Turbogeneradores, No. del documento: 9300.0051, material 10656299, revisión: 0, Julio, 2008.
9. MORALES, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistemas de potencia*. Guatemala. 2005. 229 p.
10. PARK, Chan. *Ingeniería económica contemporánea*. USA, 1997. 481 p.
11. SIQUINA SÁNCHEZ, Rufino Gregorio. *Análisis termodinámico para el mejoramiento de la eficiencia de operación de la caldera del ingenio Tzulá*. Trabajo de graduación de Ing. Universidad de San Carlos de Guatemala,. Facultad de Ingeniería, 2009. 147 p.
12. TURBINE-DRIVEN GENERATORS. *Instruction Book No. 86 for installing, operating and maintaining the E-M*. Minneapolis 13, Minnesota. 235 p.
13. TUTORIAL IEEE DE PROTECCIÓN DE GENERADORES SINCRÓNICOS Presentado por: The Power Engineering Education Committee. Power System Relaying Committee. 88 p.

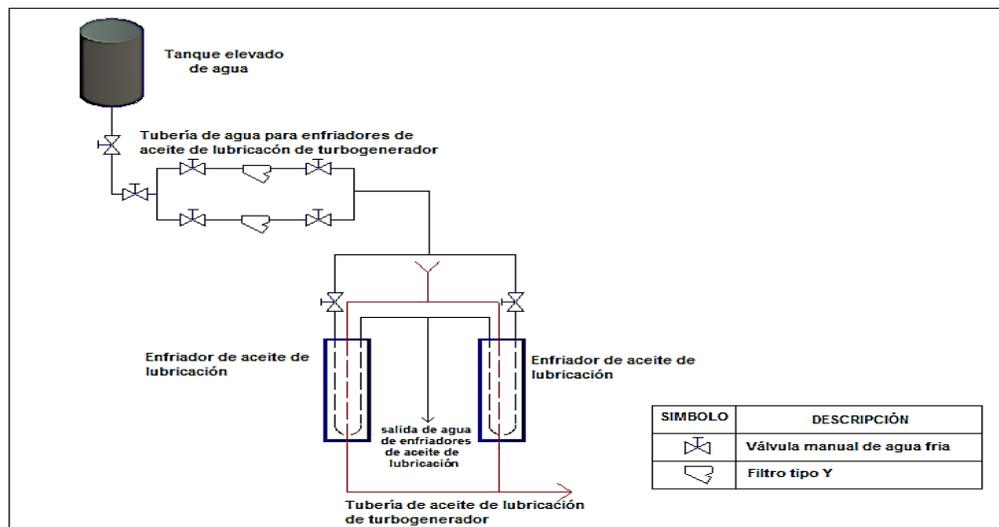
14. WOODWARD GOVERNOR COMPANY. *UG8 Governor, Dial Control Bulletin 03004*. Rockford, Illinois, April 1945.
15. _____. *UG32 Governor, Dial Control Bulletin UG32D947*. Rockford, Illinois, September 1947.
16. Woodward Installation and Operation Manual 505 Digital Governor for Steam Turbines with Single or Split-Range Actuators. Volume 1. Manual 85017V1 (Revision B) 418 p.
17. _____. 505E Digital Governor for Extraction Steam Turbines. Volume 1. Manual 85018V1 (Revision B).
18. _____. 505E Digital Governor for Extraction Steam Turbines. Volume 2. Manual 85018V2 (Revision C).
19. Woodward Installation and Operation SPC Servo Position Controller. Manual 26236 (Revision H).
20. Woodward Product Specification. UG40 Actuator Hydraulic Powered Electric Actuator for Control of Larger Engines, Manual 37516 (Rev. A).

Apéndice 2 **Esquema actual de enfriamiento del generador eléctrico**



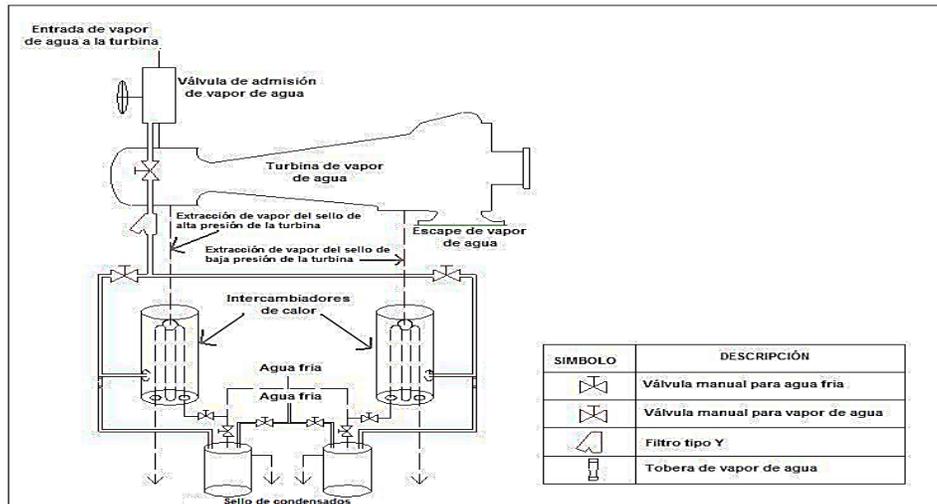
Fuente: Ingenio Santa Ana.

Apéndice 3. **Esquema actual de enfriamiento de la lubricación del turbogenerador de escape**



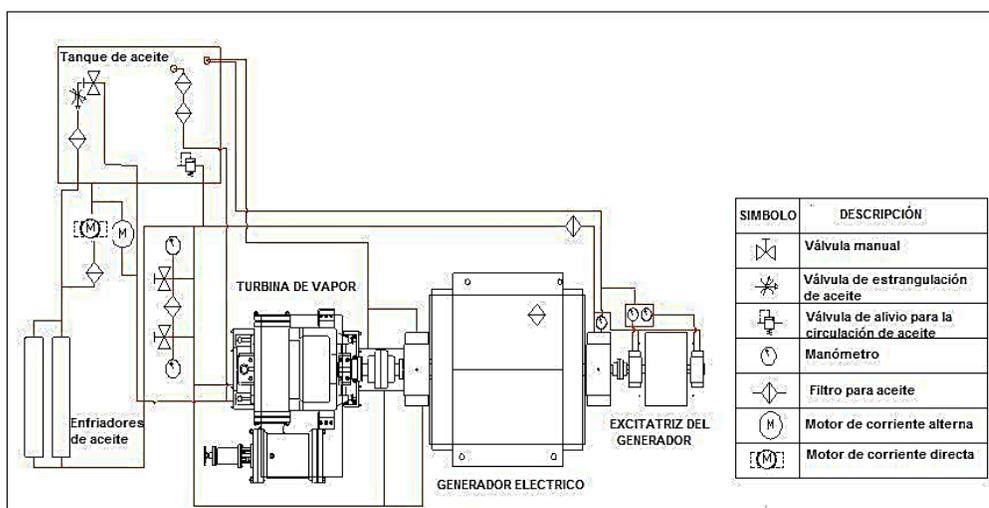
Fuente: Ingenio Santa Ana.

Apéndice 4. **Esquema actual de extracción de vapor de sellos de la turbina**



fuelle: Ingenio Santa Ana.

Apéndice 5. **Esquema actual de lubricación de aceite del turbogenerador de escape de vapor de 4 MW.**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

ANEXOS

Anexo 1: **Tabla I Benchmarking fabricantes de equipo de automatización**

|  | | Honeywell | USDATA | PCSOFT | Rockwell | Wonderware | Intellution |
|---|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| CRITÉRIO | PESO | Scan3000 | FactoryLink | Wizcon 7.x | RSView32 6.x | InTouch 7.x | Fix32 6.x |
| Ambiente Operacional | Elim. | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| Interface de Operação | 15 | 32,40 | 39,45 | 41,25 | 37,50 | 38,55 | 48,15 |
| Interface com o Campo | 15 | 52,50 | 52,50 | 45,00 | 45,00 | 52,50 | 56,25 |
| Arquitetura de Software | 13 | 37,70 | 44,20 | 37,70 | 44,20 | 44,20 | 44,20 |
| Configuração | 11 | 33,00 | 32,89 | 38,61 | 40,59 | 36,19 | 41,36 |
| Manutenção | 10 | 31,00 | 36,00 | 40,00 | 33,50 | 35,00 | 40,00 |
| Custo | 10 | 17,50 | 17,00 | 20,50 | 27,50 | 31,00 | 30,50 |
| Utilitários Disponíveis | 8 | 14,00 | 19,20 | 32,00 | 26,00 | 32,00 | 32,00 |
| Conectividade | 8 | 16,60 | 20,80 | 18,40 | 20,00 | 20,00 | 25,60 |
| Qualidade do Fornecedor | 6 | 10,20 | 19,20 | 15,60 | 15,60 | 19,50 | 20,70 |
| Documentação | 4 | 10,40 | 10,40 | 10,40 | 10,40 | 10,40 | 10,40 |
| TOTAL GERAL DE PONTOS | | 255,50 | 291,64 | 299,46 | 300,29 | 319,34 | 349,16 |

Fuente: Manual De Instrucciones Relé de protección SR489. p. 95.

:

Anexo 2: **Estandares de comunicación**

| Estándares de comunicación | | | | |
|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Estándar | RS232 | RS423 | RS422 | RS485 |
| No. drivers/receivers | 1 driver 1 receiver | 1 driver 10 receivers | 1 driver 10 receivers | 32 drivers 32 receivers |
| Longitud max. Cable | 15m | 1200m | 1200m | 1200m |
| Velocidad max. | 20 Kb/s | 100 Kb/s | 10 Mb/s | 10 Mb/s |
| Carga por driver | 3 kΩ a 7kΩ | 450 Ω min | 100 Ω min | 54 Ω |
| Rango tensión de entrada en receptor | ± 15V | ± 12V | ± 7V | (-)7V a 12V |
| Sensibilidad del receptor | ± 3V | ± 200mV | ± 200mV | ± 200mV |

Fuente: Manual De Instrucciones Relé de protección SR489. p. 112.

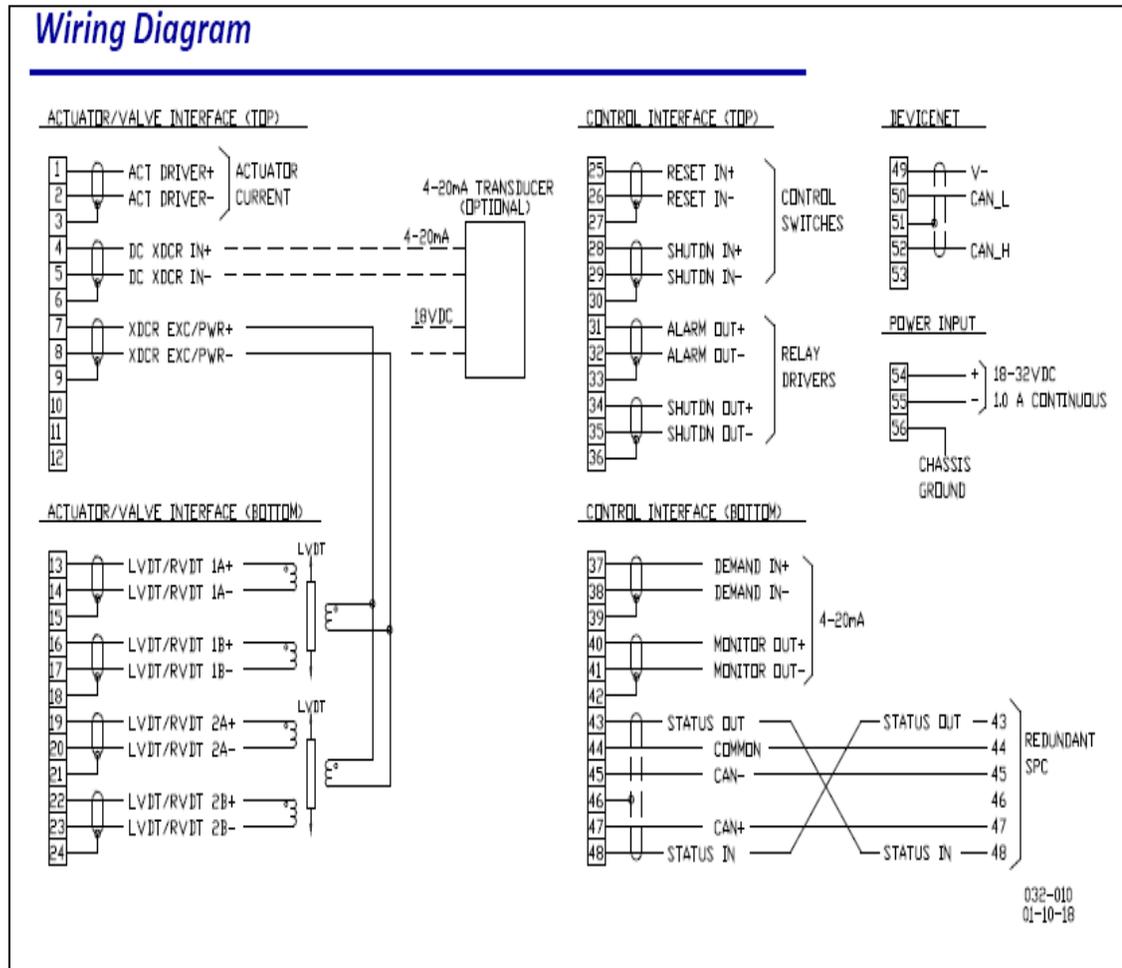
Anexo 3. Comparación de características entre algunos buses y protocolos

Tabla 1. Comparación de características entre algunos buses y protocolos

| Nombre | Topología | Soporte | Max. dispositivos | Rate Transm. bus | Distancia máx. bus | Comunicación |
|-------------------------|---|--|------------------------|------------------|-----------------------|--|
| Profibus DP | línea, estrella y anillo | par trenzado fibra óptica | 127/segm | Hasta 1.5M y 12M | 0.1 segm 24 fibra | Master/Slave peer to peer |
| Profibus PA | línea, estrella y anillo | par trenzado fibra óptica | 14400 /segm | 31.5K | 0.1 segm 24 fibra | Master/Slave peer to peer |
| Profibus FMS | | par trenzado fibra óptica | 127/segm | 500K | | Master/Slave peer to peer |
| Foundation Fieldbus HSE | estrella | par trenzado fibra óptica | 240 p/segm 32.768 sist | 100M | 0.1 par 2 fibra | Single/multi master |
| Foundation Fieldbus H1 | estrella o bus | par trenzado fibra óptica | 240 p/segm 32.768 sist | 31.25K | 1.9 cable | Single/multi master |
| LonWorks | bus, anillo, lazo, estrella | par trenzado fibra óptica coaxial, radio | 32768 /dom | 500K | 2 | Master/Slave peer to peer |
| Interbus-S | segmentado | par trenzado fibra óptica | 256 nodos | 500K | 400/segm 12.8 total | Master/Slave |
| DeviceNet | troncal/puntual c/bifurcación | par trenzado fibra óptica | 2048 nodos | 500K | 0.5 6 c/repetid | Master/Slave, multi-master, peer to peer |
| AS-I | bus, anillo, arbol, estrella | par trenzado | 31 p/red | 167K | 0.1, 0.3 c/rep | Master/Slave |
| Modbus RTU | línea, estrella, arbol, red con segmentos | par trenzado coaxial radio | 250 p/segm | 1.2 a 115.2K | 0.35 | Master/Slave |
| Ethernet Industrial | bus, estrella, malla-cadena | coaxial par trenzado fibra óptica | 400 p/segm | 10, 100M | 0.1 100 mono c/switch | Master/Slave peer to peer |
| HART | | par trenzado | 15 p/segm | 1.2K | | Master/Slave |

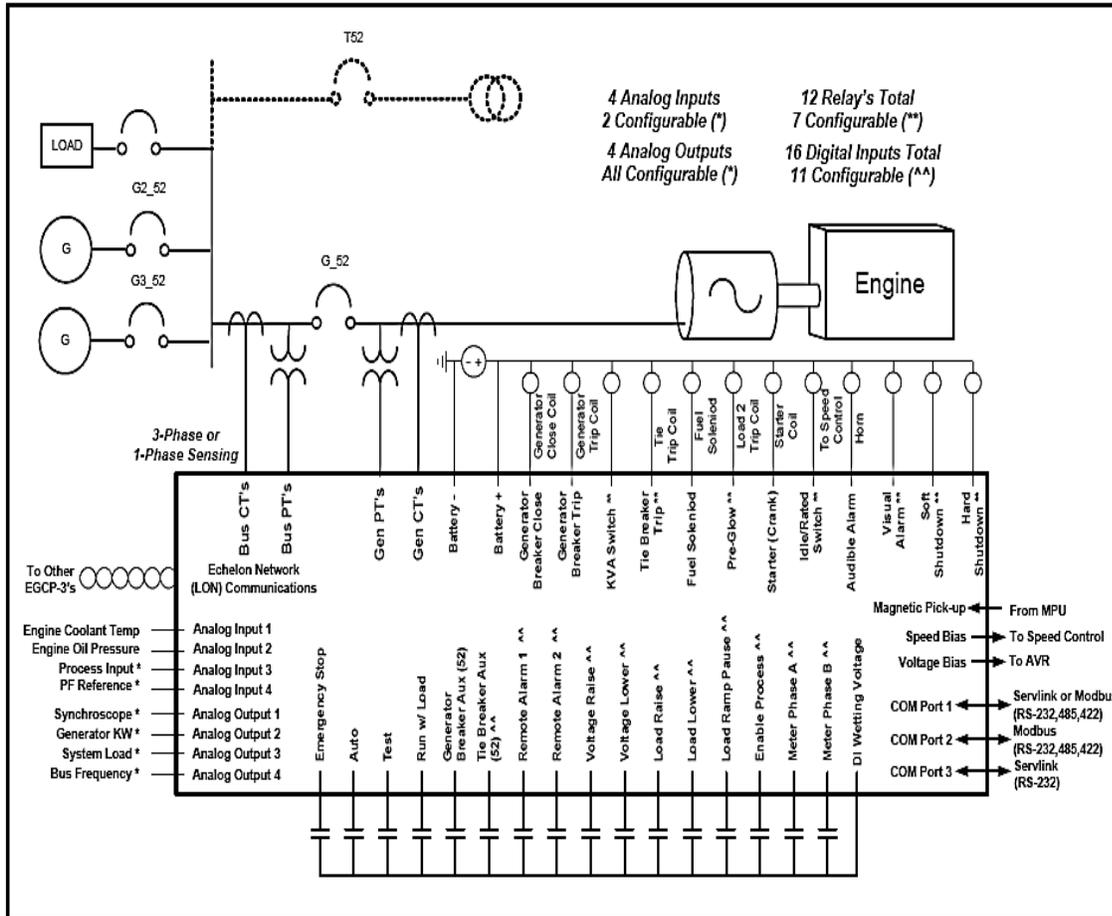
Fuente: Manual De Instrucciones Relé de protección SR489. p.156.

Anexo 4. Diagrama de conexiones del SPC



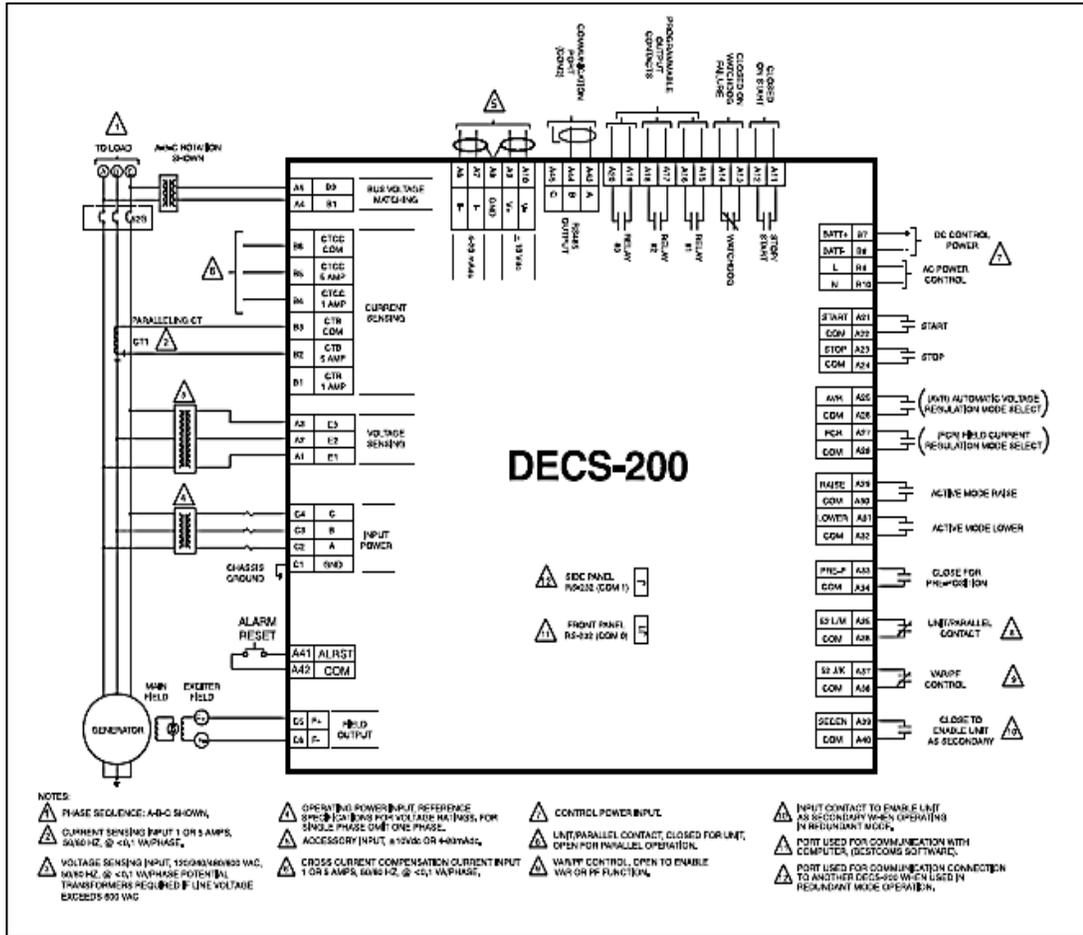
Fuente: Manual de instrucciones Relé de protección SR489. p.172.

Anexo 5. Interacciones del EGCP-3LS



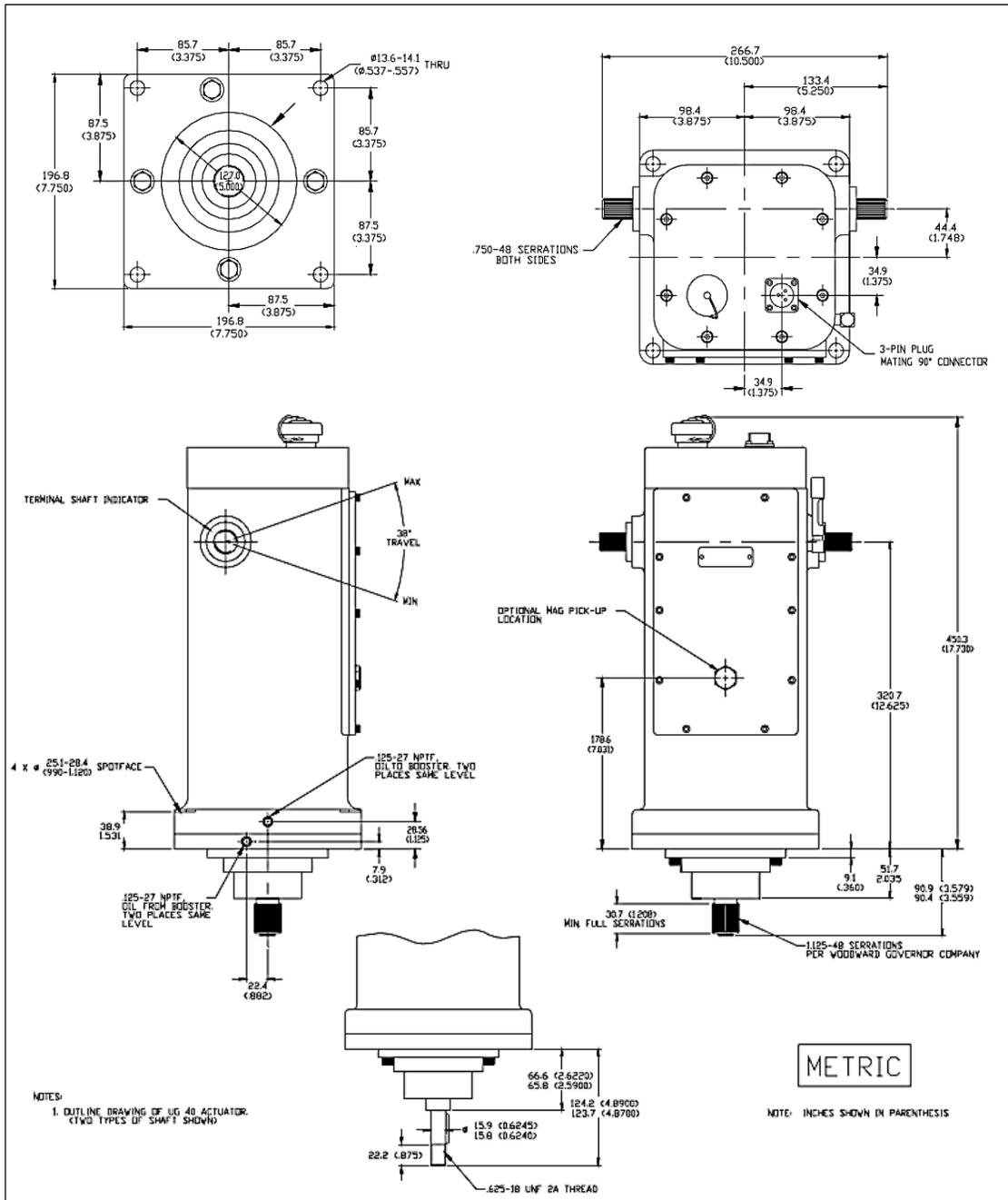
Fuente: Manual de instrucciones Relé de protección SR489. p.198.

Anexo 6: Diagrama típico de conexiones del DECS-200



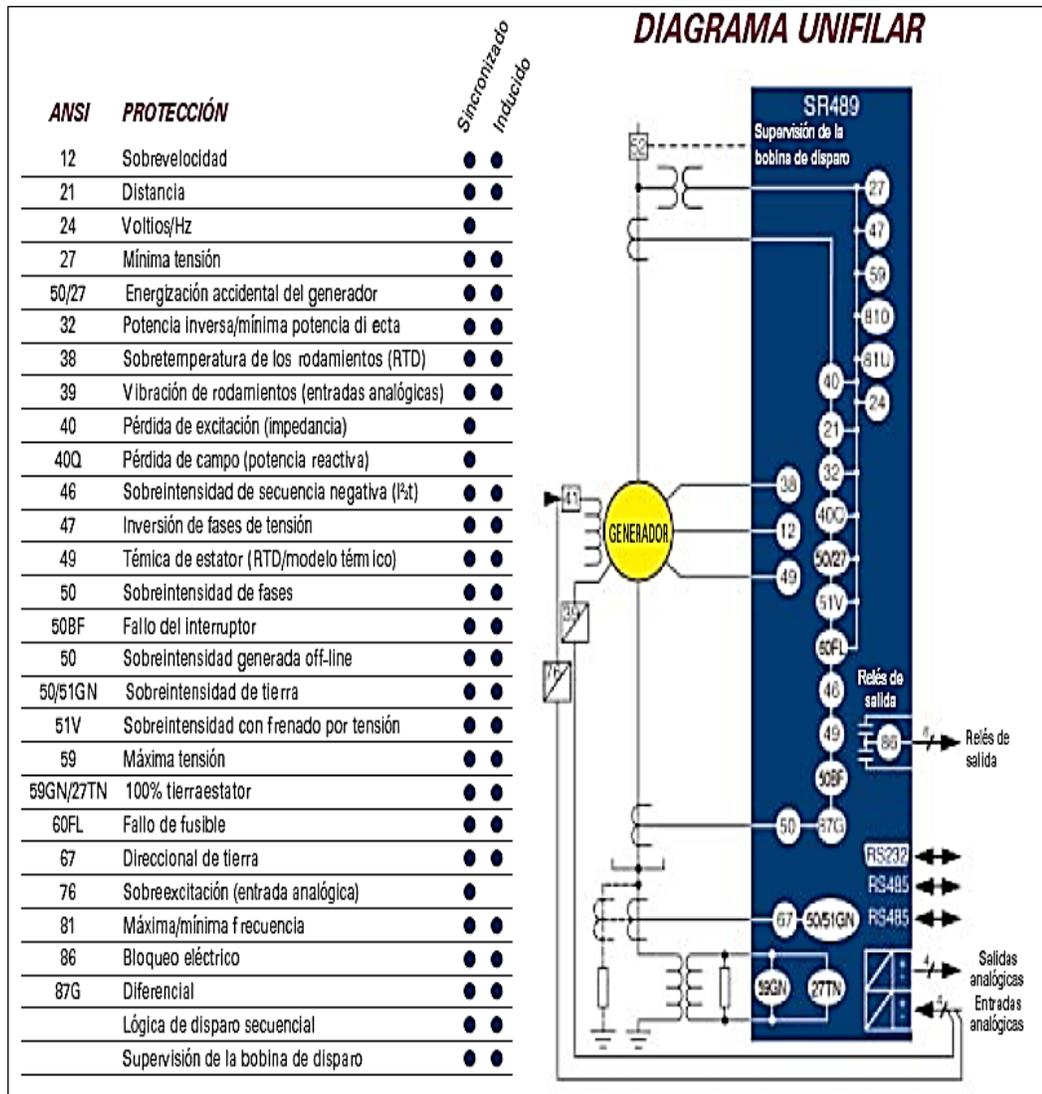
Fuente: BALER ELECTRIC. DECS-200 Digital Excitation Control System. Request Publication 9360100990. ILLINOIS, U.S.A. Pag. 8.

Anexo 7. Dimensiones del actuador Woodward UG-40



Fuente: Manual de instrucciones Relé de protección SR489. p.156.

Anexo 8. Diagrama unifilar de protecciones del relevador Multifunciones SR489



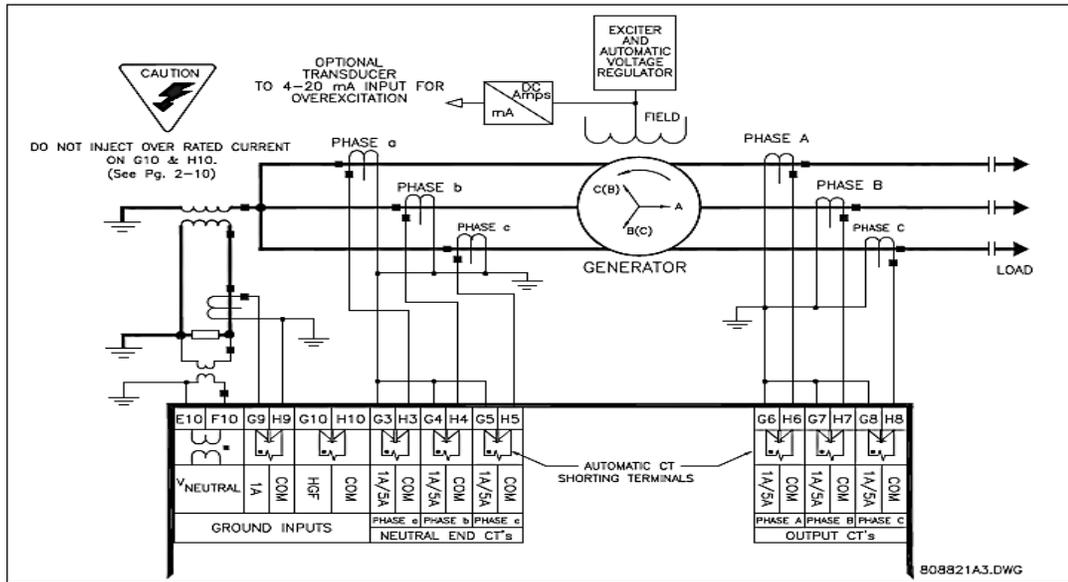
Fuente: Manual de instrucciones Relé de protección SR489. p. 87.

Anexo 9. Terminales eléctricas físicas de conexión del relevador SR489

| TERMINAL | DESCRIPTION | TERMINAL | DESCRIPTION |
|----------|-------------------------------------|----------|-----------------------|
| A01 | RTD #1 HOT | D21 | ASSIGNABLE SW. 06 |
| A02 | RTD #1 COMPENSATION | D22 | ASSIGNABLE SW. 07 |
| A03 | RTD RETURN | D23 | SWITCH COMMON |
| A04 | RTD #2 COMPENSATION | D24 | SWITCH +24 V DC |
| A05 | RTD #2 HOT | D25 | COMPUTER RS485 + |
| A06 | RTD #3 HOT | D26 | COMPUTER RS485 - |
| A07 | RTD #3 COMPENSATION | D27 | COMPUTER RS485 COMMON |
| A08 | RTD RETURN | E01 | R1 TRIP NC |
| A09 | RTD #4 COMPENSATION | E02 | R1 TRIP NO |
| A10 | RTD #4 HOT | E03 | R2 AUXILIARY COMMON |
| A11 | RTD #5 HOT | E04 | R3 AUXILIARY NC |
| A12 | RTD #5 COMPENSATION | E05 | R3 AUXILIARY NO |
| A13 | RTD RETURN | E06 | R4 AUXILIARY COMMON |
| A14 | RTD #6 COMPENSATION | E07 | R5 ALARM NC |
| A15 | RTD #6 HOT | E08 | R5 ALARM NO |
| A16 | ANALOG OUT COMMON - | E09 | R6 SERVICE COMMON |
| A17 | ANALOG OUT 1 + | E10 | NEUTRAL VT COMMON |
| A18 | ANALOG OUT 2 + | E11 | COIL SUPERVISION + |
| A19 | ANALOG OUT 3 + | E12 | IRIG-B + |
| A20 | ANALOG OUT 4 + | F01 | R1 TRIP COMMON |
| A21 | ANALOG SHIELD | F02 | R2 AUXILIARY NO |
| A22 | ANALOG INPUT 24 V DC POWER SUPPLY + | F03 | R2 AUXILIARY NC |
| A23 | ANALOG INPUT 1 + | F04 | R3 AUXILIARY COMMON |
| A24 | ANALOG INPUT 2 + | F05 | R4 AUXILIARY NO |
| A25 | ANALOG INPUT 3 + | F06 | R4 AUXILIARY NC |
| A26 | ANALOG INPUT 4 + | F07 | R5 ALARM COMMON |
| A27 | ANALOG INPUT COMMON - | F08 | R6 SERVICE NO |
| B01 | RTD SHIELD | F09 | R6 SERVICE NC |
| B02 | AUXILIARY RS485 + | F10 | NEUTRAL VT + |
| B03 | AUXILIARY RS485 - | F11 | COIL SUPERVISION - |
| B04 | AUXILIARY RS485 COMMON | F12 | IRIG-B - |
| C01 | ACCESS + | G01 | PHASE VT COMMON |
| C02 | ACCESS - | G02 | PHASE A VT • |
| C03 | BREAKER STATUS + | G03 | NEUTRAL PHASE A CT • |
| C04 | BREAKER STATUS - | G04 | NEUTRAL PHASE B CT • |
| D01 | RTD #7 HOT | G05 | NEUTRAL PHASE C CT • |
| D02 | RTD #7 COMPENSATION | G06 | OUTPUT PHASE A CT • |
| D03 | RTD RETURN | G07 | OUTPUT PHASE B CT • |
| D04 | RTD #8 COMPENSATION | G08 | OUTPUT PHASE C CT • |
| D05 | RTD #8 HOT | G09 | 1A GROUND CT • |
| D06 | RTD #9 HOT | G10 | HGF GROUND CT • |
| D07 | RTD #9 COMPENSATION | G11 | FILTER GROUND |
| D08 | RTD RETURN | G12 | SAFETY GROUND |
| D09 | RTD #10 COMPENSATION | H01 | PHASE B VT • |
| D10 | RTD #10 HOT | H02 | PHASE C VT • |
| D11 | RTD #11 HOT | H03 | NEUTRAL PHASE A CT |
| D12 | RTD #11 COMPENSATION | H04 | NEUTRAL PHASE B CT |
| D13 | RTD RETURN | H05 | NEUTRAL PHASE C CT |
| D14 | RTD #12 COMPENSATION | H06 | OUTPUT PHASE A CT |
| D15 | RTD #12 HOT | H07 | OUTPUT PHASE B CT |
| D16 | ASSIGNABLE SW. 01 | H08 | OUTPUT PHASE C CT |
| D17 | ASSIGNABLE SW. 02 | H09 | 1A GROUND CT |
| D18 | ASSIGNABLE SW. 03 | H10 | HGF GROUND CT |
| D19 | ASSIGNABLE SW. 04 | H11 | CONTROL POWER - |
| D20 | ASSIGNABLE SW. 05 | H12 | CONTROL POWER + |

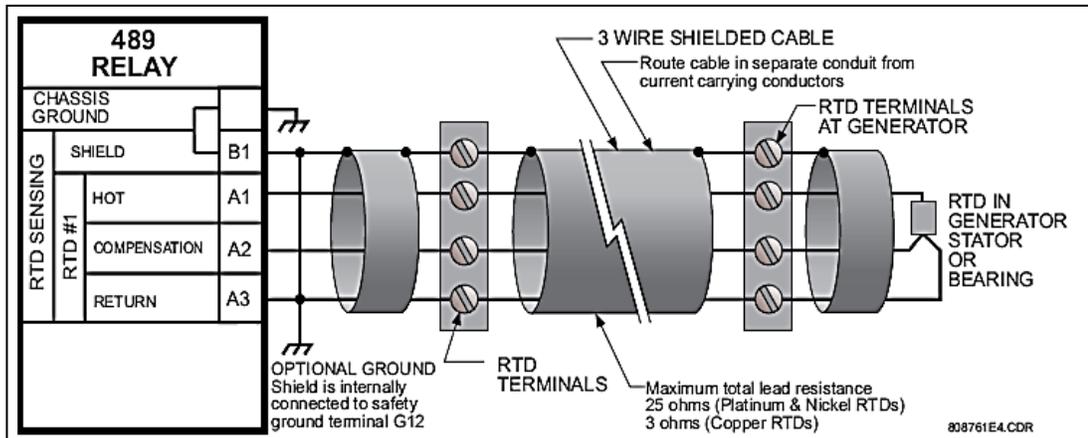
Fuente: Manual de instrucciones Relé de protección SR489. p. 105.

Anexo 10. Detalles de cableado del SR489



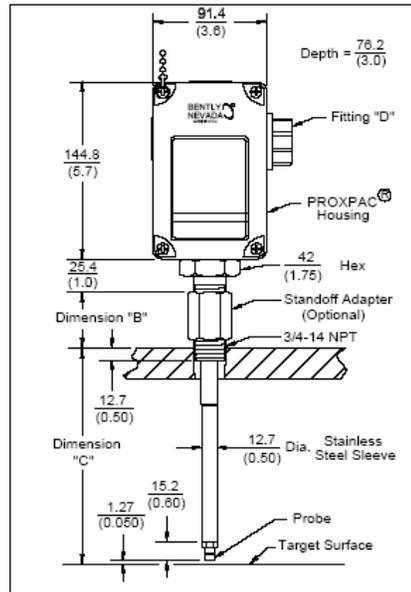
Fuente: Manual de instrucciones Relé de protección SR489. p. 111.

Anexo 11. Diagrama de cableado de RTD's del SR 489



Fuente: Manual de instrucciones Relé de protección SR489. 117.

Anexo 12. Dimensiones del sensor de proximidad PROXPAC



Fuente: Manual De Instrucciones Relé de protección SR489. 137.