



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODERNIZACIÓN DEL MOTOR A VAPOR DEL
LABORATORIO DE TERMODINÁMICA PARA DESARROLLAR
BALANCES EXERGÉTICOS

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

SALINAS VILLACÍS, RODRIGO ANÍBAL
MARTÍNEZ TORRES, HENRY PAÚL

DIRECTOR: ING. LOZA MATOVELLE, DAVID CESAR

Sangolquí – Ecuador
2017 – 08 – 24



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación "MODERNIZACIÓN DEL MOTOR A VAPOR DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA PARA DESARROLLAR BALANCES EXERGÉTICOS", realizado por los señores Rodrigo Aníbal Salinas Villacís y Henry Paul Martínez Torres, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 24 de agosto de 2017

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'David Loza'.

ING. DAVID LOZA
DIRECTOR



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

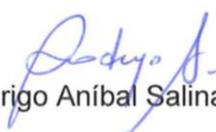
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Los señores, RODRIGO ANÍBAL SALINAS VILLACÍS, con cedula de Identidad N° 1716303316 y HENRY PAUL MARTÍNEZ TORRES con cedula de Identidad N°1003643457 declaramos que este trabajo de titulación “MODERNIZACIÓN DEL MOTOR A VAPOR DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA PARA DESARROLLAR BALANCES EXERGÉTICOS”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 24 de agosto de 2017


Rodrigo Aníbal Salinas Villacís
1716303316


Henry Paúl Martínez Torres
1003643457



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

AUTORIZACIÓN

Los señores, RODRIGO ANÍBAL SALINAS VILLACÍS, con cedula de Identidad N° 1716303316 Y HENRY PAUL MARTÍNEZ TORRES con cedula de Identidad N°1003643457, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “MODERNIZACIÓN DEL MOTOR A VAPOR DEL LABORATORIO DE TERMODINÁMICA PARA DESARROLLAR BALANCES EXERGÉTICOS”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 24 de agosto de 2017


Rodrigo Aníbal Salinas Villacís
1716303316


Henry Paúl Martínez Torres
1003643457

DEDICATORIA

El presente proyecto se encuentra dedicado a nuestros padres que con su ejemplo de superación y valioso apoyo en todo momento desde el inicio de nuestros estudios.

A nuestros hermanos, familiares y amigos que siempre apoyaron con sus palabras de aliento para poder finalizar el proyecto.

Queremos agradecer a aquellas personas que compartieron sus conocimientos con nosotros para hacer posible la conclusión de esta tesis. Un agradecimiento especial a nuestro director Msc. David Loza por su asesoría siempre dispuesta.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I	1
GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del problema	3
1.3 Justificación e importancia.....	3
1.4 Área de influencia.....	3
1.5 Objetivos.....	4
1.5.1 Objetivo general.....	4
1.5.2 Objetivos específicos	4
1.6 Alcance.....	5
1.7 Estructura del Documento	5
CAPÍTULO II	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 Ciclos termodinámicos de potencia de vapor	7
2.1.1 Ciclo Carnot.....	7
2.1.2 Ciclo Rankine.....	9
2.2 Componentes del Ciclo Rankine	13
2.2.1 Motor a vapor.....	13
2.2.2 Caldero de vapor	14
2.2.3 Condensador	19

2.2.4	Bomba hidráulica	24
2.3	Planta de vapor	27
2.4	Funcionamiento del Banco de Pruebas Motor a Vapor	28
2.5	Mantenimiento	29
2.5.1	Sistemas de Mantenimiento.....	29
2.6	Resumen	30
CAPITULO III	32
SELECCIÓN DE ELEMENTOS Y CORRECCIÓN DE FALLAS	32
3.1	Mantenimiento del Banco de Pruebas.....	32
3.1.1	Parámetros del Banco de Pruebas	33
3.2	Situación actual del Banco de Pruebas	33
3.3	División del Banco de Pruebas en sistemas.....	34
3.3.1	Sistema de Alimentación del BPMV.....	35
3.3.2	Sistema de Generación de Vapor	46
3.3.2.1.1	Cuerpo y Bridas de Caldero	49
3.3.3	Sistema de Trabajo.....	61
3.3.4	Sistema de Intercambio de Calor	66
3.4	Resumen	71
CAPÍTULO IV	73
SITUACIÓN ACTUAL DEL EQUIPO MODERNIZADO	73
4.1	Sistema de Alimentación	74
4.1.1	Tanque de Almacenamiento	74
4.1.2	Válvulas Check	75
4.1.3	Sensor de Temperatura	76
4.2	Sistema de generación de Vapor	77
4.2.1	Caldero	78
4.2.2	Cartuchos de Inmersión.....	90
4.2.3	Sistemas de Control del Caldero	93
4.3	Sistema de trabajo.....	106
4.3.1	Temperatura de Salida del Motor a Vapor	107
4.4	Sistema de Intercambio de Calor	107

4.4.1 Medidor de Caudal.....	107
4.5 Tuberías	108
4.6 Resumen	110
4.7 Ficha técnica del equipo actual	111
CAPÍTULO V.....	112
PRUEBAS Y RESULTADOS	112
5.1 Pruebas de verificación de funcionamiento de los sistemas del BPMV	112
5.1.1 Pruebas de funcionamiento del sistema de alimentación ...	112
5.1.2 Pruebas de funcionamiento del sistema de generación de vapor	114
5.1.3 Pruebas de funcionamiento del sistema de trabajo	118
5.1.4 Pruebas de funcionamiento del sistema de intercambio de calor	120
5.1.5 Pruebas de funcionamiento de adquisición de datos en el computador a través del programa SITRAD	122
5.2 Resumen	125
CAPÍTULO VI.....	126
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
6.1 Conclusiones.....	126
6.2 Recomendaciones.....	127
BIBLIOGRAFÍA.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Intercambiador de Calor de Flujo Aire-Agua.....	1
Figura 2 Torre de Enfriamiento.....	2
Figura 3 Planta de Vapor del LCEE.....	2
Figura 4 Ciclo Carnot Fuente: (Física Termodinámica, 2011)	7
Figura 5 Ciclo Rankine Fuente (Montaño, 2009)	10
Figura 6 Diagrama T-s del Ciclo Rankine Fuente: (Luna, 2016)	11
Figura 7 Componentes Ciclo Rankine	13
Figura 8 Esquema de un Motor a Vapor.....	14
Figura 9 Partes del Caldero.....	14
Figura 10 Clasificación de Calderos	15
Figura 11 Caldero Pirotubular Fuente: (Babcockwanson, 2011)	16
Figura 12 Caldero Acuotubular.....	17
Figura 13 Caldero de Tiro Natural	18
Figura 14 Caldero con Tiro Artificial.....	19
Figura 15 Funcionamiento de un Condensador enfriado por Agua	20
Figura 16 Clasificación de los Condensadores.....	20
Figura 17 Partes de Condensador Enfriado por Aire	21
Figura 18 Condensador de Tubos Concéntricos	22
Figura 19 Condensador de carcasa y serpentín.....	22
Figura 20 Condensador de Carcasa y Tubos	23
Figura 21 Descripción de un Condensador Evaporativo.....	23
Figura 22 Clasificación de Bombas de Desplazamiento Positivo	24
Figura 23 Bomba de Pistón	25
Figura 24 Bomba de Engranés.....	26

Figura 25 Bomba de Diafragma.....	26
Figura 26 Bomba de Paletas de Eje Excéntricos.....	27
Figura 27 Descripción de una Planta de Vapor	28
Figura 28 Motor a Vapor.....	29
Figura 29 Sistemas de Mantenimiento	30
Figura 30 Etapas de Mantenimiento del BPMV	33
Figura 31 Esquema del Banco de Pruebas Motor a Vapor BPMV.....	34
Figura 32 Sistemas del BPMV	35
Figura 33 Flujograma detección de fallas en el S. de Alimentación.....	36
Figura 34 Funcionamiento Válvulas Check	38
Figura 35 Termopozos para los NTC's.....	44
Figura 36 Comparación del Sistema de Alimentación	45
Figura 37 Flujograma detección de fallas en el S. Generación de Vapor	48
Figura 38 Mapa de procesos Construcción Caldero.....	52
Figura 39 Mapa de procesos Construcción Empaque Caldero	53
Figura 40 Calero y Bridas	59
Figura 41 Resistencias Eléctricas del Caldero	60
Figura 42 Visor de Nivel	60
Figura 43 Flujograma detección de fallas en el S. de Trabajo.....	62
Figura 44 Juego de Empaques del Motor a Vapor Nuevos – Viejos.....	64
Figura 45 Depósito de Aceite del Motor a Vapor	65
Figura 46 Cigüeñal del Motor a Vapor	65
Figura 47 Sistema de Regulación de la Cantidad de Trabajo.....	66
Figura 48 Flujograma detección de fallas en el S. de Intercambio de calor	68

Figura 49 Serpentín del Condensador	71
Figura 50 Condensador del BPMV	71
Figura 51 Partes y Componentes del BPMV	73
Figura 52 Implementación en Sistema de Alimentación	74
Figura 53 Control de Nivel tipo Flotador	75
Figura 54 Válvula Check.....	75
Figura 55 Válvula Check con Alivio de Presión	76
Figura 56 Termistor NTC	77
Figura 57 Implementación en Sistema de generación de vapor.....	77
Figura 58 Elementos que conforman el Caldero.....	78
Figura 59 Aplicación de Temperatura y Presión en SolidWorks.....	88
Figura 60 Desplazamientos en el Caldero.....	88
Figura 61 Factor de Seguridad en el Caldero.....	89
Figura 62 Perforación mediante Sacabocado.....	89
Figura 63 Cartuchos de Inmersión.....	93
Figura 64 Sistemas de Control del Caldero	94
Figura 65 Control de Temperatura.....	95
Figura 66 Electrodo de Conductividad Warrick.....	95
Figura 67 Contactor LS-MC32A.....	96
Figura 68 Contactor GMC.....	97
Figura 69 Relé Térmico GTK22	98
Figura 70 Controlador CNC Floatless Relay.....	98
Figura 71 Circuito eléctrico sin corriente de Flujo entre electrodos	99
Figura 72 Circuito eléctrico con corriente de Flujo entre electrodos	99
Figura 73 Juego de Nivel con Visor	100

Figura 74 Control de Presión.....	101
Figura 75 Presostato	102
Figura 76 Válvula de Seguridad.....	103
Figura 77 Control de Temperatura.....	103
Figura 78 Controlador de Temperatura MT-543Ri Plus.....	104
Figura 79 Conexión de Modulo con Ordenador y Módulos Móviles.....	105
Figura 80 Módulo CONV32	105
Figura 81 Termistor Pt100	106
Figura 82 Sistema de Trabajo.....	107
Figura 83 Sistema de Intercambio de calor	107
Figura 84 Medidor de Caudal Volumétrico	108
Figura 85 Cañerías de Cobre recubiertas con Yeso.....	110
Figura 86 Banco de Pruebas Motor a Vapor modernizado.....	111
Figura 87 Sistema de Alimentación modernizado.....	113
Figura 88 Prueba Hidroestática de Caldero.....	114
Figura 89 Panel de control del BPMV	116
Figura 90 Interruptor de Presión	117
Figura 91 Medición de RPM con tacómetro de contacto	119
Figura 92 Manómetros del BPMV	120
Figura 93 Medidor de Flujo Volumétrico	121
Figura 94 Interfaz gráfica de programa SITRAD.....	123
Figura 95 Registro de sensores en SITRAD.....	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Designación por colores de Sistemas de BPMV.....	35
Tabla 2 Evaluación del Sistema de Alimentación	37
Tabla 3 Acciones a Realizar en Bomba.....	38
Tabla 4 Alternativas de material para el tanque de almacenamiento	39
Tabla 5 Ponderación de Criterios de Evaluación para el Tanque.....	40
Tabla 6 Ponderación de Costo	40
Tabla 7 Ponderación de Resistencia a la Corrosión	40
Tabla 8 Ponderación de Peso.....	41
Tabla 9 Ponderación de Temperatura de Fusión.....	41
Tabla 10 Conclusión de la selección del Tanque.....	41
Tabla 11 Alternativas de Sensores de Temperatura.....	42
Tabla 12 Ponderación de Criterios de Evaluación para el Sensor de Temperatura de Bomba	42
Tabla 13 Ponderación de Costo	43
Tabla 14 Ponderación de Temperatura de Operación.....	43
Tabla 15 Ponderación de Resistencia de Abrasión	43
Tabla 16 Conclusión de la selección del Sensor de Temperatura.....	43
Tabla 17 Evaluación del Sistema de generación de Vapor	48
Tabla 18 Acciones a realizar en S. generación de vapor.....	49
Tabla 19 Alternativas de Construcción para el caldero.....	50
Tabla 20 Ponderación de Criterios de Evaluación para Construcción de Caldero	50
Tabla 21 Ponderación de Costo	50
Tabla 22 Ponderación de Manufactura.....	51

Tabla 23 Ponderación de Confiabilidad	51
Tabla 24 Conclusión de la selección del tipo de Construcción de Calder 51	
Tabla 25 Alternativas de dispositivo de Calentamiento	54
Tabla 26 Ponderación de Alternativas en dispositivos de Calentamiento 54	
Tabla 27 Ponderación de Costo de dispositivo de calentamiento.....	54
Tabla 28 Ponderación de Durabilidad de dispositivo de calentamiento ...	54
Tabla 29 Ponderación de Eficiencia de dispositivo de calentamiento.....	55
Tabla 30 Conclusión en selección de dispositivo de calentamiento	55
Tabla 31 Ponderación de Criterios de Evaluación para Sensor de Temperatura en el Caldero	55
Tabla 32 Ponderación de Costo	56
Tabla 33 Ponderación de Temperatura de Operación.....	56
Tabla 34 Ponderación de Resistencia de Abrasión	56
Tabla 35 Conclusión de la selección del Sensor de Temperatura.....	56
Tabla 36 Tipos de Controladores Programables de Temperatura.....	57
Tabla 37 Alternativas de Solución para Control de Nivel en el Caldero... 58	
Tabla 38 Evaluación del Sistema de generación de Vapor	62
Tabla 39 Acciones a realizar en S. de Trabajo	63
Tabla 40 Evaluación del S. de Intercambio de calor.....	68
Tabla 41 Acciones a realizar en S. de Intercambio de calor.....	69
Tabla 42 Alternativas Medición de Caudal del Condensador	70
Tabla 43 Descripción de Partes y Componentes del BPMV	73
Tabla 44 Características Válvula Check.....	75
Tabla 45 Características Válvula Check con Alivio de Presión.....	76
Tabla 46 Características técnicas de termistor NTC.....	77

Tabla 47 Características Tubería API 5L SCH 80 GRADO A.....	79
Tabla 48 Características del aislamiento de fibra cerámica.....	80
Tabla 49 Dimensiones Arandela.....	81
Tabla 50 Área roscada y no roscada.....	82
Tabla 51 Características del Perno M12x1.25.....	85
Tabla 52 Características del empaque de asbesto.....	89
Tabla 53 Propiedades termodinámicas para resolver Ec.10.....	90
Tabla 54 Propiedades termodinámicas para resolver Ec.12.....	92
Tabla 55 Propiedades termodinámicas para resolver Ec.13.....	92
Tabla 56 Características de cartuchos de Inmersión.....	93
Tabla 57 Características Electrodo de Conductividad.....	95
Tabla 58 Características Contactor LS-MC 32A.....	96
Tabla 59 Características Técnicas CONTACTOR GMC.....	97
Tabla 60 Características técnicas Relé Térmico GTK 22.....	98
Tabla 61 Características técnicas del Controlador de nivel sin flotador...	99
Tabla 62 Características técnicas del Juego de Nivel.....	100
Tabla 63 Características Técnicas Presostato.....	102
Tabla 64 Características técnicas de la Válvula de Seguridad.....	103
Tabla 65 Especificaciones técnicas del controlador MT-543Ri plus.....	104
Tabla 66 Características técnicas CONV32.....	105
Tabla 67 Características técnicas del sensor PT-100.....	106
Tabla 68 Características técnicas del medidor de caudal.....	108
Tabla 69 Coeficientes de Conductividad YESO y POLIURETANO.....	109
Tabla 70 Clasificación de fluidos.....	109
Tabla 71 Verificación de Sistema de Alimentación.....	114

Tabla 72 Comparación de parámetros en cartuchos de inmersión.....	115
Tabla 73 Verificación del Sistema de Generación de Vapor.....	117
Tabla 74 Fuerza-Rpm en el Motor de Vapor	119
Tabla 75 Verificación del Sistema de Trabajo	120
Tabla 76 Datos de temperatura en el condensador.....	121
Tabla 77 Verificación del Sistema de Intercambio de calor	122
Tabla 78 Verificación Registro de temperatura.....	124
Tabla 79 Verificación de Adquisición de datos	124

RESUMEN

El análisis exergetico consiste en un método que utiliza las leyes de la termodinámica para realizar un estudio y diseño de sistemas que estén involucrados con la energía. En el presente proyecto se detalla el proceso de modernización de Banco de Pruebas Motor a Vapor del Laboratorio de Termodinámica de la ESPE, a través del modelo se establece un análisis de la variación de la energía de todo el ciclo Rankine que cumple el equipo. Para realizar el análisis es necesario recuperar el equipo, de manera que garantice una funcionalidad total y previendo un alto margen de seguridad en el lugar de operación. En la primera parte se describe el estado actual del equipo a través de sistemas, además se detalla el proceso de mantenimiento. Posteriormente se evalúan las alternativas dando como resultado una solución a los componentes que presenten fallas. Para la modernización del banco de pruebas se implementa nuevos dispositivos y reemplaza las partes afectadas, que no puedan ser corregidas. El Banco de Pruebas se complementa, con la instrumentación adecuada, la cual permite establecer un sistema de adquisición de datos. Se realiza el diseño de los componentes que sean necesarios para el correcto funcionamiento del Banco de Pruebas. A continuación, se describen las características técnicas de cada uno de los elementos que se implementan en los sistemas del banco de pruebas y se verifica el correcto funcionamiento del equipo mediante Ensayos. Finalmente se desarrollará una guía de operación mediante un balance energético del ciclo que cumple el Banco de Pruebas.

PALABRAS CLAVE

BALANCE ENERGÉTICO

CICLO RANKINE

MANTENIMIENTO

MODERNIZACIÓN

ABSTRACT

The exergetic analysis is a method that apply the thermodynamics laws to develop the study and design of systems which are involved in any way with energy. The present project details the process of modernization of the steam motor test bench from the Thermodynamics Laboratory of ESPE University. Through the model it is established an analysis of the energy variation about all the Rankin Cycle that the equipment follows. In order to realize the analysis, it is necessary to recover the equipment, so that the functionality can be total guaranteed and provides a big rank of security in the operation site. In the first part it is described the actual state of the equipment through systems, additionally it is detailed the maintenance process. Subsequently the alternatives are evaluated, providing as result the solution to the components which present failures. For the modernization of the test bench it is going to be installed new devices and will be replaced the affected components that cannot be repaired. The properly instrumentation is the complement of the test bench, that will establish a system of data acquiring. The components design is realized in order to get a correct functionality of the test bench. It is described the technical characteristics from each one of the elements that are implemented in the systems of the test bench and it is verified the correct functionality of the equipment by testing. Finally, it is developed an operational guide through an energy balance of the cycle that the test bench carries out.

KEYWORDS

ENERGY BALANCE

RANKINE CYCLE

MAINTENANCE

MODERNIZATION

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

Se detallan aspectos iniciales como antecedentes donde se cita algunos proyectos similares al Banco de Pruebas Motor a Vapor (BPMV), que se han realizado en el Laboratorio de Conversión de la Energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (LCEE). A continuación, se define el problema, detalla la importancia y posteriormente se justifica la realización del proyecto. Finalmente se establece objetivos a desempeñar en el proyecto.

1.1 Antecedentes

En el Área de Energías de la Carrera de Ingeniería Mecánica se encuentran algunos proyectos que se han desarrollado en tesis anteriores, enfocados hacia la repotenciación de equipos de laboratorio. En primer lugar, se tiene que, fue presentado el trabajo de grado “Mantenimiento y Automatización del Intercambiador de Calor de Flujo Aire-Agua Tecquipment del laboratorio de termodinámica del DECEM” (Álvarez M. y Revelo J., 2008)



Figura 1 Intercambiador de Calor de Flujo Aire-Agua

Como se puede ver en la Figura 1 en el equipo se implementó un sistema de adquisición de datos, que permite obtener resultados confiables, a través de un ordenador. El proyecto brinda una guía en la selección del sistema de automatización. Existe una interfaz que permite a los usuarios la visualización de

la adquisición de datos del proceso, esto a través de una tarjeta National Instruments NIUSB-6008.

Además, se analizó el trabajo de grado “Simulación del proceso Exergético y Automatización del Sistema de Adquisición de Datos de la Torre de Enfriamiento del laboratorio de Termodinámica del DECEM”, (Grandes R. y Torres G., 2009), que se indica en la Figura 2. A través de una descripción de las especificaciones, capacidad y condiciones de funcionamiento del equipo, el trabajo explica el procedimiento de adquisición de datos.



Figura 2 Torre de Enfriamiento

En el LCEE existe un equipo similar al BPMV como se observa en la Figura 3, que cumple el ciclo Rankine, es la planta de vapor la cual ayuda a realizar un análisis de energía de este ciclo e identificar los componentes asociados con el ciclo Rankine: bomba, caldero, turbina y condensador.



Figura 3 Planta de Vapor del LCEE

1.2 Definición del problema

El BPMV no se encuentra en funcionamiento debido a que presenta averías en sus componentes y no cuenta con un sistema de adquisición de datos. Por esta razón, el estado actual genera errores propios de dicha condición ocasionando que las prácticas en el laboratorio no puedan ser realizadas.

Existe la dificultad de los estudiantes para comprender el ciclo termodinámico que cumple el mismo. Actualmente en el equipo no se realiza un análisis del ciclo Rankine cerrado, únicamente un análisis másico que impide realizar un estudio energético completo. En definitiva, el Equipo “Motor a Vapor” tiene una tecnología antigua por lo que se tiene la necesidad de modernizar.

1.3 Justificación e importancia

La modernización del equipo BPMV, es importante para el LCEE ya que aporta en la educación de los estudiantes, debido a que en la Industria existen equipos que cumplen el mismo ciclo que el banco de pruebas.

El BPMV representa un modelo práctico y demostrativo de un ciclo termodinámico. El equipo emula a un sistema muy usado en el campo laboral de la Ingeniería Mecánica, que permite adquirir un conocimiento concreto del proceso. Por lo que es importante la ejecución del presente proyecto que permitirá una confiable y rápida adquisición de datos.

Además, el BPMV debe cumplir durante el semestre varias prácticas de laboratorio con una duración de dos horas en cada sesión, tomando en cuenta que es necesario una hora de operación para alcanzar el estado estable. Actualmente el equipo tiene un tiempo de operación de 38 años siendo necesario una modernización.

1.4 Área de influencia

El proyecto planteado se enfoca a los estudiantes de las carreras de Ingeniería Mecánica que cursan la cátedra de Termodinámica. En la actualidad no cuentan con un modelo claro respecto al ciclo termodinámico que cumple el BPMV, la cual es base para posteriores asignaturas como son Termodinámica Aplicada y Transferencia de Calor.

El propósito principal es ayudar a los estudiantes en la adquisición de datos y establecer un sistema que facilite la comprensión del ciclo termodinámico, de tal manera que colabore con el desarrollo para su futura vida profesional.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Recuperar y actualizar el BPMV, del Laboratorio de Termodinámica, para desarrollar balances exergéticos.

1.5.2 Objetivos específicos

- Establecer el estado actual de cada uno de los componentes del equipo.
- Diseñar y construir de los componentes mecánicos necesarios para el correcto funcionamiento del equipo.
- Determinar la instrumentación adecuada para el sistema de adquisición de datos que establezca un interfaz usuario ordenador.
- Evaluar y verificar el adecuado funcionamiento del equipo BPMV.
- Analizar y elaborar una guía de práctica a partir del rediseño del Banco de Pruebas Motor a Vapor.

1.6 Alcance

El alcance del proyecto consiste en la recuperación y actualización, que radica en convertir el ciclo abierto actual a un ciclo cerrado para demostrar la primera ley de la termodinámica. A través de balances energéticos en el equipo BPMV, se realiza el análisis en la variación de la eficiencia energética respecto a la cantidad de trabajo realizada por el motor. El equipo no cumple con el ciclo termodinámico Rankine cerrado para ello se implementará un plan de modernización. Es fundamental la transformación del equipo que permita entre otras cosas:

- Cumplir un ciclo cerrado termodinámico.
- Facilite el proceso de enseñanza práctica.
- Relacione a los estudiantes con sistemas energéticos presentes en la industria.

Una de las características del proyecto, es permitir la visualización de los parámetros en el panel de control y a la vez en la pantalla de un ordenador. Los estudiantes podrán ocupar de mejor manera el tiempo, para la comprensión e identificación de los componentes del ciclo termodinámico establecido para la práctica.

1.7 Estructura del Documento

En el primer capítulo se identifica el problema y la importancia de llevar a cabo el presente proyecto. Así como los beneficios que obtienen los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la ESPE.

Para continuar, se indica en el segundo capítulo los conceptos relacionados con el proyecto, además se da a conocer los elementos que componen el ciclo Rankine y su clasificación.

Seguidamente se describe el estado actual del equipo en el tercer capítulo, además se muestra el proceso de mantenimiento a través de flujogramas de los componentes del BPMV. Además, se presenta la selección de una de las alternativas mediante matrices de decisión.

En base a lo anterior en el capítulo 4 se describe de forma detallada las características técnicas de los componentes implementados en cada uno de los sistemas del BPMV.

Para verificar todo lo antes realizado en el capítulo 5 se presenta los resultados de la revisión y pruebas de funcionamiento realizados. Además, se presenta el análisis energético del ciclo que cumple el Banco de Pruebas.

Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones que se llegaron a determinar al finalizar el presente proyecto en el capítulo 6.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describen varios conceptos relacionados con la clasificación y tipos de componentes que forman parte del banco de pruebas motor a vapor. Adicionalmente se detallan conceptos acerca del ciclo termodinámico de dicho equipo para una mejor comprensión.

2.1 Ciclos termodinámicos de potencia de vapor

El ciclo de Carnot tiene relevancia al ser un ciclo ideal del cual provienen los ciclos termodinámicos reales. El BPMV cumple con un ciclo Rankine que se deriva del Carnot. (Yunus, 1996)

2.1.1 Ciclo Carnot

Es un proceso que utiliza un gas perfecto, se compone de cuatro procesos reversibles que constan de dos transformaciones isotérmicas y dos adiabáticas como podemos observar en la Figura 4. Además es posible su ejecución en un sistema cerrado o de flujo estable, para una mejor comprensión del ciclo de Carnot se considera un sistema cerrado, compuesto por un gas que se encuentra en un dispositivo adiabático de cilindro émbolo (Haywood, 2000)

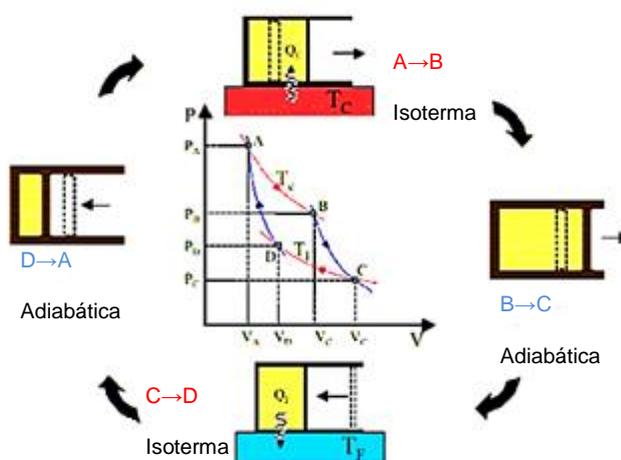


Figura 4 Ciclo Carnot

Fuente: (Física Termodinámica, 2011)

T_C : Temperatura Foco Caliente ; T_F : Temperatura Foco Frío

2.1.1.1 Descripción del ciclo Carnot

A continuación presentamos una descripción de cada uno de los procesos que cumple el ciclo mostrado en la Figura 4:

- Expansión Isotérmica Reversible (Proceso A-B): El gas cuenta con una temperatura T_C , y en la cabeza del cilindro se encuentra una fuente de temperatura la misma que permite una transferencia de calor hacia el gas. A continuación, se produce una expansión isotérmica, debido a que la diferencia de temperatura entre el gas y la fuente de temperatura nunca sobrepasa un diferencial de temperatura.
- Expansión Adiabática Reversible (Proceso B-C): La fuente de temperatura es reemplazado por un aislamiento de tal manera que el sistema se vuelve adiabático. A continuación el gas se expande sin pérdida de calor efectuando un trabajo sobre los alrededores, de tal manera que exista un decremento de la temperatura T_C a T_F . Como el proceso es ideal no se considera fricciones en el embolo por lo tanto es reversible.
- Compresión Isotérmica Reversible (Tramo C-D): Se retira el aislamiento en la cabeza del cilindro y entra en contacto con un sumidero a temperatura T_F . Después el embolo es desplazado hacia adentro a través de una fuerza externa, de manera que se genera un trabajo sobre el gas. A medida que se comprime el gas la temperatura tiende a aumentar, cuando dicha propiedad sobrepasa una diferencial de temperatura. El calor fluye desde el gas hacia el sumidero provocando que la temperatura se mantenga en T_F .
- Compresión Adiabática Reversible (Tramo D-A): Se retira el sumidero y se vuelve a colocar el aislamiento en la cabeza del cilindro. En definitiva permite el aumento de la temperatura T_F a T_C , de manera que se comprime y el gas vuelve a su estado inicial completando así el ciclo.

2.1.1.2 Eficiencia máquina térmica de Carnot

La eficiencia de cualquier maquina térmica está dada por la Ecuación 1:

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_F}{Q_C} \quad (1)$$

Donde:

Q_F : Calor desechado en un sumidero de baja temperatura a T_F

Q_C : Calor transferido a la maquina térmica desde una fuente de temperatura a T_C

La eficiencia térmica también se puede expresar en términos de temperatura como:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_F}{T_C} \quad (2)$$

Donde:

T_C : Temperatura Foco Caliente

T_F : Temperatura Foco Frío

Dicha expresión es la más alta eficiencia que puede tener una maquina térmica, que opere entre los dos depósitos de energía térmica a temperaturas T_F y T_C . (Yunus, 1996). Las eficiencias térmicas de las máquinas térmicas reales irreversibles que operan entre las temperaturas T_F y T_C se encuentran comparados a continuación:

$$\eta_t \begin{cases} < \eta_{t,rev} & \text{Máquina térmica irreversible} \\ = \eta_{t,rev} & \text{Máquina térmica Reversible} \\ > \eta_{t,rev} & \text{Máquina térmica Imposible} \end{cases} \quad (3)$$

2.1.2 Ciclo Rankine

Es un ciclo termodinámico ideal en el cual se transforma la energía térmica en trabajo mecánico, mediante el cual es posible determinar el desempeño de máquinas a vapor. Además, representa el proceso que se lleva a cabo por las

plantas de vapor para generar la potencia requerida en aplicaciones de generación termoeléctrica.

El calor que se usa para aportar al fluido de trabajo (Agua), generalmente se produce en una caldera. El Ciclo consta de los siguientes elementos: Bomba, Caldero, Turbina, Condensador como podemos observar en la Figura 5.

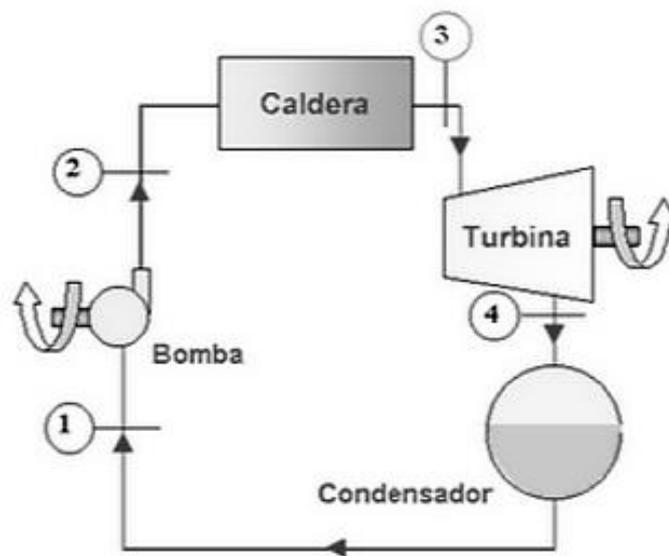


Figura 5 Ciclo Rankine

Fuente (Montaño, 2009)

2.1.2.1 Descripción del ciclo Rankine

Como se muestra en la Figura 5, el agua ingresa en estado líquido a la bomba, en la que se aumenta la presión a entropía constante hasta alcanzar la presión del caldero. En el caldero se entrega calor a presión constante al fluido de trabajo mediante resistencias eléctricas. Una vez que llega al estado sobrecalentado el fluido es dirigido hacia el motor donde entrega trabajo mecánico a entropía constante. Finalmente el fluido de trabajo se dirige hacia el condensador donde existe una transferencia de calor a presión constante, el fluido sale del condensador como líquido saturado e ingresa a la bomba completando el ciclo (Moran & Shapiro, 1999).

A continuación se describe los cuatro procesos que conforma el ciclo Rankine mostrado en la Figura 6:

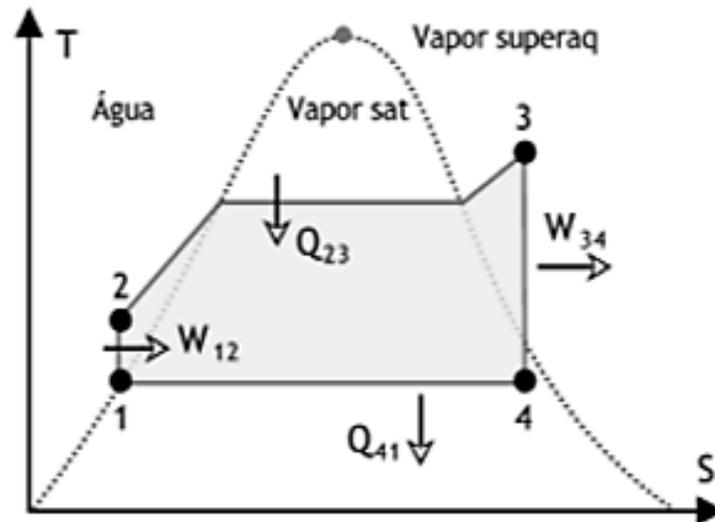


Figura 6 Diagrama T-s del Ciclo Rankine

Fuente: (Luna, 2016)

- Proceso 1-2: Compresión isoentrópica del fluido de trabajo en fase líquida mediante una bomba, lo cual implica un trabajo W_{1-2} sobre el sistema. De tal manera que la presión del fluido de trabajo aumenta hasta el valor de presión en el caldero.
- Proceso 2-3: Transmisión de calor Q_{2-3} hacia el fluido de trabajo a presión constante al interior del caldero.
- Proceso 3-4: Expansión isoentrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador. Se realiza en una turbina de vapor generando trabajo de salida W_{3-4} a través del eje.
- Proceso 4-1: Transmisión de calor Q_{4-1} a presión constante desde el fluido de trabajo hacia el circuito de refrigeración, de tal forma que el fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado. Se realiza en un condensador de tal forma que no existan pérdidas de carga.

En un ciclo más real que el ciclo Rankine ideal descrito, los procesos en la bomba y en la turbina no serían isoentrópicos. A través del condensador y la caldera se presentan pérdidas de carga, por esta razón existe un decremento en el rendimiento térmico del ciclo.

2.1.2.2 Análisis de energía en el ciclo Rankine ideal

Los componentes asociados con el ciclo Rankine: Bomba, Caldero, Turbina y Condensador, son dispositivos de flujo estable. Hay que tomar en cuenta que los cambios en la energía cinética y potencial del vapor suelen ser pequeños respecto de los términos de trabajo y transferencia de calor, por esta razón se desprecian.

De este modo la ecuación de energía de flujo estable por unidad de masa de vapor se reduce a:

$$(q_{ent} - q_{sal}) + (w_{ent} - w_{sal}) = h_r - h_i \quad (4)$$

Donde:

q_{ent} : Cantidad de Calor que entra al sistema

q_{sal} : Cantidad de Calor que sale del sistema

w_{ent} : Cantidad de Trabajo realizado por el sistema

w_{sal} : Cantidad de Trabajo realizado sobre el sistema

h_r : Entalpía final del proceso

h_i : Entalpía inicial del proceso

La caldera y el condensador no incluyen ningún trabajo, y se supone que la bomba y la turbina son isoentrópica, en ese caso la relación de la conservación de la energía se expresa:

$$w_{neto} = q_{ent} - q_{sal} = w_{turb,sal} - w_{bomba,ent} \quad (5)$$

Donde:

w_{neto} : Trabajo neto realizado por el sistema

$w_{turb,sal}$: Trabajo realizado por la Turbina

$w_{bomba,ent}$: Trabajo de la bomba sobre el sistema

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se deriva a partir de la Ecuación (1), entonces se obtiene la siguiente expresión:

$$\eta_t = \frac{w_{neto}}{q_{ent}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{ent}} \quad (6)$$

2.2 Componentes del Ciclo Rankine

El ciclo Rankine se encuentra conformado por componentes que se muestran en la Figura 7. A continuación se realiza una descripción y clasificación de cada de los mismos.



Figura 7 Componentes Ciclo Rankine

2.2.1 Motor a vapor

Es un dispositivo a través del cual se realiza trabajo mecánico, mediante un fluido que posee una energía térmica. Debido a un calentamiento como podemos observar en la Figura 8, existe un aumento de temperatura en el interior de la caldera. A continuación, se produce la expansión del volumen del fluido, transformando el fluido de trabajo en vapor. Mediante una conexión llega a la cámara del motor generando una fuerza en la cabeza del pistón, lo que produce un desplazamiento lineal que es convertido en movimiento rotacional. (Dellicompagni, 2015)

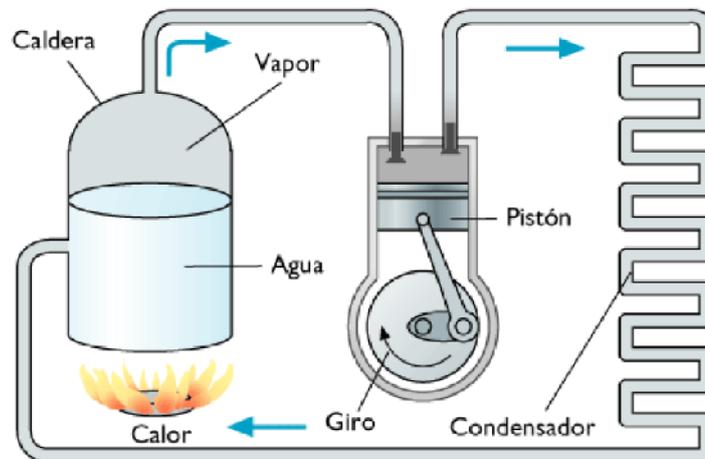


Figura 8 Esquema de un Motor a Vapor

Fuente: (Estrella, 2010)

2.2.2 Caldero de vapor

Es una máquina donde se incrementa la energía térmica y la presión de un fluido usado para la generación de vapor saturado, por medio de un combustible o resistencia eléctrica. A nivel industrial generalmente se operan en temperaturas entre 200° y 400° C a presiones próximas a 14 bar. Los componentes básicos que conforman un caldero, como se observa en la Figura 9, son cámara de combustión, cámara hogar, quemador, intercambiador de calor y salida de humos.

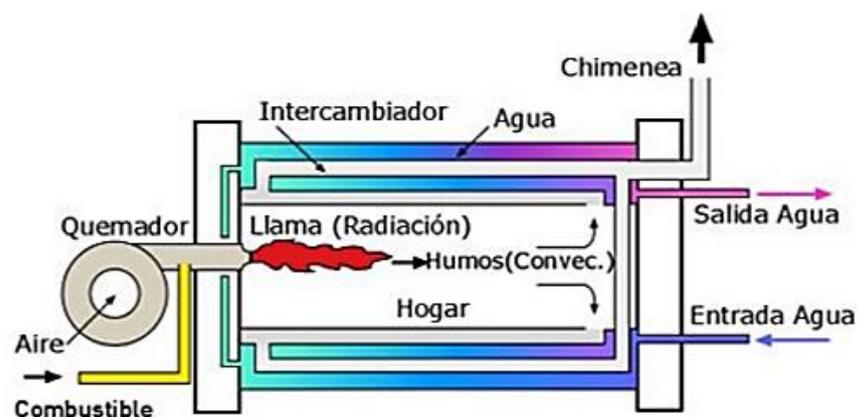


Figura 9 Partes del Caldero

Fuente: (Arquigráfico, 2014)

2.2.2.1 Clasificación de Caldero de Vapor

A continuación, se detalla las clasificaciones más importantes: según su diseño y su evacuación de gases como se indica en la Figura 10.



Figura 10 Clasificación de Calderos

2.2.2.1.1 Clasificación de Calderos según su diseño

a) Calderas pirotubulares:

En las calderas pirotubulares los gases de combustión que se generan en la cámara, se dirigen hacia conductos que se encuentran en el hogar. En cuanto a los conductos están sumergidos en agua formando un solo conjunto cerrado en una envolvente. La presente configuración permite la transferencia de calor a través de las paredes de los ductos hacia el agua que los rodea como se observa en la Figura 11.

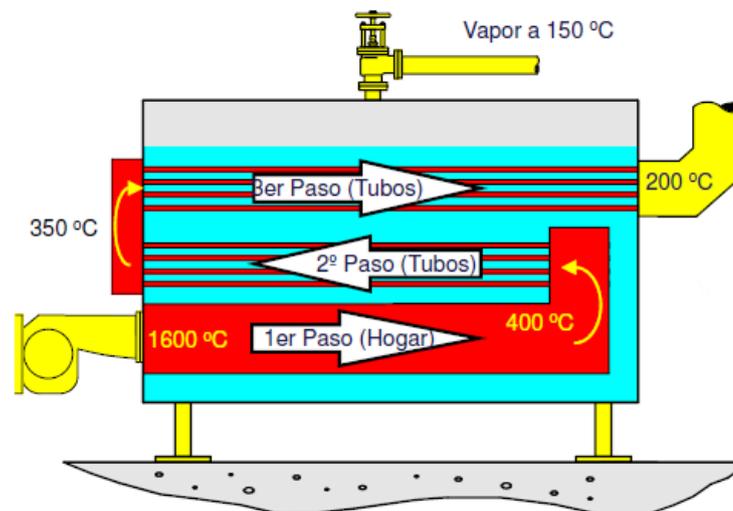


Figura 11 Caldero Pirotubular

Fuente: (Babcockwanson, 2011)

Se tiene calderas de varios pasos donde los gases de combustión transitan por ductos a través del agua, de tal manera que la calidad con la que sale el vapor es aproximadamente uno (Clayton, 2011).

b) Calderos acuotubulares

Las calderas acuotubulares están conformados por tubos que se encuentran en la cámara de combustión como se puede ver en la Figura 12. En el interior de los ductos se encuentra en circulación el fluido, al instante de realizar la combustión existe una transferencia de calor, que permite la generación de vapor en el interior de los tubos. Se puede señalar que los calderos acuotubulares tienen una mayor presión y potencia que los pirotubulares. Sin embargo, la calidad con la que sale el vapor es aproximadamente 0.85.

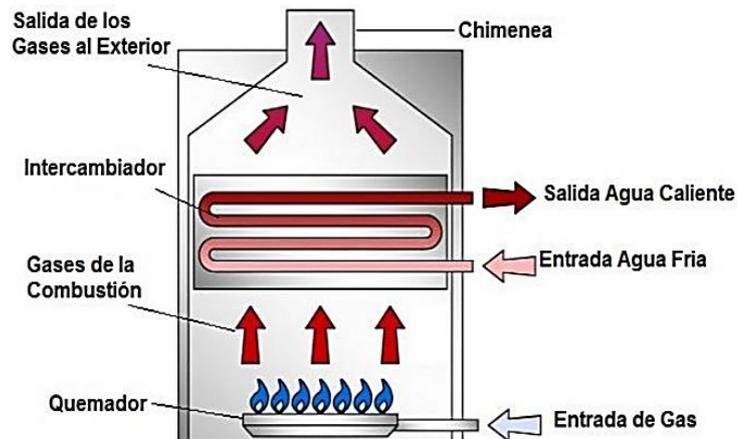


Figura 12 Caldero Acuotubular

Fuente: (areatecnologia, 2010)

2.2.2.1.2 Clasificación de calderas según su evacuación de los gases

a) Caldero de Tiro natural

Es el medio por el cual se puede obtener el comburente para dar inicio a la combustión y es proporcionado por la chimenea, se encuentra basado en la diferencia que existe entre los gases de salida generado por la combustión y el ambiente. Los gases calientes tienen una menor densidad y se dirigen de forma ascendente hacia la chimenea provocando un efecto de aspiración que da origen a una corriente de aire como se puede observar a la Figura 13 y suministra a la combustión el aire necesario.

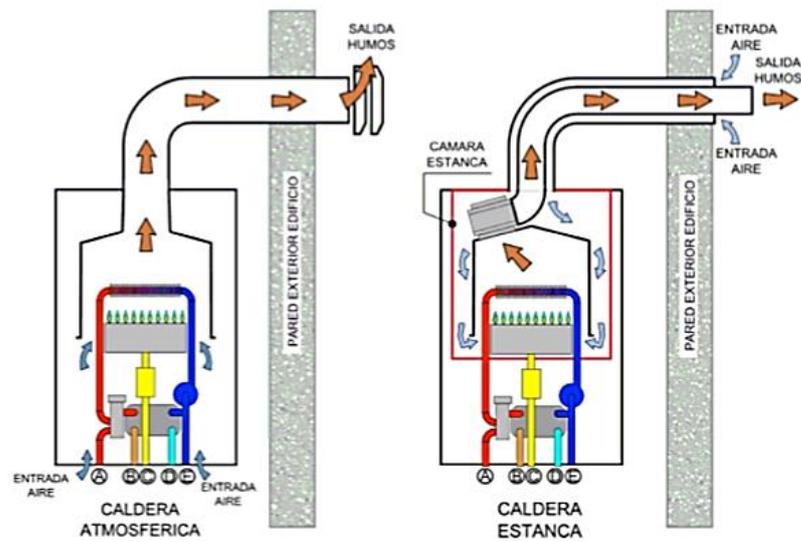


Figura 13 Caldero de Tiro Natural

Fuente:(Abenza, 2009)

Es importante mencionar que mientras aumenta la altura de la chimenea existirá un mayor gradiente de temperatura permitiendo una mayor velocidad de la corriente.

b) Caldero de Tiro artificial

Es posible obtener a través de un ventilador u otro medio similar como se observa en la Figura 14, permitiendo variar la cantidad de aire que ingresa al hogar del caldero. Cabe señalar que existen dos tipos de tiro artificial: tiraje artificial forzado e inducido. En el Caldero de tiro forzado ingresa el aire en la cámara de combustión de forma directa, ocasionando una sobrepresión en el hogar. Por otra parte, en el caldero de tiro artificial inducido se usa un ventilador a la salida del caldero, para absorber los gases de combustión de manera que evacuen por la chimenea.

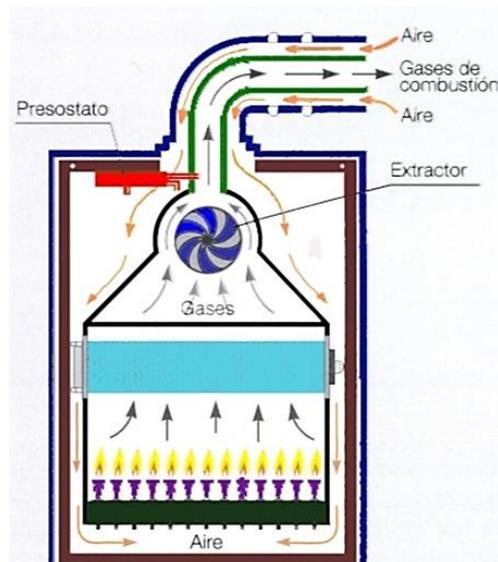


Figura 14 Caldero con Tiro Artificial

Fuente: (ieslosviveros, 2004)

2.2.3 Condensador

El objetivo principal es absorber energía, de manera que permite un cambio de fase en el líquido térmico después de haber realizado un trabajo. Como podemos observar en la Figura 15 el fluido de trabajo ingresa en forma de vapor, donde se encuentra en contacto con un medio frío (agua), debido al gradiente de temperatura existe un cambio de estado en el fluido.

La importancia del condensador radica en la reutilización del fluido de trabajo, ya que permite una recirculación constante en el ciclo, bajando el costo operacional de la planta y aumenta la eficiencia del ciclo.

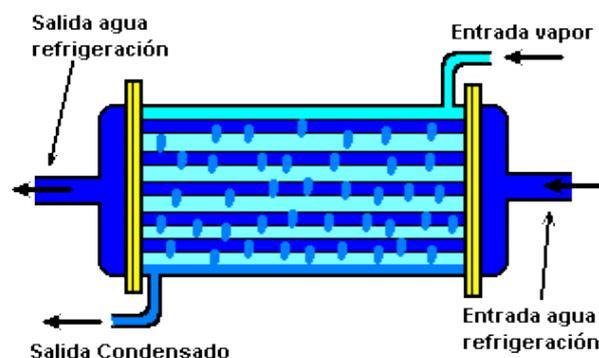


Figura 15 Funcionamiento de un Condensador enfriado por Agua

Fuente: (termoindustrial1ii132.blogspot.com, 2013)

2.2.3.1 Clasificación del Condensador

Existen tres tipos de condensadores como se observa en la Figura 16. Los condensadores que usan el enfriamiento por aire se usan frecuentemente en aire acondicionado y los otros dos tipos en refrigeración comercial e industrial. Generalmente cuentan con una torre de enfriamiento la cual retira el calor del agua permitiendo un flujo continuo. También se usa los condensadores que intercambian calor a través de placas.

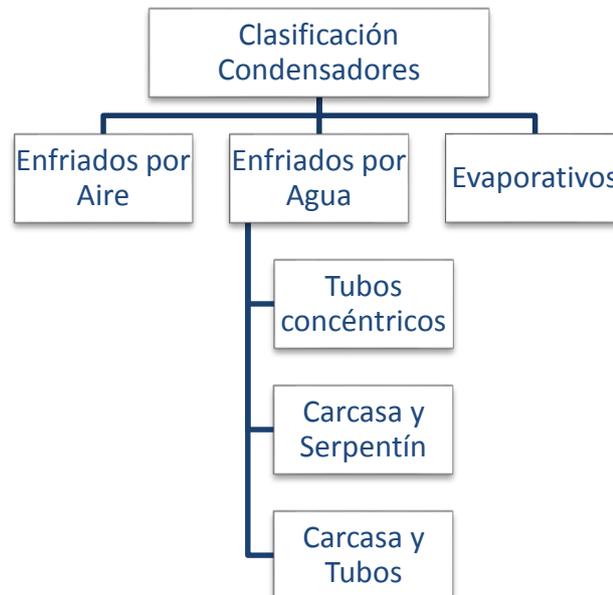


Figura 16 Clasificación de los Condensadores

2.2.3.1.1 Condensador enfriado por aire

Se componen de un conjunto de tubos simples o dotados de aletas que ayudan a la disipación del calor, encerrados dentro de un marco. Vale destacar que la transferencia de calor se logra forzando grandes cantidades de aire hacia los tubos mediante el uso de un ventilador como se observa en la Figura 17, es posible regular entrada de aire a través de rejillas. Entonces el aire atraviesa en flujo cruzado y al ser forzado a través del condensador absorbe calor, que permite el cambio de fase en el fluido de trabajo.

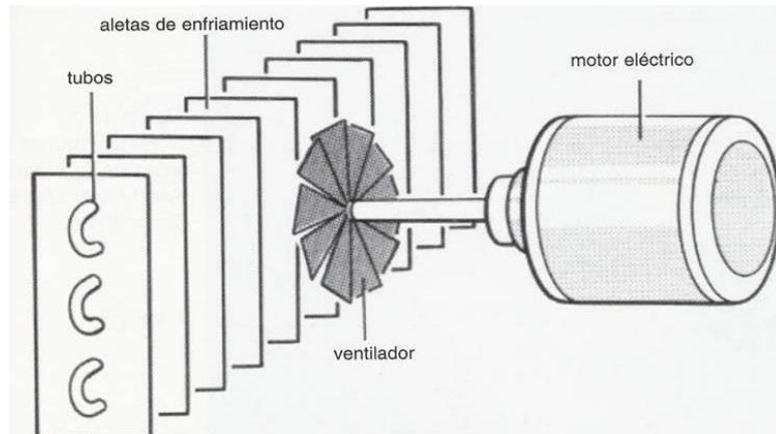


Figura 17 Partes de Condensador Enfriado por Aire

Fuente: (ACR Latinoamérica, 2017)

2.2.3.1.2 Condensador enfriado por agua

Los condensadores que emplean como medio de enfriamiento el agua son intercambiadores de calor compactos.

a) Condensador de tubos concéntricos

Como se puede muestra en la Figura 18 participan dos corrientes. La primera funciona como fuente de calor y la segunda actúa como receptor del calor, el cual se transfiere a través de las paredes de los tubos que conforman el equipo.

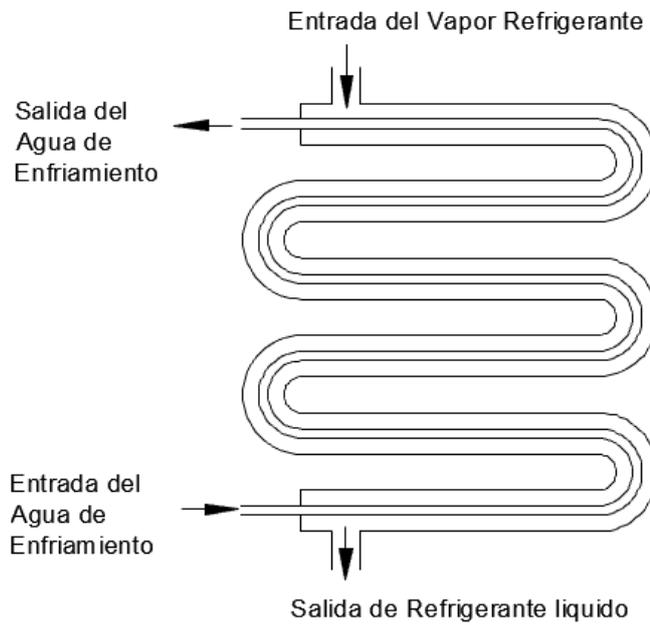


Figura 18 Condensador de Tubos Concéntricos

b) Condensador de carcasa y serpentín

Consiste en un recipiente en el que se encuentra el fluido de trabajo como se observa en la Figura 19. En el interior del condensador se encuentra un serpentín por el que circula agua a una temperatura inferior a la del fluido de trabajo, que permite la transferencia de calor.

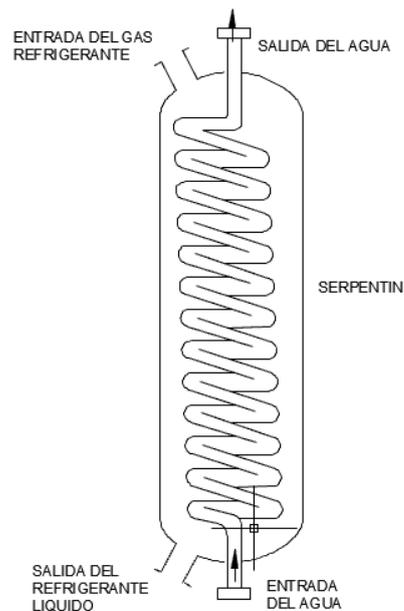


Figura 19 Condensador de carcasa y serpentín

c) Condensador de carcasa y tubos

El condensador de Carcasa y Tubos, permite crear grandes áreas de intercambio de calor en espacios reducidos. Como se indica en la Figura 20 el fluido de trabajo circula por el interior de los tubos, mientras que el agua rodea los tubos recibiendo calor.

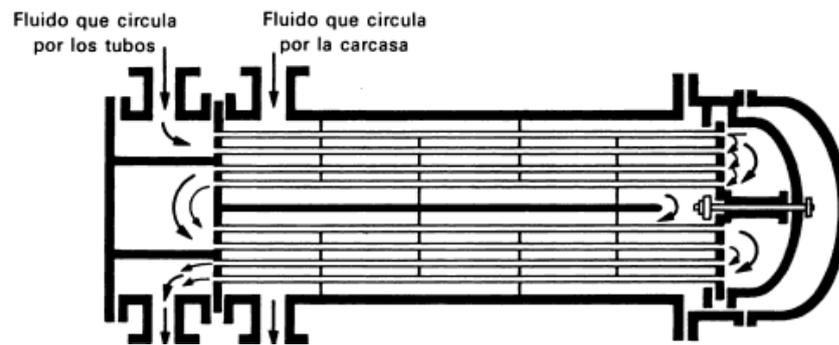


Figura 20 Condensador de Carcasa y Tubos

Fuente: (Principios de los procesos químicos. Termodinámica, 2001)

2.2.3.1.3 Condensador de tipo Evaporativo

Los condensadores evaporativos presentan la particularidad de obtener temperaturas de condensación menores a los condensadores enfriados por agua y aire. El gas refrigerante circula a través de las tuberías como se muestra en la Figura 21.

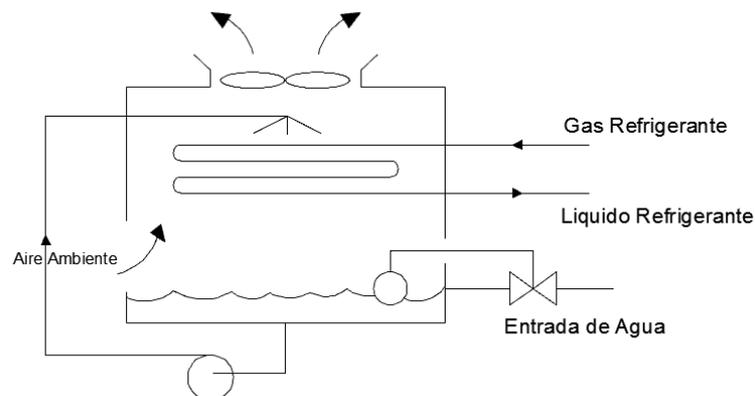


Figura 21 Descripción de un Condensador Evaporativo

En el interior de una cámara con aspersores, el refrigerante es enfriado, debido a un incremento en la temperatura del agua que se encuentra en contacto con los tubos del refrigerante. De tal manera que existe un cambio de fase en el refrigerante.

2.2.4 Bomba hidráulica

Es una máquina que transforma la energía mecánica en energía hidráulica del fluido incompresible, permitiendo que el fluido ingrese de una zona de menor presión a una de mayor presión. La clasificación de las bombas se enfoca en las que son de desplazamiento positivo, debido a que el BPMV cuenta con una bomba de dicho tipo.

2.2.4.1 Bombas de desplazamiento positivo

Las bombas de desplazamiento positivo se caracterizan por alcanzar altas presiones y operar a bajos caudales. A través de un elemento móvil crean succión y descarga, tomando en cuenta que contienen una cámara la cual se llena y vacía de forma alternativa exigiendo el movimiento del líquido mediante propulsión mecánica.

2.2.4.1.1 Clasificación de Bombas de desplazamiento positivo

A continuación, como se indica en la Figura 22, se detalla la clasificación de las bombas de desplazamiento positivo.



Figura 22 Clasificación de Bombas de Desplazamiento Positivo

2.2.4.1.2 Bombas de pistón

En la Bomba de pistón el fluido es inducido por el movimiento mecánico de cilindro embolo, es importante que no sean sometidas a líquidos que contengan partículas abrasivas ya que provocan cavitaciones en la misma. La impulsión del fluido es axial como se puede ver en la Figura 23. Además, contienen válvulas check que permiten la entrada y salida del fluido.

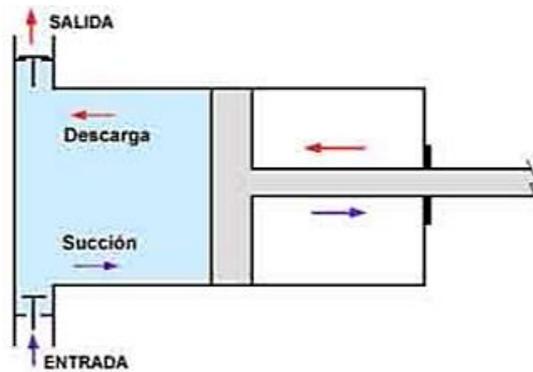


Figura 23 Bomba de Pistón

Fuente: (<http://mkbenjaminrosario.blogspot.com>, 2015)

2.2.4.1.3 Bombas de engranes

Se conforma de un par de engranes que se encuentran en un solo cuerpo cerrado, de tal manera que el espacio entre ellos sea mínimo. Los engranes inician girando en sentido contrario de manera que el fluido atraviese la cavidad de los dientes, en uno de los lados del cuerpo trasladándolo hacia el ducto de descarga como se observa en la Figura 24. La presión de salida de estas bombas es pulsante al igual que las bombas de émbolo pero con mayor frecuencia por lo que se puede decir que tiene un bombeo de mayor continuidad (Fristam, 2011)

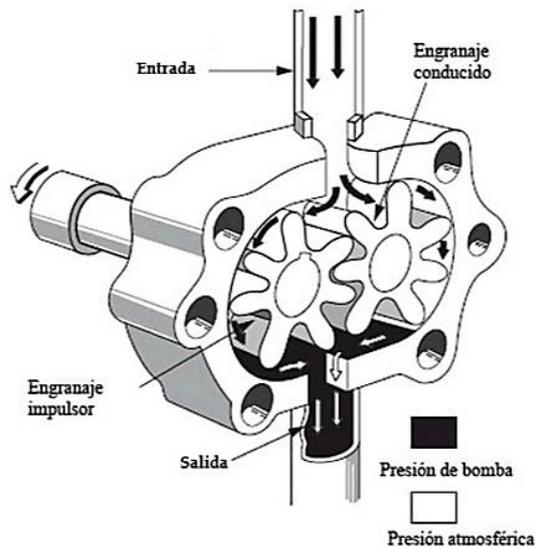


Figura 24 Bomba de Engranes

Fuente: (industrial-automatizada.blogspot.com, 2011)

2.2.4.1.4 Bombas de diafragma

En la Bomba de diafragma se produce movimiento recíprocante al que se somete el fluido provocado por un diafragma flexible. El diafragma es accionado desde el exterior mediante un mecanismo como se ve en la Figura 25, provocando un aumento y disminución del volumen que se encuentra por debajo del diafragma. Existe un par de válvulas que se colocan en la entrada y salida las mismas que provocan que el fluido siga la dirección del bombeo.

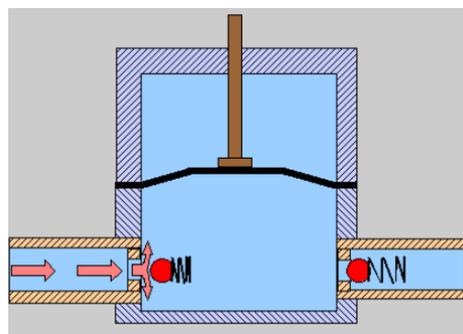


Figura 25 Bomba de Diafragma

Fuente: (Moreno, 2014)

2.2.4.1.5 Bombas de Paletas de eje excéntrico

Está constituido por un rotor ranurado conectado a una flecha que impulsa un movimiento rotacional. Las paletas giran alejándose y acercándose de las ranuras del rotor que siguen la figura de la carcasa de la bomba como se observa en la Figura 26. El rotor se encuentra colocado excéntricamente respecto a la caja permitiendo así un vacío en la admisión.

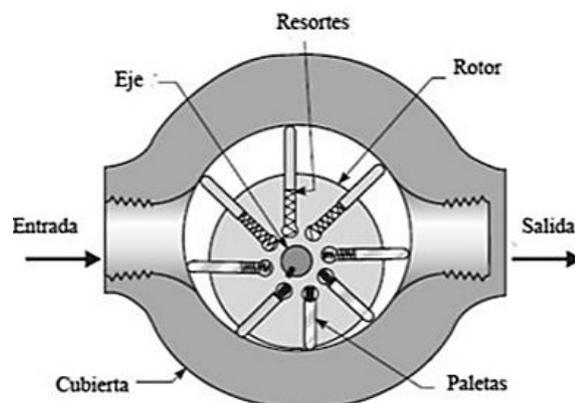


Figura 26 Bomba de Paletas de Eje Excéntricos

Fuente: (Automatización Industrial, 2011)

2.3 Planta de vapor

Las plantas de potencia de vapor de agua trabajan fundamentalmente con el mismo ciclo básico Rankine, tanto si el suministro de energía viene de la combustión de combustibles fósiles o como si proviene de un proceso de fisión en un reactor nuclear (Canoura, 2016)

Las plantas de vapor adquieren energía eléctrica a partir de trabajo mecánico, como podemos observar en la Figura 27 generalmente se produce en un caldero al elevar la temperatura y presión del agua de modo que se obtiene vapor de agua, el cual se convierte en fluido de trabajo. Posteriormente el vapor se dirige hacia la Turbina donde vence el momento de los alabes y permite rotar el eje que se encuentra interconectado con un generador eléctrico.

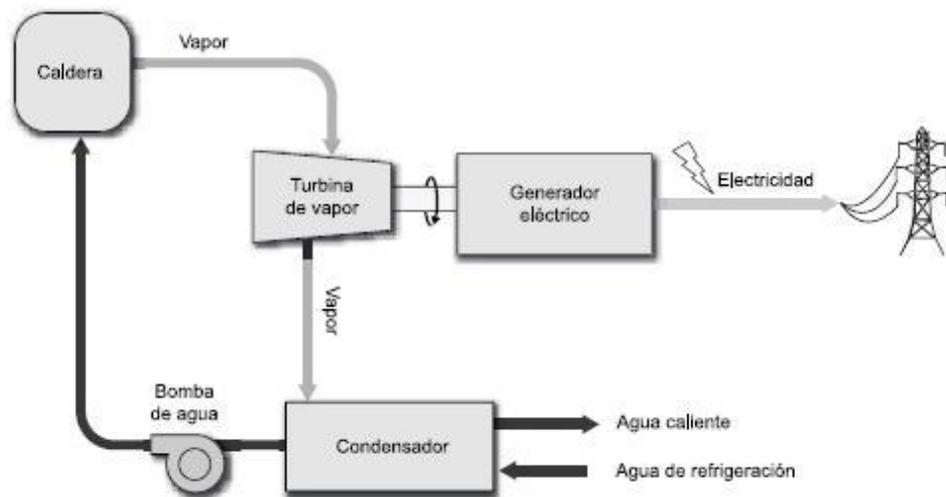


Figura 27 Descripción de una Planta de Vapor

Fuente: (Colmenar, 2012)

Después de que el fluido de trabajo realizó su paso por la turbina, ingresa al condensador donde retorna a su estado inicial de líquido saturado para que a través de la bomba se repita el ciclo. Son usados usualmente alrededor del mundo ya que son consideradas centrales económicas y rentables, sin embargo su aplicación genera emisiones de dióxido de carbono durante el proceso de combustión. (Gaffert, 1981)

2.4 Funcionamiento del Banco de Pruebas Motor a Vapor

Para empezar el funcionamiento del BPMV que se muestra en la Figura 28, se regula el caudal del agua de enfriamiento en el condensador en un rango de 70 a 100 litros por hora. Una vez regulado el caudal de agua se enciende la bomba de alimentación, de ser necesario, se debe purgar el aire que se encuentra en el interior de la bomba.

Posteriormente llenamos el caldero hasta el nivel marcado y se espera hasta alcanzar una presión interna entre 300 y 350 KPa. A continuación, se procede a aflojar el tornillo del dinamómetro para permitir liberar el freno del motor, se abre la válvula de contención de vapor y el motor empieza a funcionar. El sistema debe funcionar al menos 5 minutos para que las condiciones se estabilicen.



Figura 28 Motor a Vapor

2.5 Mantenimiento

Es el conjunto de actividades que se recomiendan realizar cada cierto periodo de tiempo que permite garantizar el correcto funcionamiento de un equipo aumentando la confiabilidad en un sistema de producción. (Pérez , Rodríguez, & Sancho, 2007)

Según la organización Europea de Mantenimiento define el concepto Mantenimiento como “La función empresarial a la que se encomienda el control constante de las instalaciones, así como el conjunto de los trabajos de reparación y revisión necesarios para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de las instalaciones productivas, servicios e instrumentación de los establecimientos”. Es de relevancia tener un programa de mantenimiento en toda empresa para alargar la vida útil de la máquina.

2.5.1 Sistemas de Mantenimiento

En la Figura 29 se distinguen los tipos de Mantenimiento que se pueden diferenciar dependiendo del tipo de trabajo que realizan.

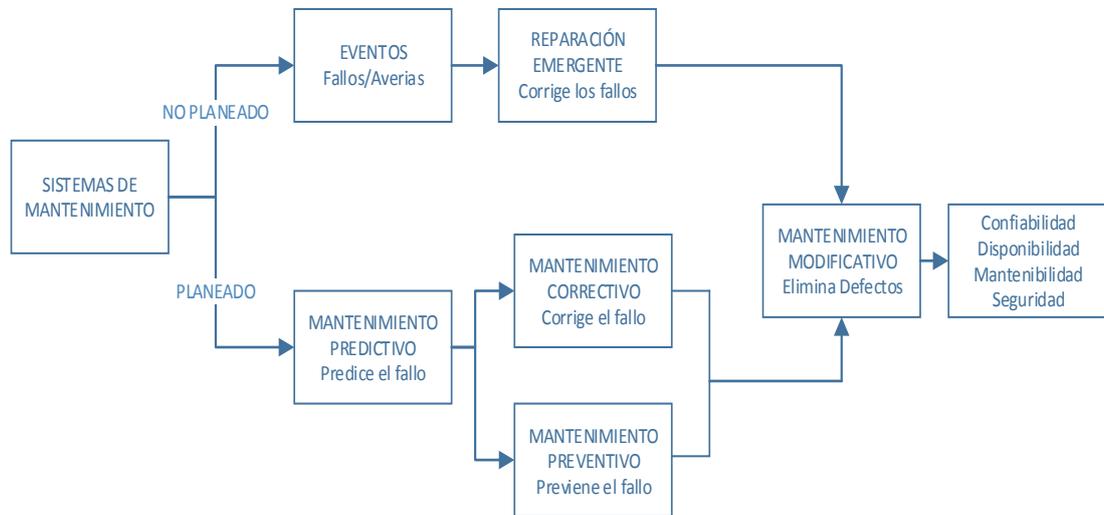


Figura 29 Sistemas de Mantenimiento

2.6 Resumen

Los ciclos termodinámicos reales provienen a partir de ciclo Carnot, que se encuentra conformado por cuatro procesos reversibles: dos transformaciones isotérmicas y adiabáticas. Además, la principal consideración en el ciclo Carnot es imaginar que opera en un sistema cerrado compuesto por un gas dentro de un cilindro-embolo.

El ciclo termodinámico Rankine es una derivación del ciclo Carnot que permite determinar el desempeño de una maquina a vapor. Los componentes que conforman el ciclo Rankine son: Bomba, caldero, turbina o motor a vapor y condensador. Es importante que en el ciclo la bomba alcance la presión necesaria que permita ingresar el fluido hacia el caldero, por lo que las bombas de desplazamiento positivo se caracterizan en alcanzar altas presiones y son ideales para el ciclo.

En un inicio el agua ingresa a la bomba e incrementa su presión, a continuación, se dirige hacia la caldera y se entrega calor a través un dispositivo de calentamiento (resistencias, cartuchos, quemadores, etc.). El vapor con una determinada calidad realiza llega hacia un dispositivo donde se genera trabajo mecánico. Para finalizar el ciclo el vapor, se dirige al

condensador donde cambia su estado a líquido saturado para volver a ingresar a la bomba.

Existen dos tipos de calderas según su diseño: las calderas pirotubulares y acuotubulares. Las calderas pirotubulares generan gases de combustión en una cámara y posteriormente se dirigen hacia conductos que se encuentran sumergidos en agua donde tiene lugar la transferencia de calor. Las calderas acuotubulares están conformados por tubos por donde circula el fluido. La combustión se realiza alrededor del tubo y permite la generación de vapor en el interior del mismo. Es importante señalar que los calderos acuotubulares presentan una mayor presión y potencia que los pirotubulares, pero la calidad del vapor en los calderos pirotubulares es mayor a la de los acuotubulares.

El motor a vapor es un dispositivo que realiza trabajo mecánico, a partir de un fluido que posee energía térmica. La presión que posee vapor actúa sobre la cabeza del pistón, transmitiendo una fuerza a través de la biela produciendo un desplazamiento lineal que se convierte en rotacional mediante el cigüeñal.

El fluido circula a través del condensador donde intercambia energía. El proceso de condensado permite la reutilización del fluido de trabajo, disminuyendo costos de operación en la planta y aumentando la eficiencia del ciclo. Existen tres tipos de condensadores: a través de aire, agua y evaporativos.

La principal aplicación del ciclo Rankine se encuentra en las plantas de vapor, que adquieren energía eléctrica a partir de energía térmica a través de un trabajo mecánico. Una vez que se reconoce los sistemas de mantenimiento se determina que el proceso de mantenimiento iniciara con un mantenimiento de tipo correctivo. A continuación, se efectuará un mantenimiento modificativo para un correcto y seguro funcionamiento.

CAPITULO III

SELECCIÓN DE ELEMENTOS Y CORRECCIÓN DE FALLAS

En el presente capítulo se precisa, el procedimiento de reparación y mantenimiento para cada uno de los componentes que conforman los sistemas del equipo. Además, se plantean diversas alternativas para la sustitución e implementación de dispositivos, posteriormente se trabajará con el sistema de adquisición de datos.

3.1 Mantenimiento del Banco de Pruebas

Para la realización de cualquier tipo de mantenimiento, es primordial establecer su situación física y operacional. Además, de conocer los parámetros de operación que se dan en el proceso.

Se procede al desmontaje del equipo, que permite analizar de forma minuciosa cada parte. El mantenimiento comprenderá dos etapas como se indica en la Figura 30, la primera consiste en una etapa de recuperación del BPMV basado en un mantenimiento correctivo. De esta manera podemos continuar con una segunda etapa de implementación de elementos, es decir, se realiza un mantenimiento modificativo.

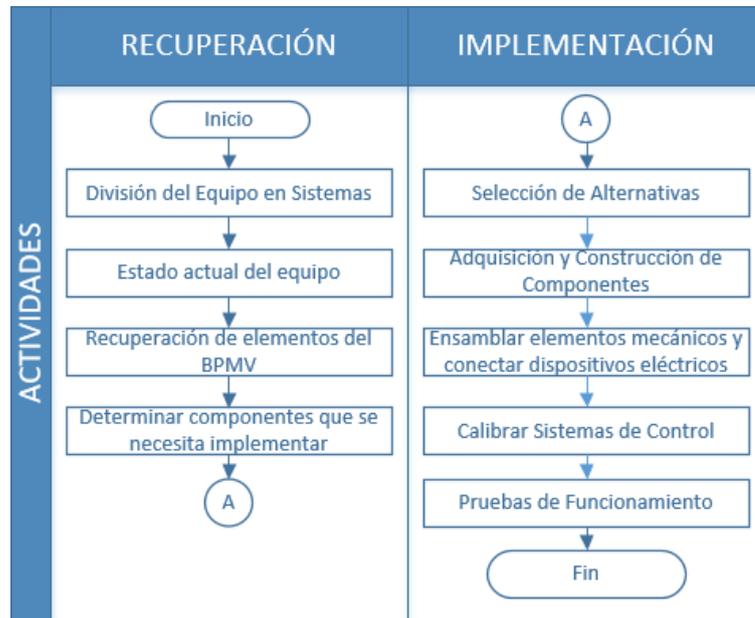


Figura 30 Etapas de Mantenimiento del BPMV

3.1.1 Parámetros del Banco de Pruebas

Los parámetros que intervienen en la operación del equipo BPMV son:

- Voltaje: 220 V
- Salida nominal: 3000 Rev./min
- Máximo consumo de vapor: 8 Kg. /hr
- Máximo cantidad de fluido de agua de enfriamiento: 150lt/hr
- Máxima presión de vapor: 400 kN/m²
- Consumo de energía eléctrica: 6 KW (2 Resistencias 3kW)

3.2 Situación actual del Banco de Pruebas

El Laboratorio de Conversión de Energía, cuenta con un banco de pruebas "BPMV". El equipo se usa para realizar prácticas de laboratorio con un total de 38 años de servicio en el área de energías. La Figura 31 muestra el esquema actual del BPMV, se observa el equipo completo con todas sus conexiones y componentes. Además, cabe mencionar que el BPMV se encuentra inactivo 4 años.

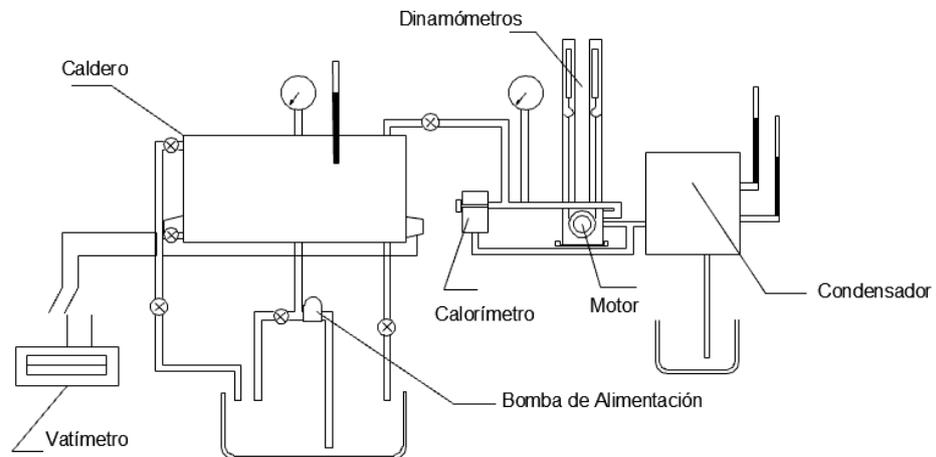


Figura 31 Esquema del Banco de Pruebas Motor a Vapor BPMV

Actualmente el equipo cuenta con un sistema de medida de parámetros que comprende: Termómetros, los cuales tienen apreciaciones de un grado, y su rango van desde 10°C hasta los 100°C . Además, tiene dos manómetros de presión que indican la presión que corresponde al caldero y la entrada de vapor en el motor. Para la regulación de salida en del trabajo del motor se encuentran dos dinamómetros.

Es notable el deterioro del equipo, el cual tiene un obsoleto sistema de medida de parámetros. Además, se requiere que el equipo cumpla un ciclo termodinámico cerrado para su posterior análisis.

3.3 División del Banco de Pruebas en sistemas

Los sistemas en los que se divide el BPMV para facilitar el análisis de fallas se muestran en la Figura 32.

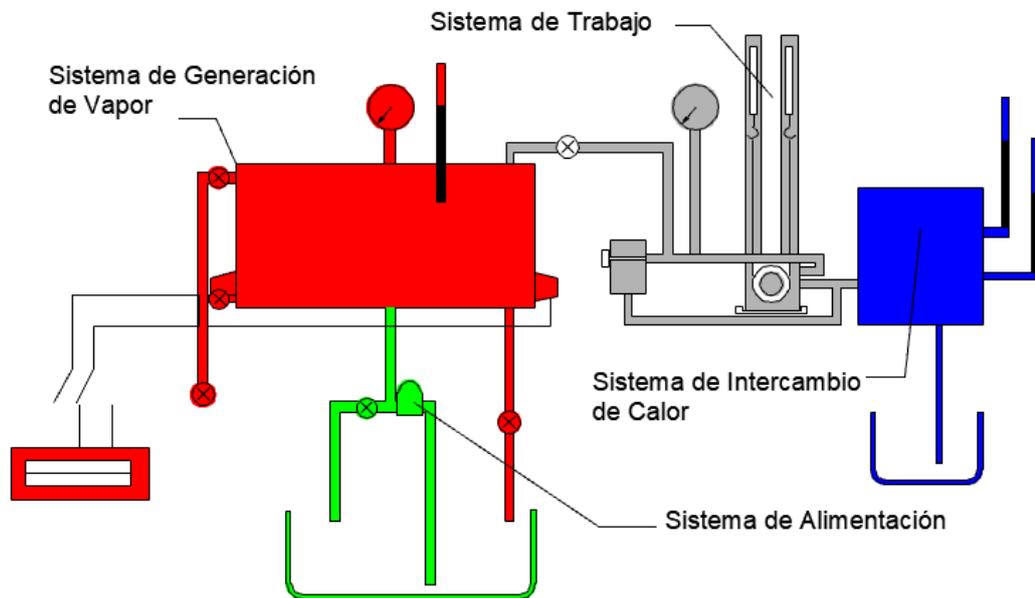


Figura 32 Sistemas del BPMV

Tabla 1.

Designación por colores de Sistemas de BPMV

SISTEMA	COLOR
Sistema de Alimentación	Verde
Sistema de Generación de Vapor	Rojo
Sistema Trabajo	Gris
Sistema de Intercambio de Calor	Azul

Una vez realizado el desmontaje del BPMV se lograron identificar fallas, reconocer el proceso de mantenimiento y seleccionar una alternativa a través de matrices de decisión.

3.3.1 Sistema de Alimentación del BPMV

El procedimiento para detectar fallas en el sistema de alimentación del Banco de Pruebas se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 33.

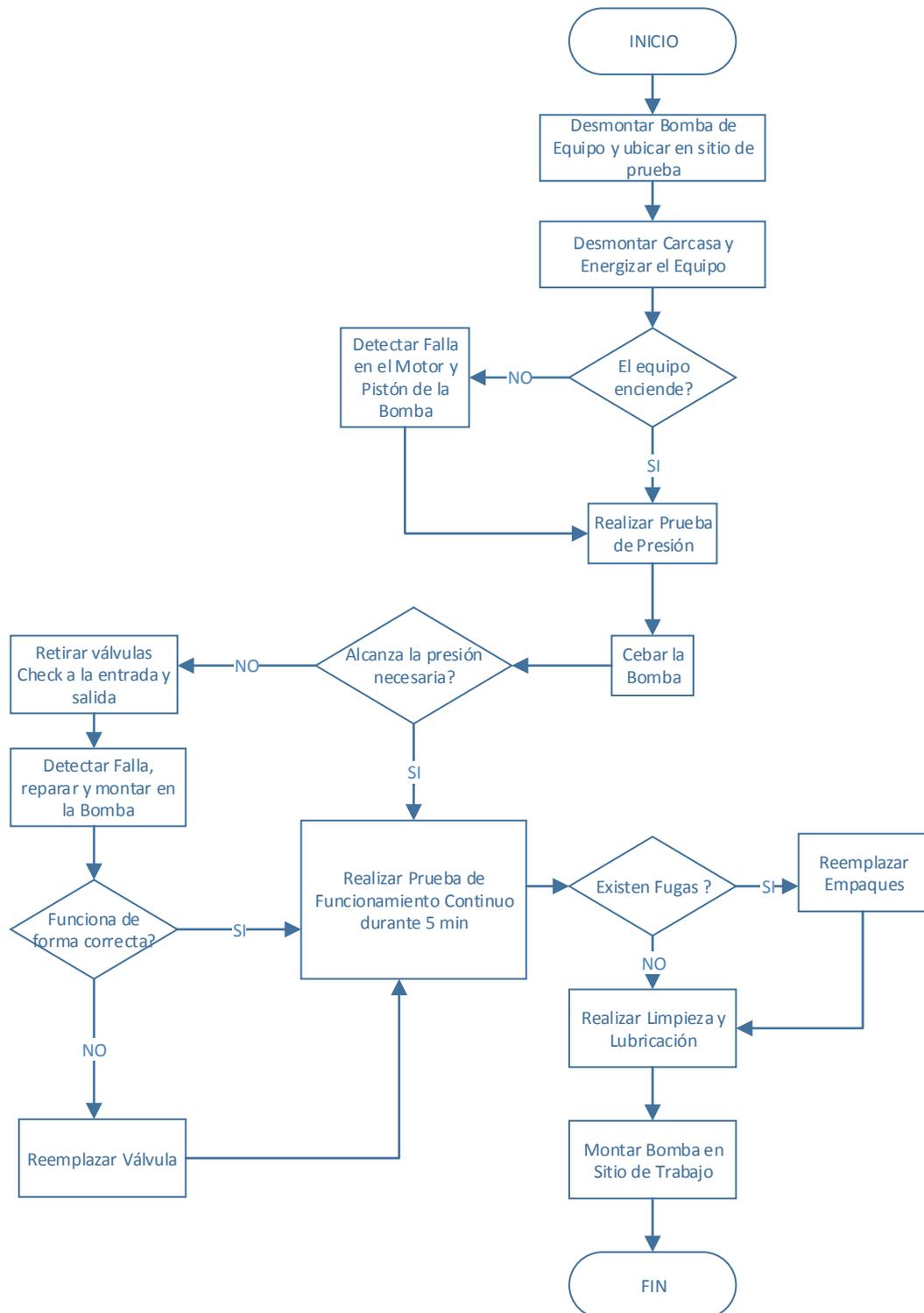


Figura 33 Flujograma detección de fallas en el S. de Alimentación

Después de realizar una evaluación guiada por el flujograma de la Figura 33, se establece el estado de los componentes del sistema de alimentación,

se indica las acciones a realizar como se muestra en la Tabla 2. Finalmente, los elementos requeridos para la implementación se mencionan en la misma tabla.

Tabla 2.
Evaluación del Sistema de Alimentación

Sistema de alimentación					
Elemento	Implementar	Estado Actual			Acciones a Realizar
		Bueno	Regular	Malo	
Bomba		X			<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza general • Lubricación partes móviles
Motor bomba		X			<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza general
Aceite Bomba				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo
Empaque de cámara bomba				X	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar empaques de la misma dimensión
Válvula check de retención a la entrada de la bomba				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazar y colocar correctamente en la entrada de la bomba
Válvula check de retención a la salida de la bomba				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazar y colocar correctamente en la salida de la bomba
Carcasa Bomba			X		<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza general y Pintura
Tanque de almacenamiento	X				<ul style="list-style-type: none"> • Selección del material de tanque de almacenamiento • Conexión a la bomba
Sensor de temperatura	X				<ul style="list-style-type: none"> • Selección acorde a la temperatura y presión requerida
Termopozos	X				<ul style="list-style-type: none"> • Construcción y montaje

El equipo no cuenta con un sistema automático de alimentación que permita mantener un nivel adecuado de agua en el caldero por lo que es necesario realizar una implementación de los elementos mencionados en la Tabla 2.

Una vez evaluado el sistema en general se procede a decidir la acción a tomar con los componentes que presenten algún daño como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3.
Acciones a Realizar en Bomba

Elemento/ Pieza	Acción a tomar		Observación
	Adquisición	Construcción	
Válvulas Check	X		• Tiene averías
Aceite de Bomba	X		• Aceite Quemado
Empaque de Bomba		X	• Presenta grietas

3.3.1.1 Reparación

3.3.1.1.1 Bomba Hidráulica

Son necesario dos válvulas check para lograr el sello en la cámara donde se encuentra el pistón. En primer lugar, una válvula check de retención a la entrada de la bomba y después la válvula check con alivio de presión en la salida, como se indica en la Figura 34. Debido a que a la salida de la bomba puede existir una sobrepresión en el caldero de manera que la válvula actúe como elemento de descarga.



Figura 34 Funcionamiento Válvulas Check

3.3.1.2 Implementación

De manera consecutiva se procede a seleccionar, través de matrices de decisión, los elementos que se requieren implementar son los siguientes: Tanque de almacenamiento, Sensor de temperatura y termopozos.

3.3.1.2.1 Tanque de Almacenamiento

Se quiere cerrar el ciclo termodinámico, por lo que es necesario implementar un tanque de almacenamiento de agua con las siguientes características:

- Conexión a la válvula de retención de entrada de la bomba.
- Válvula de purga para facilitar la limpieza
- Válvula de entrada de agua
- Control de nivel.
- Dispositivo para evitar el sobrellenado
- Rango de Temperatura: 15° – 40°C

La selección del material del tanque es de relevancia, para que cumpla con las características mencionadas. A continuación se evalúa los parámetros que se muestran en la Tabla 4, pues se detallan características como costo propiedades físicas y químicas, disponibilidad en el mercado.

Tabla 4.

Alternativas de material para el tanque de almacenamiento

	Solución	Características
A	Plástico Polietileno	Costo \$ 30
		Liviano
		T. Fusión aprox. 110°C
		Presenta menor resistencia al corte
B	Tol Galvanizado	Costo \$ 80
		Semiliviano
		T. Fusión aprox. 1315°C
		Presenta mediana resistencia al corte
C	Acero Inoxidable	Costo \$150
		Pesado

		T. Fusión aprox. 1427°C
		Presenta gran resistencia al corte

La Tabla 5 Muestra la ponderación para evaluar el criterio más importante, que sustenta la decisión a tomar.

Tabla 5.

Ponderación de Criterios de Evaluación para el Tanque

Criterio	Costo	Resistencia Corrosión	Peso	T. Fusión	Σ	Ponderación
Costo	1	10	10	5	26	0,41
Resistencia Corrosión	0	1	0	5	6	0,09
Peso	0	10	1	0	11	0,17
T. Fusión	5	5	10	1	21	0,33
				Total	64	1,00

Posterior a la ponderación de criterios se valora cada solución tomando en cuenta las características señaladas en las Tabla 6, 7, 8, 9 respectivamente. Para finalizar de acuerdo al mayor valor alcanzado se toma una de las alternativas planteadas como solución.

Tabla 6.

Ponderación de Costo

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Σ	Ponderación
Solución A	1	5	5	11	0,61
Solución B	0	1	5	6	0,33
Solución C	0	0	1	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 7.

Ponderación de Resistencia a la Corrosión

Resistencia Corrosión	Solución A	Solución B	Solución C	Σ	Ponderación
Solución A	1	5	5	11	0,61
Solución B	0	1	0	1	0,06
Solución C	0	5	1	6	0,33
			Total	18	1,00

Tabla 8.
Ponderación de Peso

Peso	Solución A	Solución B	Solución C	Σ	Ponderación
Solución A	1	5	5	11	0,61
Solución B	0	1	5	6	0,33
Solución C	0	0	1	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 9.
Ponderación de Temperatura de Fusión

T. Fusión	Solución A	Solución B	Solución C	Σ	Ponderación
Solución A	1	0	0	1	0,06
Solución B	5	1	0	6	0,33
Solución C	5	5	1	11	0,61
			Total	18	1,00

Tabla 10.
Conclusión de la selección del Tanque

	Costo	Resistencia Corrosión	Peso	T. Fusión	Σ	Preferencia
Solución A	0,25	0,06	0,11	0,02	0,43	1
Solución B	0,14	0,01	0,06	0,11	0,31	2
Solución C	0,02	0,03	0,01	0,20	0,26	3
				Total	1	

En definitiva la Tabla 10 indica que la solución A cumple de mejor manera los criterios planteados. De esta manera se selecciona un tanque de almacenamiento de plástico de polietileno.

3.3.1.2.2 Sensor de temperatura del sistema de alimentación

Para el completo análisis del ciclo es necesario implementar un sensor, el cual permita conocer la temperatura con la que ingresa el agua a la bomba Hidráulica; Deberá cumplir con los siguientes requerimientos:

- Bajo Costo

- Rango de Temperatura: 15° – 60°C
- Buena resistencia a la abrasión

A continuación, se describen las características de cada una de las opciones consideradas. La Tabla 11 se muestra costos, rango de temperaturas y la resistencia a la abrasión de diferentes sensores de temperatura.

Tabla 11.
Alternativas de Sensores de Temperatura

	Solución	Características
A	NTC (Termistor)	Costo Bajo
		Temperatura de Operación: -5 a 105°C
		Resistencia Baja a la Abrasión
B	Pt-100 RTD	Costo Alto
		Temperatura de Operación: 0 hasta 1250°C
		Resistencia Media a la Abrasión
C	Termopar TIPO K	Costo Mediano
		Temperatura de Operación: 0 hasta 1250°C
		Resistencia Media a la Abrasión

La Tabla 5 indica la ponderación para valorar el criterio más importante, que respalda la decisión a tomar.

Tabla 12.
Ponderación de Criterios de Evaluación para el Sensor de Temperatura de Bomba

Criterio	Costo	Temperatura Operación	Resistencia Abrasión	Σ	Ponderación
Costo	1	10	8	19	0,50
Temperatura Operación	8	1	2	11	0,29
Resistencia a la Abrasión	3	4	1	8	0,21
			Total	38	1,00

Posteriormente se valora cada solución tomando en cuenta las características señaladas en las Tabla 13, 14, 15 respectivamente. Para finalizar de acuerdo al mayor valor alcanzado se toma una de las alternativas planteadas como solución.

Tabla 13.
Ponderación de Costo

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Σ	Ponderación
Solución A	1	8	8	17	0,65
Solución B	2	1	0	3	0,12
Solución C	0	5	1	6	0,23
			Total	26	1,00

Tabla 14.
Ponderación de Temperatura de Operación

Temperatura Operación	Solución A	Solución B	Solución C	Σ	Ponderación
Solución A	1	9	9	19	0,76
Solución B	0	1	2	3	0,12
Solución C	0	1	2	3	0,12
			Total	25	1,00

Tabla 15.
Ponderación de Resistencia de Abrasión

Resistencia Abrasión	Solución A	Solución B	Solución C	Σ	Ponderación
Solución A	1	2	2	5	0,16
Solución B	8	1	7	16	0,50
Solución C	6	4	1	11	0,34
			Total	32	1,00

Tabla 16
Conclusión de la selección del Sensor de Temperatura

	Costo	Temperatura Operación	Resistencia a la Abrasión	Σ	Preferencia

Solución A	0,33	0,22	0,03	0,58	1
Solución B	0,06	0,03	0,11	0,20	3
Solución C	0,12	0,03	0,07	0,22	2
				1	

Se considera los datos obtenidos en la Tabla 16 se selecciona como solución la alternativa “A” con preferencia 1, debido a que cumple de mejor manera los criterios planteados. De esta manera se elige un sensor de temperatura tipo termistor NTC.

3.3.1.2.3 Termopozos

Generalmente las termoresistencias no se encuentran en contacto directo con el fluido. La principal función de los termopozos, es la de proteger a los sensores de temperatura contra los daños ocasionados debido a factores como: sobrepresión, corrosión o velocidad del producto a medir. Como se muestra en la Figura 35 los termopozos se construyen a partir de tubos con un extremo soldado.



Figura 35 Termopozos para los NTC's

Con la implementación de termopozos es posible el uso de NTC y se consigue:

- Aumentar la vida útil del sensor
- Fácil sustitución del sensor sin necesidad de vaciado del Sistema
- Reducción en niveles de Contaminación en el interior del Sistema

En la Figura 36 se muestra la comparación del Sistema de alimentación antes y después de realizar el mantenimiento. Es posible diferenciar claramente que el nuevo sistema de alimentación presenta un nuevo aspecto además permite una autonomía en la alimentación de agua hacia el caldero.



a) Antes



b) Después

Figura 36 Comparación del Sistema de Alimentación

3.3.2 Sistema de Generación de Vapor

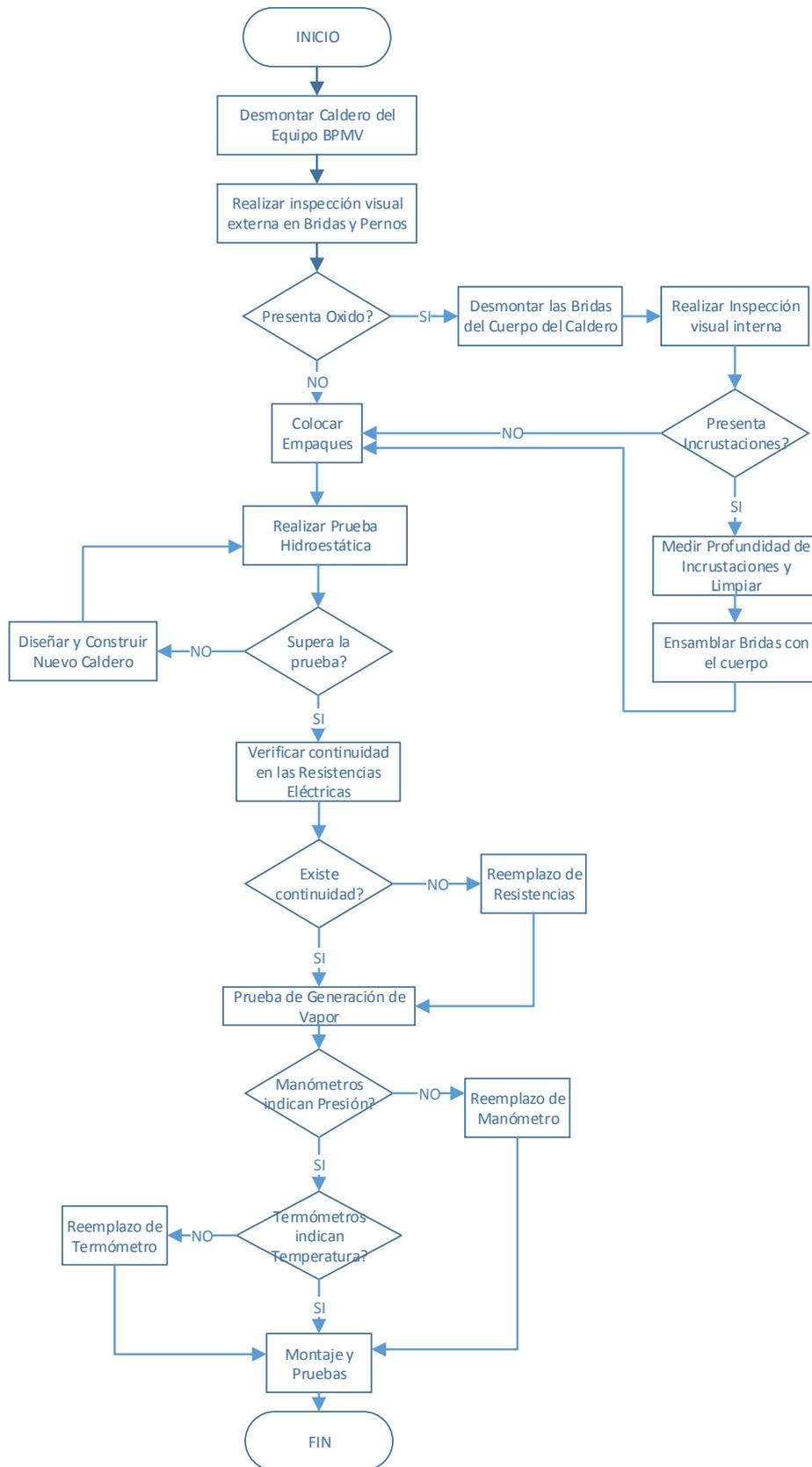


Figura 37 Flujograma detección de fallas en el S. Generación de Vapor

La metodología que se debe emplear para encontrar fallos en el sistema de generación de vapor se indican en el diagrama de flujo de la Figura 37. Posteriormente se describe el estado de los componentes del sistema de generación y las acciones de mantenimiento a realizar en la Tabla 17.

Tabla 17.
Evaluación del Sistema de generación de Vapor

Sistema de alimentación					
Elemento	Implementar	Estado Actual			Acciones a Realizar
		Bueno	Regular	Malo	
Cuerpo de caldero				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo • Diseño y construcción
Bridas y pernos de caldero				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo • Diseño y Construcción
Empaque de Caldero				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo • Seleccionar material • Colocar en bridas
Dispositivos de calentamiento				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo • Realizar selección respecto a durabilidad y costo
Tubo visor de nivel				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo
Termómetro			X		<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo por sensores de temperatura
Manómetro de presión		X			<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza y lubricación
Sensor de temperatura	X				<ul style="list-style-type: none"> • Selección respecto a temperatura de operación
Control programable de temperatura	X				<ul style="list-style-type: none"> • Selección del control de temperatura de respecto al tipo de sensor
Control de nivel	X				<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar acuerdo robustez
Control de Presión	X				<ul style="list-style-type: none"> • De acuerdo a durabilidad

Es necesario un reemplazo total del caldero con su instrumentación puesto que un mantenimiento requeriría de una mayor inversión y no garantiza su correcto funcionamiento. Además, es importante un rediseño que facilite la adquisición de datos, debido a que se requieren nuevos parámetros en el ciclo actual.

Tabla 18.

Acciones a realizar en S. generación de vapor

Elemento/ Pieza	Acción a tomar		Observación
	Adquisición	Construcción	
Cuerpo de Caldero y Bidas		X	<ul style="list-style-type: none"> • Incrustación en Pared de Caldero • Pernos aislados • Bidas presentan pandeo
Empaque de Caldero		X	<ul style="list-style-type: none"> • Presentan grietas y alto nivel de degradación
Dispositivos de Calentamiento	X		<ul style="list-style-type: none"> • Resistencias quemadas
Tubo visor de nivel	X		<ul style="list-style-type: none"> • Tiene una manguera plástica como visor.
Termómetro	X		<ul style="list-style-type: none"> • Presenta fugas

Una vez evaluado el sistema en general se procede a decidir la acción a tomar con los componentes que presenten algún daño, como se indica en la Tabla 18. Además, los componentes que requieran construcción se detalla el mapa de procesos.

3.3.2.1 Construcción

3.3.2.1.1 Cuerpo y Bidas de Caldero

Es necesario el diseño y construcción de un caldero que presente:

- Control de nivel
- Purgas
- Dispositivos de Calentamiento
- Seguridad en sitio

- Control de Presión
- Control de Temperatura
- Sensores de Temperatura

A continuación, se evalúa dos alternativas posibles de construcción del caldero, para lo cual es necesario establecer características en las formas de construcción. Al final, se tomará en cuenta una alternativa como solución, es importante que el diseño tenga una manufactura fácil y maneje materiales comerciales.

Tabla 19.
Alternativas de Construcción para el caldero

	Solución	Características
A	Tubo acoplado con Bridas	Costo \$ 500
		Manufactura
		Alta confiabilidad
B	Plancha rolada con Bridas	Costo \$ 700
		Manufactura
		Mediana Confiabilidad

Tabla 20.
Ponderación de Criterios de Evaluación para Construcción de Caldero

Criterio	Costo	Manufactura	Confiabilidad	Σ	Ponderación
Costo	1	8	7	16	0,38
Manufactura	10	1	0	11	0,26
Confiabilidad	5	9	1	15	0,36
			Total	42	1,00

Una vez establecido la ponderación de criterios en la Construcción del caldero como se indica en la Tabla 20, se evalúa cada solución tomando en cuenta las características señaladas en la Tabla 21, 22 y 23.

Tabla 21.
Ponderación de Costo

Costo	Solución A	Solución B	Σ	Ponderación
Solución A	1	10	11	0,69
Solución B	4	1	5	0,31

		Total	16	1,00
--	--	-------	----	------

Tabla 22.

Ponderación de Manufactura

Manufactura	Solución A	Solución B	Σ	Ponderación
Solución A	1	10	11	0,65
Solución B	5	1	6	0,35
		Total	17	1,00

Tabla 23.

Ponderación de Confiabilidad

Confiabilidad	Solución A	Solución B	Σ	Ponderación
Solución A	1	10	11	0,55
Solución B	8	1	9	0,45
		Total	20	1,00

Tabla 24.

Conclusión de la selección del tipo de Construcción de Caldero

	Costo	Manufactura	Confiabilidad	Σ	Preferencia
Solución A	0,26	0,17	0,20	0,63	1
Solución B	0,12	0,09	0,16	0,37	2
			Total	1,00	

Después de realizar la evaluación de los principales parámetros que intervienen en la construcción de un caldero. Se observa en la Tabla 24 que la Solución A es la mejor opción, lo cual indica que el caldero se encontrara constituido por un tubo acoplado con bridas. El mapa de procesos para la construcción del caldero y bridas se indica en la Figura 38, donde se detallan las actividades que se realizaran.

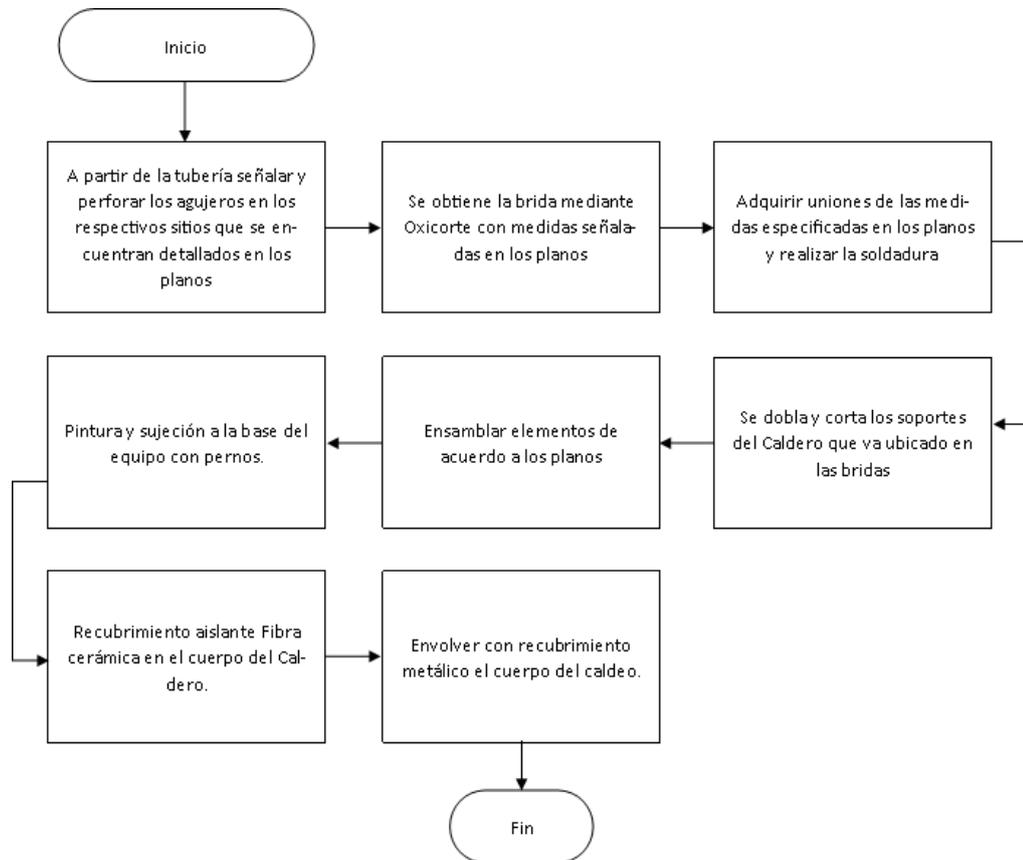


Figura 38 Mapa de procesos Construcción Caldero

3.3.2.1.2 Empaque del Caldero

Los empaques del caldero, que serán ubicados en las bridas tienen como función principal contener el fluido de operación del caldero permitiendo un sello. El empaque de Asbesto cumple con los requerimientos presentados a continuación:

- Temperatura de Operación 150°C.
- Propiedades de Aislamiento Térmico.
- Resistencia a la descomposición térmica.
- Facilidad de Fabricación.
- Costo Medio.

En la Figura 39 se describe el conjunto de procedimientos que se llevan a cabo para la construcción del empaque de bridas.

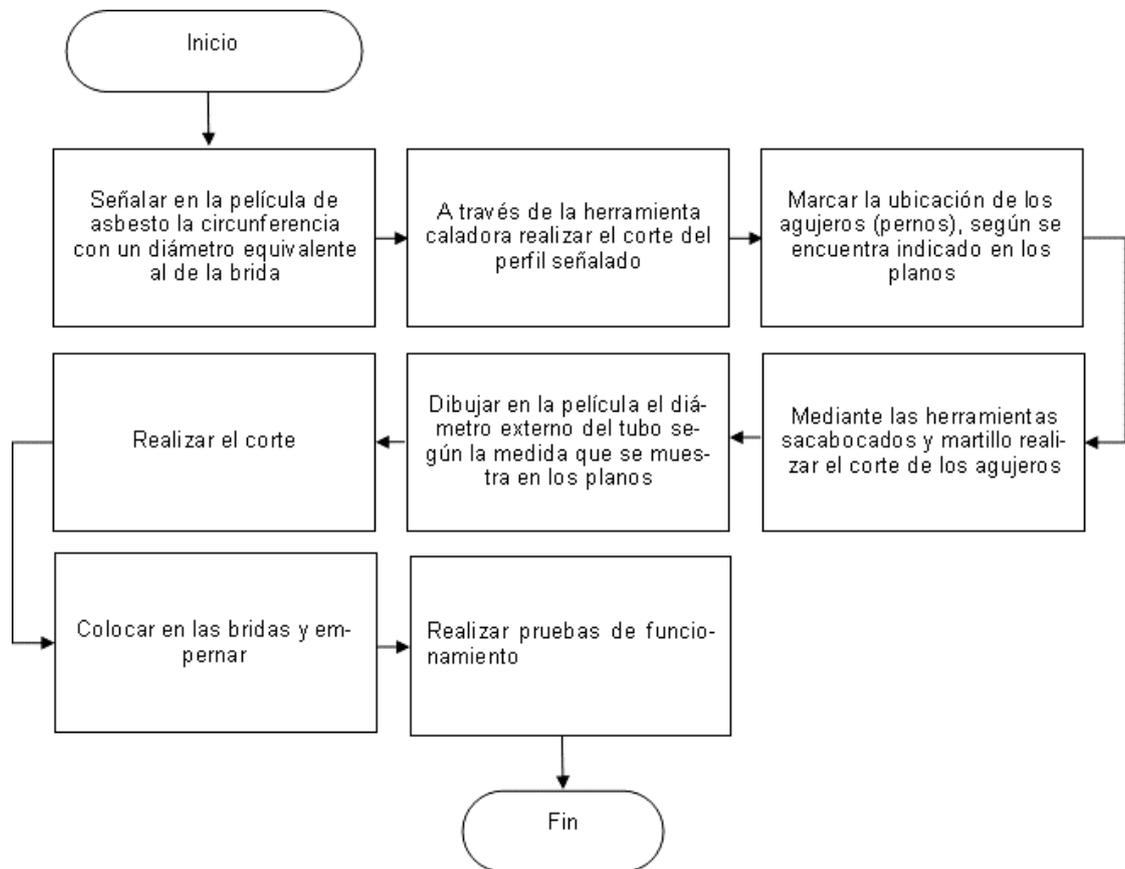


Figura 39 Mapa de procesos Construcción Empaque Caldero

3.3.2.2 Implementación

A continuación, se selecciona, a través de matrices de decisión y evaluación de criterios. Los elementos que se requieren implementar para el correcto funcionamiento del sistema de generación de vapor son los siguientes: sensor de temperatura, control programable de temperatura, control de nivel y presión. Con la implementación de estos dispositivos se garantiza la autonomía en el funcionamiento del caldero, de manera que evita que el sistema sobrepase las presiones y temperaturas predeterminadas.

3.3.2.2.1 Dispositivos de calentamiento

Vale destacar que para la generación de vapor es necesario un dispositivo que entregue potencia eléctrica en forma de calor con alta durabilidad. En el mercado existen dos alternativas frecuentemente usadas, cuyas características se detallan en la Tabla 25.

Tabla 25.
Alternativas de dispositivo de Calentamiento

	Solución	Características
A	Resistencias Eléctricas	Costo \$ 350
		Mediana Durabilidad
		Menor eficiencia
B	Cartuchos de Inmersión	Costo \$ 120
		Mediana Durabilidad
		Mayor eficiencia

Tabla 26.
Ponderación de Alternativas en dispositivos de Calentamiento

Criterio	Costo	Durabilidad	Eficiencia	Σ	Ponderación
Costo	1	8	2	11	0,42
Durabilidad	5	1	3	9	0,34
Eficiencia	3	2	1	6	0,23
			Total	26	1

A continuación, se evalúa las características en las Tablas 27, 28 y 29. Al término se procede a determinar una alternativa como solución.

Tabla 27.
Ponderación de Costo de dispositivo de calentamiento

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	1	5	6	0,35
Solución B	10	1	11	0,65
		Total	17	1

Tabla 28.
Ponderación de Durabilidad de dispositivo de calentamiento

Durabilidad	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	1	5	6	0,5

Solución B	5	1	6	0,5
		Total	12	1

Tabla 29.

Ponderación de Eficiencia de dispositivo de calentamiento

Eficiencia	Solución A	Solución B	Σ	Ponderación
Solución A	1	6	7	0,44
Solución B	8	1	9	0,56
		Total	16	1

Tabla 30.

Conclusión en selección de dispositivo de calentamiento

	Costo	Durabilidad	Eficiencia	Σ	Preferencia
Solución A	0,14	0,17	0,10	0,42	2
Solución B	0,27	0,17	0,12	0,57	1
			Total	1	

Una vez realizada la evaluación de las alternativas, como se indica en la Tabla 30. La solución B tiene una preferencia de 1 por lo que es el dispositivo de calentamiento adecuado para el BPMV, lo que significa que los cartuchos de inmersión son el dispositivo de calentamiento.

3.3.2.2.2 Sensor de Temperatura del sistema de alimentación

El sensor de temperatura del caldero será capaz de operar a una temperatura de operación de hasta 200 °C y debe poseer una alta resistencia a la abrasión. De la Tabla 11 se evaluó las características de los tres tipos de sensores que generalmente se usan para este tipo de aplicación. La ponderación de los principales criterios que se toma en cuenta para selección del sensor se presenta a continuación en la Tabla 31.

Tabla 31.

Ponderación de Criterios de Evaluación para Sensor de Temperatura en el Caldero

Criterio	Costo	Temperatura Operación	Resistencia Abrasión	Σ	Ponderación
Costo	1	7	8	16	0,46

Temperatura Operación	8	1	2	11	0,31
Resistencia Abrasión	3	4	1	8	0,23
			Total	35	1,00

Se valora cada solución de acuerdo a las respectivas ponderaciones y características señaladas en la Tabla 32, 33, 34 respectivamente. Para finalizar, la alternativa que tenga mayor ponderación se la considera como solución.

Tabla 32.
Ponderación de Costo

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Σ	Ponderación
Solución A	1	8	8	17	0,52
Solución B	2	1	2	5	0,15
Solución C	5	5	1	11	0,33
			Total	33	1,00

Tabla 33.
Ponderación de Temperatura de Operación

Temperatura Operación	Solución A	Solución B	Solución C	Σ	Ponderación
Solución A	1	2	2	5	0,13
Solución B	9	1	8	18	0,47
Solución C	0	7	8	15	0,39
			Total	38	1,00

Tabla 34.
Ponderación de Resistencia de Abrasión

Resistencia Abrasión	Solución A	Solución B	Solución C	Σ	Ponderación
Solución A	1	2	2	5	0,18
Solución B	8	1	7	16	0,57
Solución C	2	4	1	7	0,25
			Total	28	1,00

Tabla 35.
Conclusión de la selección del Sensor de Temperatura

	Costo	Temperatura Operación	Resistencia Abrasión	Σ	Preferencia
Solución A	0,24	0,04	0,04	0,32	2
Solución B	0,07	0,15	0,13	0,35	1
Solución C	0,15	0,12	0,06	0,33	3
				1	

Como se observa en la Tabla 35 la mejor alternativa para medir la temperatura en el interior del caldero es la solución B, es decir, el sensor de temperatura será un termistor tipo PT-100.

3.3.2.2.3 Control programable de temperatura

El control de temperatura receipta una señal de entrada de un sensor de temperatura como un termopar o termistor. Realiza una comparación entre la temperatura establecida de control y la temperatura real, y proporciona una salida a un elemento de control. Además, permite al usuario visualizar en una pantalla la variable requerida.

Las principales aplicaciones de los controladores programables de temperatura son: mantenimiento de temperatura en tanques, alarmas en sistemas de calentamiento e interrupción de energía en resistencias eléctricas. Una vez que se ha consultado en el mercado los controladores de temperatura se analizan tres tipos, como se detalla en la Tabla 36.

Tabla 36.
Tipos de Controladores Programables de Temperatura

Tipo	Descripción	Características
Controlador ON/OFF	Un controlador ON/OFF conmutará la salida sólo cuando la temperatura sobrepase el punto de control.	Simple Bajo Costo Trabaja en Sistemas Grandes
Controlador proporcional	Un controlador proporcional reduce la potencia promedio que se provee al dispositivo de calentamiento, a medida que la temperatura se acerca al punto de control.	Costo Mediano Trabaja en Sistemas Grandes y Pequeños.
Controlador PID	Combina el control proporcional con dos ajustes (integral y derivada), que permite compensación automática.	Alta precisión Estructura compleja. Trabaja en sistemas con baja cantidad de masa.

Es importante el control de temperatura dentro del caldero para prevalecer el buen estado de los cartuchos de inmersión. Debido a que en el antiguo caldero no existía dicho sistema se quemaron las resistencias. En definitiva, se optó por un controlador programable de temperatura ON/OFF para el caldero. Debido que el equipo BPMV requiere un sistema de control simple que mantenga un intervalo de temperatura alrededor del punto de ajuste dentro del caldero.

3.3.2.2.4 Control de nivel

Para garantizar la autonomía y seguridad en el funcionamiento del caldero, es necesario un control de nivel que brinde confiabilidad en la operación del BPMV. A continuación se indican las características de dos tipos de control de nivel como se muestra en la Tabla 37.

Tabla 37.
Alternativas de Solución para Control de Nivel en el Caldero

	Solución	Características
A	Control de Nivel por Flotador	Menor Costo
		Simple y Robusta
		Sencillas de control de nivel donde soportan varios agentes agresivos como tanques de residuales.
		Operación a: 250°C y 25 bar
B	Control de Nivel por Conductividad	Mayor Costo
		Simple con uso de la conductividad eléctrica del fluido. Se puede disponer a distintas alturas donde se ejerce interruptores por máxima y mínima presión como calderos.
		Operación a: 200°C y 12 bar

Debido a una alta exigencia de la seguridad en la operación del caldero, se procede a realizar un diferente análisis en el que toman importancia las siguientes características:

- Se requiere que el control de nivel interactúe con el sistema de alimentación (bomba) mediante el uso de interruptores de nivel (electrodos de conductividad).

- La operación del caldero es 4 bar y 150°C, por lo que no requiere un control de alta robustez.
- Se debe aprovechar la conductividad del fluido.
- El fluido de operación no presenta agentes corrosivos.
- Hay que tomar en cuenta que el control de nivel por flotador en ocasiones puede trabarse.

Después de analizar las características que brindan los diferentes controladores de nivel se opta la solución B un control nivel por conductividad.

En la Figura 40 se muestra la comparación del sistema de generación de vapor antes y después de realizar el mantenimiento. Además, es posible diferenciar claramente que el nuevo sistema de generación presenta la implementación de los nuevos elementos que permiten brindar autonomía en el funcionamiento del caldero.



a) Antes



b) Después

Figura 40 Caldero y Bidas



a) Antes



b) Después

Figura 41 Resistencias Eléctricas del Caldero



b) Antes

b) Después

Figura 42 Visor de Nivel

3.3.3 Sistema de Trabajo

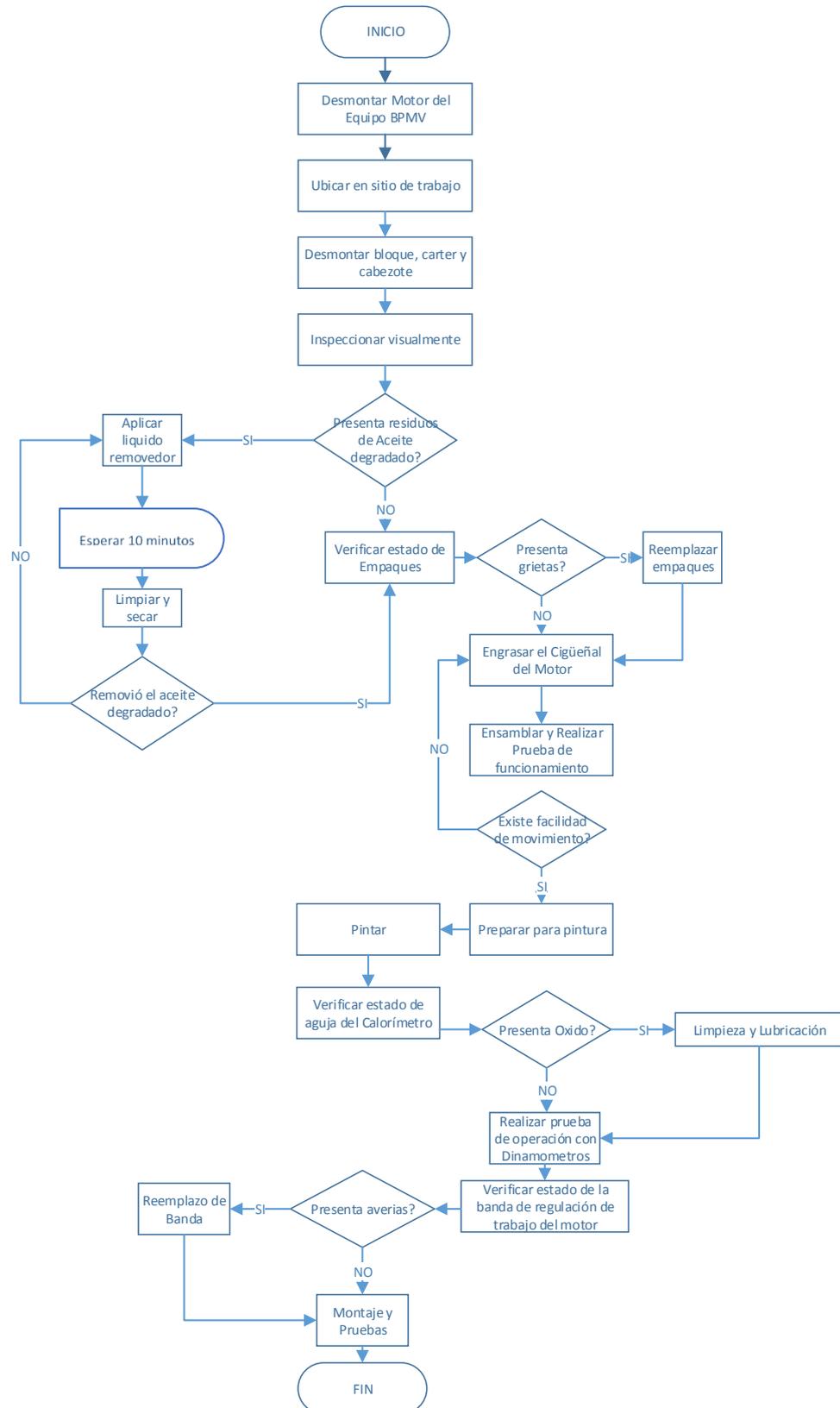


Figura 43 Flujograma detección de fallas en el S. de Trabajo

El conjunto de pasos a seguir para detectar fallos en el sistema de trabajo se indica en el diagrama de flujo de la Figura 43. Posteriormente se describe el estado de los componentes del sistema de trabajo y las acciones de mantenimiento a realizar en la Tabla 38.

Tabla 38.

Evaluación del Sistema de generación de Vapor

Sistema de alimentación					
Elemento	Implementar	Estado Actual			Acciones a Realizar
		Bueno	Regular	Malo	
Bloque del motor		X			<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de restos de aceite • Eliminar óxido
Cabezote de motor		X			<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de impurezas • Igualar la superficie con pasta de pulir
Cárter de motor		X			<ul style="list-style-type: none"> • Retirar y limpiar restos de aceite
Aceite del motor				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo
Empaque entre cárter y bloque de motor				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo
Empaque entre cigüeñal y bloque de motor				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo
Empaque entre cabezote y el bloque del motor				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo
Cigüeñal		X			<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza y lubricación
Calorímetro de estrangulación		X			<ul style="list-style-type: none"> • Desmontaje y limpieza de la aguja
Dinamómetro			X		<ul style="list-style-type: none"> • Calibración
Banda de regulación de trabajo				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo
Sensor de temperatura Salida del motor	X				<ul style="list-style-type: none"> • Selección respecto a temperatura de operación

En la Tabla 39 se indican las acciones a realizar en los componentes del sistema de trabajo que presentan alguna avería y no es posible un

mantenimiento. Si los componentes requieren de características específicas se procederá a fabricar, caso contrario se realizará su adquisición.

Tabla 39.
Acciones a realizar en S. de Trabajo

Elemento/ Pieza	Acción a tomar		Observación
	Adquisición	Construcción	
Aceite de Motor	X		<ul style="list-style-type: none"> • Aspecto blanco pegajoso • Trabajo a altas temperaturas durante varios ciclos de operación.
Banda de Regulación de Trabajo	X		<ul style="list-style-type: none"> • Presenta deterioro
Empaque entre cárter y bloque de motor		X	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta grietas, presentando fugas de vapor
Empaque entre cigüeñal y bloque de motor		X	
Empaque entre cabezote y el bloque del motor		X	

3.3.3.1 Reparación

3.3.3.1.1 Banda de Regulación de Trabajo

En el estado actual del equipo se menciona la ausencia de la banda para regulación de trabajo que ejerce el motor. Para lo cual se ha indagado los dispositivos que presentaba el equipo BPMV en su condición de nuevo. El material con el que se encontraba fabricado la banda de regulación de trabajo era Cuero, por lo que se decide implementar una banda del mismo material.

3.3.3.1.2 Empaques de Motor

En el motor a vapor se realizó una copia exacta de los empaques, que garantice una correcta hermetización. El material con el que se fabricaran es papel victoria como se muestra en la Figura 44. La principal función de los empaques es evitar fugas de vapor.



Figura 44 Juego de Empaques del Motor a Vapor Nuevos – Viejos

3.3.3.2 Implementación

A continuación, se selecciona, a través de evaluación de criterios. Los elementos que se requieren implementar para el correcto funcionamiento del sistema de trabajo.

3.3.3.2.1 Sensor de temperatura del sistema de trabajo

Es fundamental determinar el valor del parámetro térmico a la salida del motor, para desarrollar el análisis termodinámico que cumple el BPMV, por lo que se tiene que implementar un sensor en el sitio. El rango de temperatura a la salida del motor oscila entre 80 a 100 °C. Debido a esta característica como se puede observar en la Tabla 35, es necesario implementar un sensor de temperatura tipo termistor PT-100 al igual que en el Caldero.

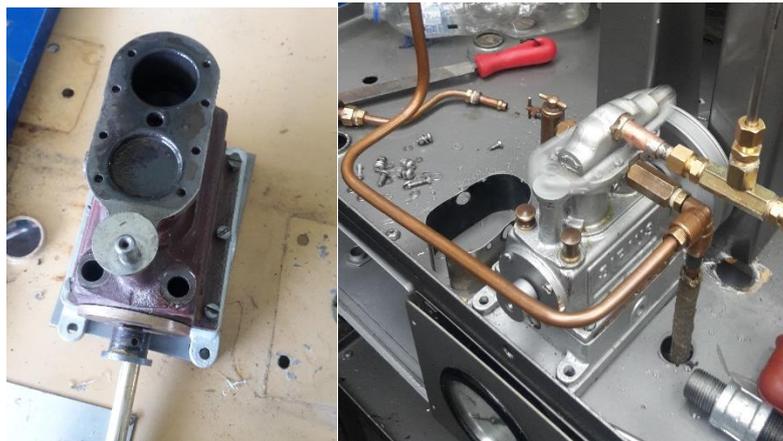
En la Figura 45, 46 y 47 se muestra la comparación del Sistema de trabajo antes y después de realizar el mantenimiento. Se puede observar claramente la diferencia del nuevo aspecto que presenta, además de la implementación que permitirá la adquisición de datos.



a) Antes

b) Después

Figura 45 Depósito de Aceite del Motor a Vapor



a) Antes

b) Después

Figura 46 Cigüeñal del Motor a Vapor



a) Antes

b) Después

Figura 47 Sistema de Regulación de la Cantidad de Trabajo

3.3.4 Sistema de Intercambio de Calor

A través el diagrama de flujo de detección de fallas mostrada en la Figura 48, se determinan las fallas que existen en el sistema de intercambio de calor. De manera continua se evalúa cada uno de los componentes asociados al sistema, como se indica en la Tabla 40.

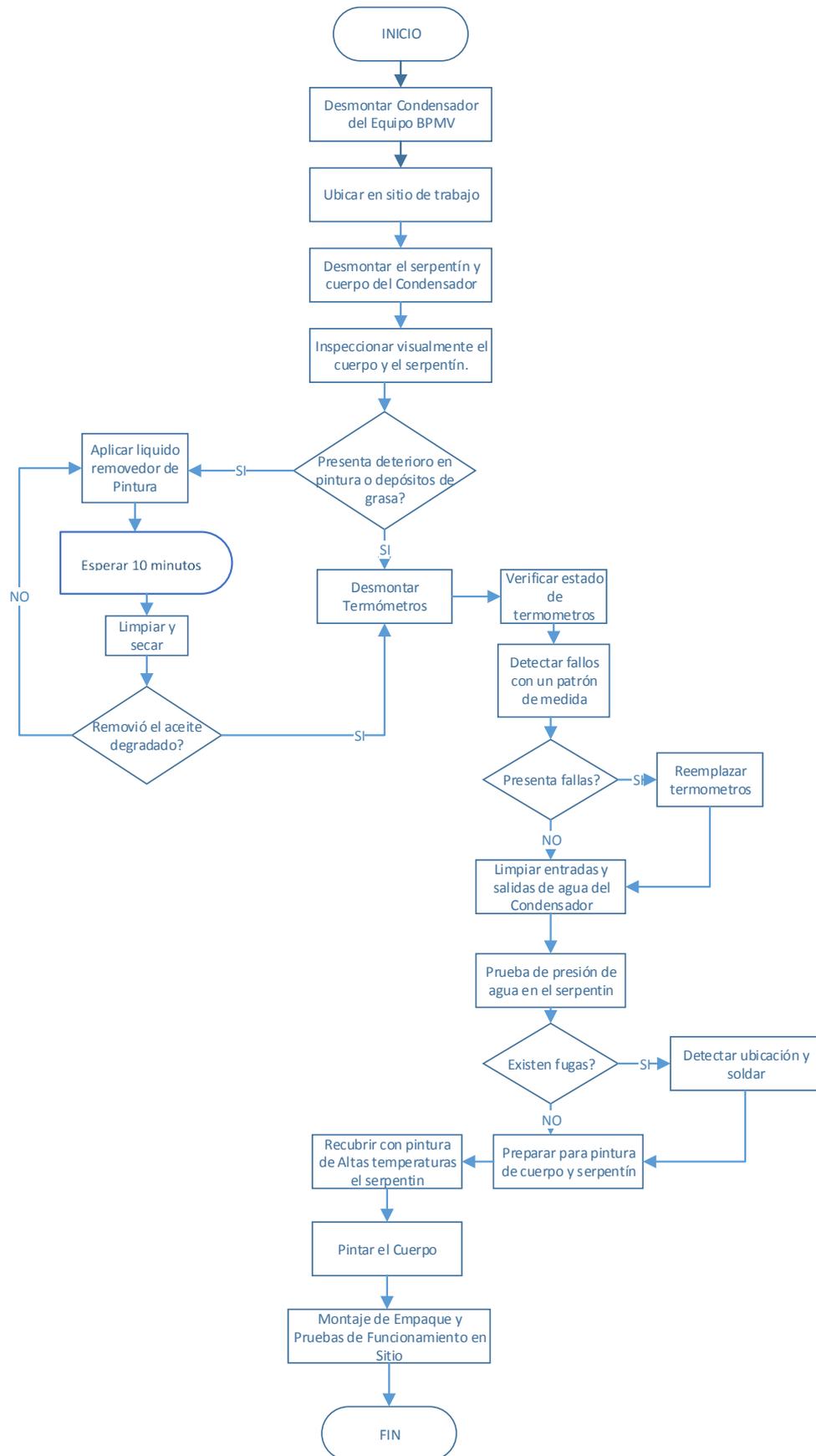


Figura 48 Flujograma detección de fallas en el S. de Intercambio de calor

Tabla 40.

Evaluación del S. de Intercambio de calor

Sistema de alimentación					
Elemento	Implementar	Estado Actual			Acciones a Realizar
		Bueno	Regular	Malo	
Cuerpo del condensador		X			<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de la pintura • Recubrir con pintura de alta temperatura
Serpentín del condensador		X			<ul style="list-style-type: none"> • Lavar y retirar los restos dentro del serpentín • Recubrir con pintura de alta temperatura
Termómetro entrada de agua al condensador			X		<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo por sensor de temperatura
Empaque de condensador				X	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo
Termómetro salida de agua del condensador			X		<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo por sensor de temperatura
Sensor de temperatura entrada de agua al serpentín del condensador	X				<ul style="list-style-type: none"> • Selección respecto a temperatura de operación
Sensor de temperatura salida de agua al serpentín del condensador	X				<ul style="list-style-type: none"> • Selección respecto a temperatura de operación
Sensor de temperatura a la salida del condensado	X				<ul style="list-style-type: none"> • Selección respecto a temperatura de operación
Construcción de termopozos	X				<ul style="list-style-type: none"> • Construcción y montaje

Además, se señala las decisiones en la Tabla 41 de los componentes que no es posible su mantenimiento.

Tabla 41.

Acciones a realizar en S. de Intercambio de calor

Elemento/ Pieza	Acción a tomar		Observación
	Adquisición	Construcción	
Empaque de Condensador		X	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta grietas, presentando fugas de vapor

3.3.4.1 Reparación

3.3.4.1.1 Empaque del condensador

Una vez ensamblado se ejecuta un ensayo en el que se introduce aire a presión para verificar que no exista ningún tipo de fuga tanto en el serpentín como en el cuerpo del condensador. Al finalizar la ejecución del ensayo se observó que existe una pequeña fuga, ocasionado por el mal estado del empaque. Se procede a realizar el remplazo del elemento, el material del empaque es el mismo que se usara en el Caldero.

3.3.4.2 Implementación

A través de una evaluación de varias alternativas se procede a seleccionar una solución que permita cumplir con las necesidades del sistema de intercambio de calor, así como la instrumentación necesaria.

3.3.4.2.1 Medidor de Caudal

En el desarrollo del análisis Termodinámico del ciclo que cumple el BPMV, es necesario determinar el valor del caudal de agua que circula a través del condensador. Por tal razón es fundamental la implementación de un dispositivo que contabilice la variable. Se establece en la Tabla 42 dos alternativas de solución para su posterior análisis.

Tabla 42.

Alternativas Medición de Caudal del Condensador

	Solución	Características
A	Caudalímetro	Costo \$ 180
		Superficie lisa
B	Medidor de Flujo Volumétrico	Costo \$ 35
		Superficie presenta ligera rugosidad

Debido al elevado costo que presenta el caudalímetro se opta de forma directa por el medidor de flujo volumétrico. A pesar de la diferencia de costos el medidor de flujo volumétrico realiza la misma función, sin variar de forma significativa el valor real del parámetro.

3.3.4.2.2 Sensores de Temperatura

El análisis termodinámico requiere los valores de temperatura en tres determinadas posiciones del Sistema de intercambio de calor:

- Entrada de Agua al serpentín del Condensador
- Salida de Agua al serpentín del Condensador
- Salida de Condensado

En los tres puntos de medida el rango de temperatura oscila entre 15 a 60 °C. Debido a las características presentadas en los puntos mencionados anteriormente y cómo se observa en la Tabla 16, la mejor opción de sensor al igual que en la entrada de la Bomba es un sensor de temperatura tipo termistor NTC. De manera similar que, en el sensor de temperatura de la bomba, se requiere el uso de termopozos como se detalló en el Sistema de Alimentación.

En la Figura 49 y 50 se muestra la comparación del Sistema de intercambio de calor antes y después de realizar el mantenimiento. Se puede observar claramente la diferencia del nuevo aspecto que presenta el sistema, además de la implementación de los sensores de temperatura que permitirá la adquisición de datos a la entrada y salida del condensador.



b) Antes

b) Después

Figura 49 Serpentin del Condensador



c) Antes

b) Después

Figura 50 Condensador del BPMV

3.4 Resumen

En el capítulo 3 se muestra una división de los sistemas que conforman el banco de pruebas motor a vapor que son: sistema de alimentación, sistema de generación de vapor, sistema de trabajo y sistema de intercambio de calor. A los diversos componentes de los sistemas se los sometió a un proceso de detección de fallas a través de diagramas de flujo en donde se determina el estado y permite una descripción de las acciones pertinentes que se tomara en cada uno de los componentes.

Además, se decide una solución de posibles alternativas de implementación mediante el uso de matrices de decisión y finalmente se muestra una comparación grafica de cómo se encontraba antes y después del equipo.

CAPÍTULO IV

SITUACIÓN ACTUAL DEL EQUIPO MODERNIZADO

El presente capítulo brinda una descripción de las características de los elementos que se han determinado para la implementación de los sistemas en el BPMV. Además, es importante mostrar el diseño de los elementos que requieren ser reemplazados. En definitiva, el BPMV, como se indica en la Figura 51, posee las siguientes partes y componentes.

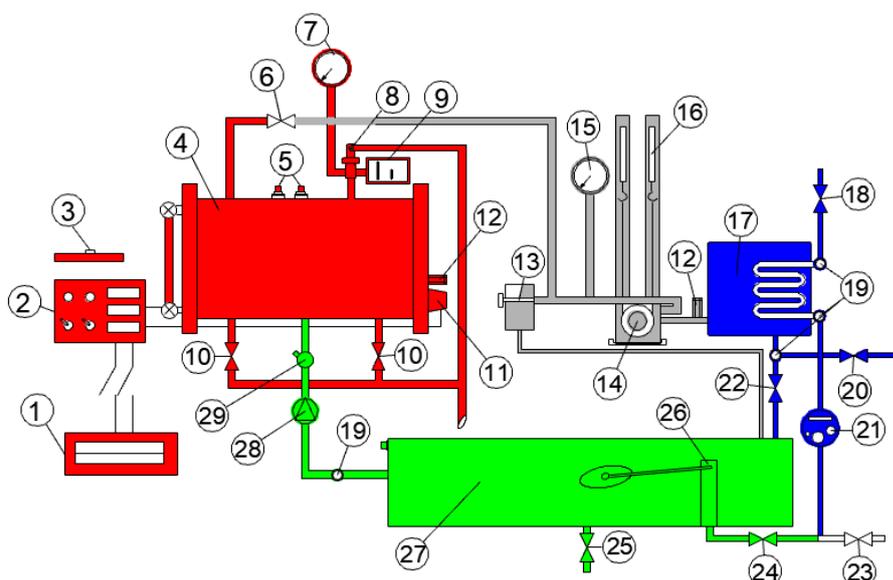


Figura 51 Partes y Componentes del BPMV

Tabla 43.

Descripción de Partes y Componentes del BPMV

Descripción			
1.	Vatímetro	16.	Dinamómetros
2.	Panel de Control	17.	Condensador
3.	Conexión de Terminales NTC	18.	Válvula Reguladora Caudal
4.	Caldero	19.	Termistor NTC
5.	Electrodos de Conductividad	20.	Válvula Condensado 1
6.	Válvula de Vapor	21.	Medidor de Flujo Volumétrico
7.	Manómetro del Caldero	22.	Válvula Condensado 2
8.	Válvula de Seguridad	23.	Válvula Paso Agua de Red
9.	Switch de Presión	24.	Válvula de Paso del Tanque
10.	Válvula de Purga del Caldero	25.	Válvula de Purga del Tanque
11.	Cartuchos de Inmersión	26.	Control de Nivel de Flotador
12.	RTD PT100	27.	Tanque de Almacenamiento

	13. Calorímetro de Estrangulación		28. Bomba de Pistón
	14. Motor a Vapor		29. Válvula Check-Alivio
	15. Manómetro Entrada del Motor		

4.1 Sistema de Alimentación

Como se puede observar en la Figura 52, se implementó el tanque de almacenamiento ya que anteriormente no contaba con uno y es de importancia reciclar el agua después de terminar el ciclo.



Figura 52 Implementación en Sistema de Alimentación

4.1.1 Tanque de Almacenamiento

El tanque es de Polipropileno con un Volumen de 20L y posee los siguientes dispositivos:

- Dispositivo de Sobrellenado
- Válvula de Purga 1/2"
- Conexión a la válvula de retención de entrada de la bomba
- Válvula de entrada de agua 1/2"

Además, el tanque de almacenamiento cuenta con un control de nivel tipo flotador como el que se observa en la Figura 53, permite el paso de agua, en el instante en que se encuentra vacío.

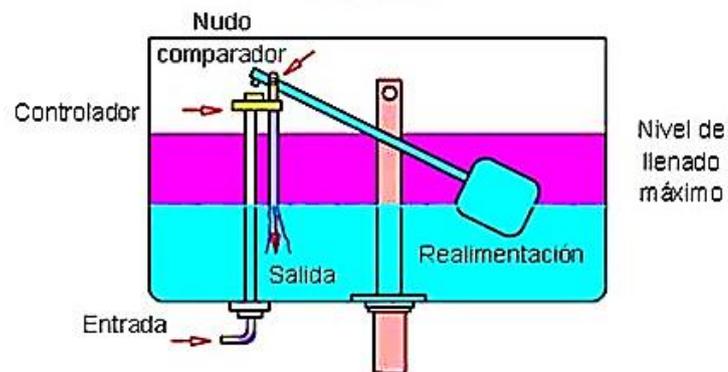


Figura 53 Control de Nivel tipo Flotador

4.1.2 Válvulas Check

El mantenimiento de la bomba se centra principalmente en el reemplazo de las válvulas check: Una válvula de retención a la entrada de la bomba como se observa en la Figura 54 que presenta las características que se mencionan en la tabla 44.



Figura 54 Válvula Check

Tabla 44.

Características Válvula Check

Características	Descripción
Tipo	Válvula Check
Costo	\$8
Material	Bronce
Diámetro	1/2"
Rosca	NPT
Presión	600 lb

En la salida de la bomba se reemplaza por una válvula con alivio de presión en la salida como se indica en la Figura 55, cuyas características se presentan en la Tabla 45.



Figura 55 Válvula Check con Alivio de Presión

Tabla 45.

Características Válvula Check con Alivio de Presión

Características	Descripción
Tipo	Válvula Check con Alivio
Costo	\$15
Material	Acero Galvanizado
Diámetro	1/2"
Rosca	NPT
Presión	300 lb

4.1.3 Sensor de Temperatura

El Sensor de Temperatura es de tipo termistor NTC, se conforma por una cabeza metálica que permite medir la temperatura y se transmite a través de un cable con recubrimiento plástico como se observa en la Figura 56. El principio de funcionamiento radica en el uso electrodos internos que detectan calor y lo miden a través de pulsos eléctricos. Las características técnicas del sensor se presentan en la Tabla 46.



Figura 56 Termistor NTC

Tabla 46.

Características técnicas de termistor NTC

Características	Descripción
Tipo de sensor	Termistor
Costo	Bajo
Temperatura de operación	-5 a 105°C
Material	Níquel o cobalto
Precisión	Bajo
Resistencia a la abrasión	Bajo
Numero de hilos	2

4.2| Sistema de generación de Vapor

El sistema de generación de vapor se encuentra conformado por el caldero y sistemas de control como se observa en la Figura 57. A partir del análisis que se llevó a cabo se decidió construir un nuevo caldero que brinde seguridad y funcionalidad.

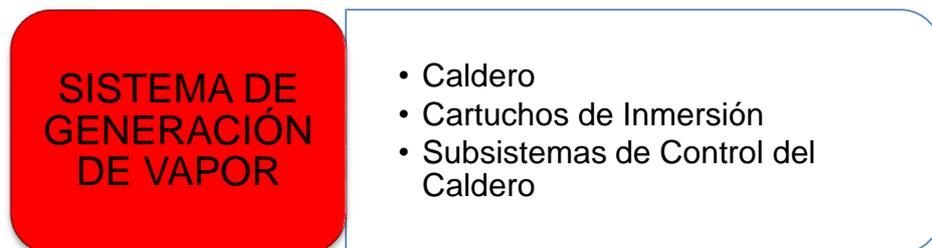


Figura 57 Implementación en Sistema de generación de vapor

4.2.1 Caldero

Es necesario tomar en cuenta los requerimientos como son temperatura y presión de operación para el diseño de los componentes que se indican en la Figura 58.

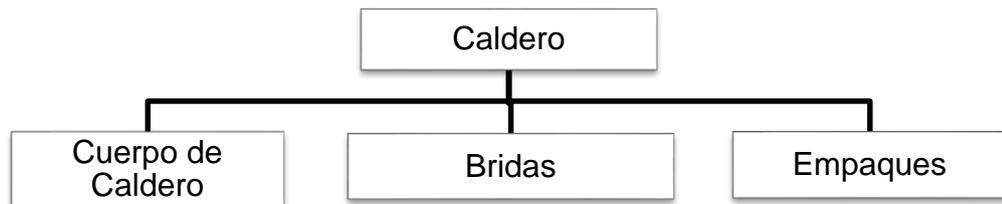


Figura 58 Elementos que conforman el Caldero

4.2.1.1 Cuerpo del Caldero

Para el diseño del nuevo caldero es necesario realizar el cálculo del espesor mediante el Código ASME, Sección VIII División 1, "DISEÑO DE RECIPIENTES A PRESIÓN". El BPMV requiere una presión de operación de 60 psi para que el sistema de trabajo funcione de manera correcta. (Otegui, 2012). Además, el caldero alcanzara una temperatura máxima de 200°C.

La presión de diseño de un recipiente está dada por la Ecuación 7:

$$P_d = P_o + 30 \quad (7)$$

Donde:

P_d : Presión de diseño (psi)

P_o : Presión de operación (psi)

El Cálculo del Espesor de pared para el cuerpo del caldero viene dado por la Ecuación 8:

$$t = \frac{P_d \cdot (R + CA)}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_d} + CA \quad (8)$$

Donde:

t: Espesor de la pared de caldero (in)

P_d : Presión de diseño (psi)

R: Radio interior del cuerpo del caldero (in)

CA: Corrosión admisible (in)

S: Valor del esfuerzo permisible del material (psi)

E: Eficiencia de la junta

Para facilitar la manufactura se seleccionó una tubería de tipo API 5L SCH80 GRADO A, cabe detallar que resulta fácil la adquisición de este tipo de tubería en el mercado. A continuación, se procede a realizar el cálculo de la presión máxima que resiste el caldero, mediante la Ecuación 8. Con las dimensiones y el espesor de la tubería especificados en el ANEXO 1, se presenta una extracción en la Tabla 47.

Tabla 47.

Características Tubería API 5L SCH 80 GRADO A

R	t	S	CA	E	ϕ_e	ϕ_i	L
4.8"	0.59"	21600 psi	1/32"	1	273mm	245mm	600mm

Para determinar la máxima presión que soporta el cuerpo del caldero se tiene que despejar la presión de diseño de la Ecuación 8 la ecuación viene dada por:

$$P_d = \frac{t \cdot S \cdot E - CA \cdot S \cdot E}{0.6 \cdot t - 0.6 \cdot CA + (R + CA)} \quad (9)$$

$$P_d = 2249 \text{ psi}, \quad P_o = 2219 \text{ psi}$$

Se resuelve la Ecuación 9 y se obtiene la presión de diseño que resiste el cuerpo del caldero, que es de 2249 psi. Posteriormente se aplica la Ecuación 7 para obtener la máxima presión de operación que resiste el cuerpo del caldero. El cuerpo del caldero presentara un aislamiento de fibra cerámica que

minimiza las pérdidas de calor cuyas características se muestran en la Tabla 48, además un recubrimiento metálico que envolverá a la fibra.

Tabla 48.
Características del aislamiento de fibra cerámica

Características	Descripción
Forma disponible	Plancha o en rollo.
Costo	\$30/m ²
Temperatura de operación	Hasta 1093°C

4.2.1.2 Bridas

Para la construcción de bridas se usará planchas de acero A36 de 1/2". Para garantizar el correcto funcionamiento de las mismas es necesario centrar el análisis en el diseño de pernos que son los que soportaran el esfuerzo aplicado.

- Diámetro del perno

$$d_p < \frac{e_p}{2} \quad (10)$$

Donde

d_p : Diámetro nominal del perno (mm)

e_p : Espesor de placas (mm)

Como se señaló anteriormente el espesor de las bridas será de 1/2" cada una por lo que tenemos un espesor total de 1". Aplicando la Ecuación 10 se obtiene que el diámetro de los pernos será de 1/2" (12mm) con paso de 1.25, es decir los pernos serán M12x1.25.

- Distancia de colocación de pernos

$$t_a = 1.5 \cdot d_p \quad (11)$$

Donde

t_a : Distancia mínima de colocación de pernos (mm)

Los pernos deben estar ubicados a una distancia t_a mayor a 1.5 veces el diámetro del perno. Entonces aplicando la Ecuación 11 se determina que los pernos deben ir colocados a una distancia de 19 mm.

- Diámetro de colocación

$$\phi_C = \phi_e + 2 \cdot t_a$$

Donde

ϕ_C : Diámetro de colocación de pernos (mm)

ϕ_e : Diámetro externo de cuerpo de caldero (mm)

$$\phi_C = 273 + 2 \cdot 19 = 312 \text{ mm}$$

A continuación se escoge una arandela que tenga un diámetro interno mayor a 12 mm (diámetro nominal del perno), de esta manera la arandela 12N cumple con tal característica como se muestra en la Tabla 49 (Shigley, 1990)

Tabla 49.
Dimensiones Arandela

Dimensión	Valor
Espesor	2.80 mm
Diámetro interno	13.30 mm
Diámetro externo	25.40mm

- Longitud roscada

$$L_T = d_p + 6 \tag{12}$$

Donde

L_T : Longitud roscada del perno(mm)

$$L_T = 31.4 \text{ mm}$$

En el mercado se encuentra pernos con longitud roscada de 30 mm y una longitud del perno no roscada es de 20 mm. De esta manera la longitud total del perno adicionando el ancho de la cabeza es de 60 mm.

- Área roscada y no roscada del perno

$$A_{nr} = \pi \cdot \frac{d_p^2}{4} \quad (13)$$

Mediante el uso de la Ecuación 13 se obtiene el área no roscada, mientras que el área roscada se toma de datos tabulados (Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica, pg. 1037), como se indica en la Tabla 50.

Tabla 50.
Área roscada y no roscada

Descripción	Valor
Área roscada A_r	92.1 mm ²
Área no roscada A_{nr}	126.67 mm ²

- Rigidez en la parte no roscada

Para el presente cálculo es preciso detallar que el material de los pernos es acero.

$$k_s = \frac{A_{nr} \cdot E}{L_{Pnr}} \quad (14)$$

Donde

k_s : Rigidez en la parte no roscada

E: Módulo de Elasticidad (MPa)

L_{Pnr} : Longitud Parte no roscada (mm)

- Rigidez en la parte roscada

$$k_r = \frac{A_r \cdot E}{L_{Pr}} \quad (15)$$

Donde

k_r : Rigidez en la parte roscada

L_{Pr} : Longitud de la parte roscada

Después de reemplazar los valores en la Ecuación 14 se obtiene que el valor del k_s es de 1.3×10^6 N/mm. De la misma manera el valor de la rigidez de la parte roscada se tiene que es 6.35×10^5 N/mm al evaluar la Ecuación 15 con los datos del perno M12.

- Rigidez efectiva estimada del perno

$$k_p = \frac{k_s \cdot k_r}{k_s + k_r} \quad (16)$$

Donde

k_p : Rigidez efectiva estimada del perno

k_s : Rigidez en la parte no roscada

k_r : Rigidez en la parte roscada

$$k_p = \frac{1.3 \times 10^6 \cdot 6.35 \times 10^5}{1.3 \times 10^6 + 6.35 \times 10^5}$$

$$k_p = 4.26 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

- Longitud efectiva

$$l_e = 2 \cdot t \quad (17)$$

Donde

l_e : Longitud efectiva del perno

t : Espesor de la placa

Entonces reemplazando el espesor se tiene:

$$l_e = 2 \cdot 12.7 \text{ mm}$$

$$l_e = 25.4 \text{ mm}$$

- Rigidez del elemento

$$\frac{k_m}{E \cdot d_p} = A \cdot \exp\left(\frac{Bd_p}{l_e}\right) \quad (18)$$

Donde

k_m : Rigidez del elemento

A: Constante de material

B: Constante de material

Las constantes A y B para el acero son 0.78715 y 0.62873 respectivamente (Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica, pg. 1037). Posteriormente reemplazando los valores en la Ecuación 17 se tiene que el valor de k_m es $2.81 \times 10^6 \text{ N/mm}$

- Constante de Rigidez

$$C = \frac{k_p}{k_p + k_m} \quad (19)$$

Donde

C: Constante de rigidez del perno

$$C = \frac{4.26 \times 10^6}{4.26 \times 10^6 + 2.81 \times 10^6}$$

$$C = 0.5$$

- Fuerza Máxima

El área donde actúa la presión, es el área delimitada por el diámetro interno de la tubería que tiene una dimensión de 245 mm. Se diseñan los pernos para que soporten una presión de 6 MPa.

$$F_{\max} = P_{\max} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{\text{agujero}}^2}{4} \quad (20)$$

Donde

F_{\max} : Fuerza máxima aplicada a los pernos

P_{\max} : Presión máxima de operación

ϕ_{agujero} : Diámetro efectiva donde se aplica presión.

$$F_{\max} = 0.6 \cdot \frac{\pi \cdot 245^2}{4}$$

$$F_{\max} = 2.83 \times 10^4 \text{ N}$$

El perno M12X1.25 presenta las dimensiones y propiedades mecánicas mostradas en la Tabla 51 (Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica, pg. 398).

Posteriormente se procede a calcular la precarga.

Tabla 51.
Características del Perno M12x1.25

Característica	Valor
Área de Esfuerzo de Tensión	$A_t = 92.1 \text{ mm}^2$
Área del Diámetro Menor	$A_r = 86 \text{ mm}^2$
Esfuerzo Permisible	$S_b = 220 \text{ MPa}$

- Precarga

Se calcula la precarga que soportaría en compresión las placas considerando que la unión puede ser retirada en caso de requerir un mantenimiento. Debido a esta consideración tenemos un factor de separación de 2.

$$F_i = FSP(1 - C) \frac{F_{\max}}{N_{\text{Pernos}}} \quad (21)$$

Donde

F_i : Precarga

FSP: Factor de separación

F_{\max} : Fuerza máxima

N_{Pernos} : Numero de pernos que se ubican en la brida

$$F_i = 2(1 - C) \frac{2.83 \times 10^4}{8}$$

$$F_i = 3.537 \times 10^3$$

- Esfuerzo cortante

$$\tau_i = K \cdot d_p \cdot F_i \quad (22)$$

Donde

τ_i : Cortante

K: Factor del par de torsión de fricción

La condición del perno usado es un acabado negro sin recubrimiento por lo que la constante k tiene un valor de 0.3 (Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica, pg. 424).

$$T = 0.3 \cdot 12 \cdot 3.537 \times 10^3$$

$$T = 1.27 \times 10^4 \text{ N}$$

$$\tau_{xy} = \frac{T \cdot \rho}{J} \quad (23)$$

Donde

τ_{xy} : Esfuerzo cortante

ρ : Distancia a la mitad del perno

J : Momento polar

$$\tau_{xy} = \frac{1.27 \times 10^4 \cdot 6}{\pi * \frac{12^4}{32}}$$

$$\tau_{xy} = 37.52 \text{ MPa}$$

- Esfuerzo normal

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_t}$$

$$\sigma_i = \frac{3.537 \times 10^3}{92.1}$$

$$\sigma_i = 65.28 \text{ MPa}$$

- Esfuerzo en el perno

$$\sigma_{equi} = \sqrt{(\sigma_i^2) + 4(\tau_{xy}^2)}$$

$$\sigma_{equi} = 99.46 \text{ MPa}$$

- Factor de Seguridad

$$FS = \frac{S_b}{\sigma_{equi}}$$

$$FS = \frac{220}{99.46}$$

$$FS = 2.21$$

Una vez realizado el análisis en el cuerpo y bridas del caldero se procede a corroborar los mismos a través de una simulación mediante el programa SolidWorks. En una primera parte se realiza el CAD del cuerpo y bridas del caldero, se procede a colocar la dirección de la presión de operación, así como la temperatura que deberá soportar como se indica en la Figura 59.

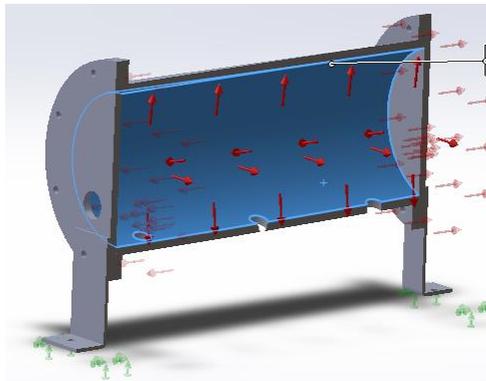


Figura 59 Aplicación de Temperatura y Presión en SolidWorks

Una vez establecido los parámetros de operación se procede a ejecutar la simulación y como se observa en la figura 60 y 61 el caldero soporta la presión y temperatura de operación, confirmando así que los cálculos antes mencionados son correctos.

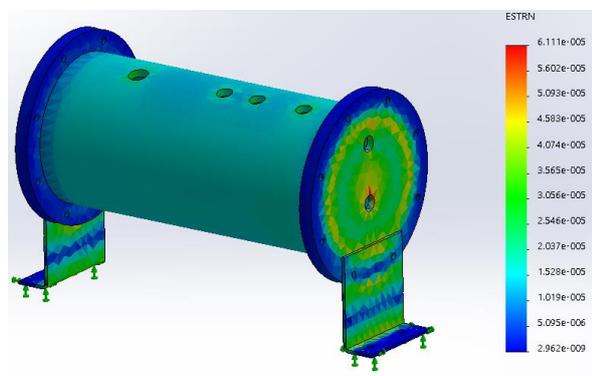


Figura 60 Desplazamientos en el Caldero

El caldero tiene un factor de seguridad mínimo de 7.88 ,por lo que se garantiza el funcionamiento seguro.

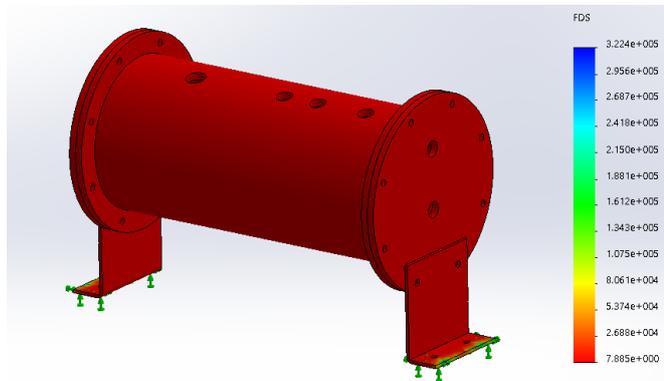


Figura 61 Factor de Seguridad en el Caldero

4.2.1.3 Empaque del caldero

Los empaques de asbesto como se muestra en la Figura 62, se elaboran a partir de fibras de asbesto crisolito con elastómeros sintéticos aglutinados. En la Tabla 52 se muestran las principales características, que garantizan la operación del equipo acorde a los parámetros planteados.



Figura 62 Perforación mediante Sacabocado

Tabla 52.

Características del empaque de asbesto

Características	Descripción
Medio de Operación	Soporta vapor, gases, aguas y productos químicos en general.

Costo/m ²	\$15
Temperatura de operación	Hasta 450°C
Material	Asbesto
Presión	Hasta 1450 psi

4.2.2 Cartuchos de Inmersión

Para la selección de la capacidad de los cartuchos de inmersión, es importante conocer ciertos parámetros como son la temperatura inicial y final que requiere el proceso. A continuación, nos permitirá determinar la cantidad de energía que requiere el BPMV, para llegar a los parámetros establecidos de temperatura antes mencionados a través de la Ecuaciones 10, 11, 12, 13, 14. (Clayton, Manual de operación, 2010)

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T + m \cdot h_x \quad (24)$$

Donde:

Q: Cantidad de calor total suministrado al sistema (KJ)

m: Masa del producto a calentar (kg)

C_p: Poder calórico del producto (KJ/Kg · °C)

ΔT: Variación de temperatura del producto para calentar T_f – T_i (°C)

h_x: Entalpía de vaporización (KJ/Kg)

Nota: en caso de que, en el proceso el vapor se condense, se emplea la entalpía de evaporación h_{fg}, si no hay condensado se usa la entalpia total h_g. (Yunus, 1996) .

Para la resolución de la Ecuación 10, 12 y 13 es necesario realizar una consulta de las propiedades (Cengel, Termodinámica, 2011, Págs. 728-730) y los datos se presentan a continuación en la Tabla 50.

Tabla 53.

Propiedades termodinámicas para resolver Ec.10

h _{fg}	m	C _p	T _f	T _i	t
210174	24.41	4.18	153	18	1.5

La resolución de la ecuación (10) es:

$$Q = 65078.033$$

La capacidad de un caldero por lo general se mide en caballos de vapor, por los que es necesario realizar la conversión a través del uso de la ecuación (11).

$$\frac{\text{BHP}}{\text{h}} = Q(\text{Kcal}) \cdot \left(\frac{1\text{BHP}}{8436 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}} \right) \quad (25)$$

Donde:

$\frac{\text{BHP}}{\text{h}}$: Caballos de vapor por hora

Q: Cantidad de calor total suministrado al sistema en (kcal)

Se reemplaza el calor en la ecuación (11) y se obtiene el siguiente resultado:

$$\frac{\text{BHP}}{\text{h}} = 1.8437$$

Para conocer la cantidad de BHP necesaria en las condiciones climáticas y geográficas reales en la que va a operar el caldero, es necesario realizar un par de correcciones dadas por las ecuaciones (12) y (13).

$$W_s = \frac{Q}{h_{fg} \cdot t} \quad (26)$$

Donde:

W_s : Evaporación real o cantidad de vapor requerida por el proceso

Q: Cantidad de calor total suministrado al sistema en (KJ)

h_{fg} : Entalpía de vaporización a la presión de operación (KJ/Kg)

t: Tiempo en el que se realiza el proceso (h)

Los datos necesarios para la resolución de la Ecuación (12) se muestran a continuación en la Tabla 51.

Tabla 54.
Propiedades termodinámicas para resolver Ec.12

Q	h_{fg}	t
65078.033	2101.74	1.5

Se resuelve la ecuación (12) y se obtiene:

$$W_s = 20.64 \left(\frac{Kg}{h} \right)$$

De manera consecutiva es importante aplicar el factor de corrección de evaporación que viene dado por la Ecuación (13):

$$F. E. = \frac{h_{fg}}{h_g - h_f} \quad (27)$$

Donde:

h_{fg} : Entalpía de vaporización a la presión atmosférica (KJ/Kg)

h_g : Entalpía de vaporización a la presión de operación (KJ/Kg)

h_f : Entalpía de vaporización a temperatura de alimentación del agua (KJ/Kg).

Los datos necesarios para la resolución de la Ecuación (13) se muestran a continuación en la Tabla 52.

Tabla 55.
Propiedades termodinámicas para resolver Ec.13

h_{fg}	h_g	h_f
2257.32	2764.08	83.96

Al resolver la ecuación (13) se tiene la siguiente solución:

$$F. E. = 0.842$$

Finalmente, la capacidad real del equipo en las condiciones de ambiente y geográficas viene dado por la ecuación (14):

$$BHP = \frac{W_s}{15.65 \cdot (F.E.)} \quad (28)$$

$$BHP = 1.56$$

La resolución de la ecuación 14 nos da como resultado que es necesario una potencia de 1.56 caballos de vapor para cumplir con los requerimientos. Es necesario conocer que 1BHP es equivalente a 9.8 KW para la selección adecuada de la potencia en los cartuchos de inmersión.

Tomando en cuenta el análisis de la cantidad de energía que requiere el sistema de calentamiento se resuelve que para el sistema se utiliza dos cartuchos de inmersión que presentan las características de la Tabla 56. Los cartuchos que se muestran en la Figura 63 tienen una geometría más simple y son fáciles de instalar.



Figura 63 Cartuchos de Inmersión

Tabla 56.

Características de cartuchos de Inmersión

Características	Descripción
Marca	WATLOW
Potencia	3000 W
Voltaje	240 V
Modelo	L9EX11A
Longitud	9 ¼
Rosca	NPT 3/4

4.2.3 Sistemas de Control del Caldero

El Caldero posee un control de Nivel, un control de Presión y un Control de temperatura como se indica en la Figura 64, los mismos que se encuentran

conectados a elementos de potencia (Cartuchos de Inmersión y Bomba Hidráulica).



Figura 64 Sistemas de Control del Caldero

4.2.3.1 Control de nivel

El control de nivel por conductividad aprovecha la conductividad de líquidos y detecta el nivel de líquido a través de electrodos que se encuentran ubicados de tal manera que exista una variación de nivel entre los dos. La configuración con la que se instalan los electrodos permite el cierre del circuito electrónico, que conmuta en el relé de salida, ocasionando el llenado o vaciado del Caldero. Cuenta con cinco elementos principales como se indica en la Figura 65.

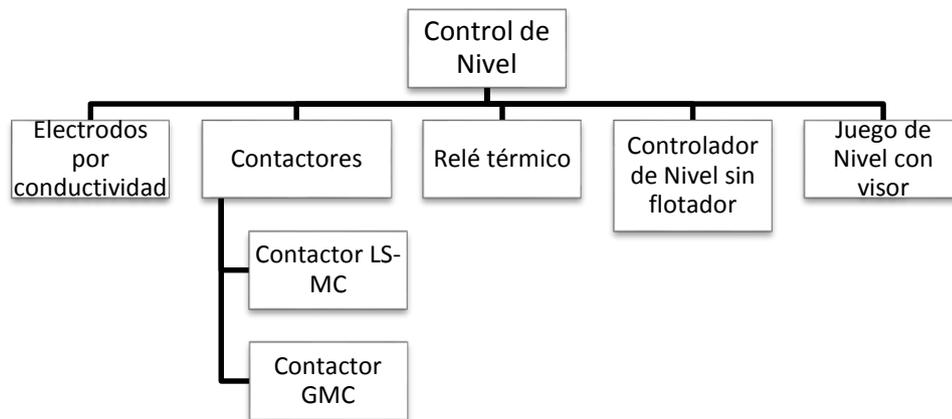


Figura 65 Control de Temperatura

4.2.3.1.1 Electrodo de nivel por conductividad

Es un elemento que aprovecha las propiedades de conductividad de los líquidos para cerrar un circuito y activar un controlador de nivel. Para una buena exactitud, confiabilidad y repetitividad es necesario que el usuario fije los electrodos de manera permanente.



Figura 66 Electrodo de Conductividad Warrick

El electrodo cuyas características se indican en la Tabla 57, está conformado por un cuerpo con recubrimiento cerámico como se observa en la Figura 66. Además, permite una conexión precisa del nivel, donde el control se debe activar a través de una varilla.

Tabla 57.

Características Electrodo de Conductividad

Características	Descripción
Marca	Warrick
Modelo	3B1B
Presión de Operación	250 psi
Material del Cuerpo	Acero Inoxidable
Rosca	NPT 3/8"

4.2.3.1.2 Contactor

Es un elemento electromecánico que actúa como interruptor automático que permite formar enlaces entre los circuitos eléctricos. Su principal función es establecer o cortar el paso de corriente cuando la bobina se energiza. A continuación, se presenta los tipos de contactores usados en la implementación.

a) Contactor LS-MC32A/220V

En la Tabla 55 se muestran las características que presenta el Contactor LS-MC32A/220V y en la Figura 67 se indica el tipo de contactor.



Figura 67 Contactor LS-MC32A

Tabla 58.
Características Contactor LS-MC 32A

Características	Descripción
Modelo	MC 32a
Tipo de Contactor	Magnético

# Polos	3
Corriente	32A
Frecuencia Nominal	50 / 60 Hz
Voltaje nominal	220V

b) Contactor GMC 12 3P 3.5KW 220V BOB

En la Tabla 59 se indica las características del contactor GMC 12 3P, además en la Figura 68 se observa el tipo de contactor



Figura 68 Contactor GMC

Tabla 59.

Características Técnicas CONTACTOR GMC

Características	Descripción
Modelo	GMC 12
Tipo de Contactor	Magnético
# Polos	3
Corriente	12 A
Frecuencia Nominal	50 / 60 Hz
Voltaje nominal	220

4.2.3.1.3 Relé Térmico LG. GTK22 9-13AMP.

El Relé térmico es un dispositivo que protege los instrumentos y equipos contra corrientes de la sobrecarga. El dispositivo cuenta con tres bornes de fuerza a la entrada y salida como se observa en la Figura 69, que permiten la conexión al circuito de potencia.



Figura 69 Relé Térmico GTK22

A continuación, en la Tabla 60 se indica las características que presenta el Relé térmico

Tabla 60.

Características técnicas Relé Térmico GTK 22

Características	Descripción
Modelo	GTK 22
Tipo	Bimetálico
Tipo Montaje	Directo con Contactores de modelo GM.
Tipo Reset	Manual o Automático
Ambiente Compensado	-5 a 40°C

4.2.3.1.4 Controlador de Nivel sin Flotador (Floatless)

El controlador Floatless Relay, que se indica en la Figura 70, detecta de forma eléctrica el nivel de un líquido mediante el uso de electrodos. Las características que posee el control de nivel se presentan en la Tabla 61.



Figura 70 Controlador CNC Floatless Relay

Como podemos observar en la Figura 71, cuando el electrodo E1 no se encuentra en contacto con el líquido, el circuito eléctrico está abierto y no fluye corriente entre los electrodos E1 Y E3. En consecuencia, el relé "x" no está energizado, por lo que los contactos normalmente cerrados permanecen (b) en ese estado.

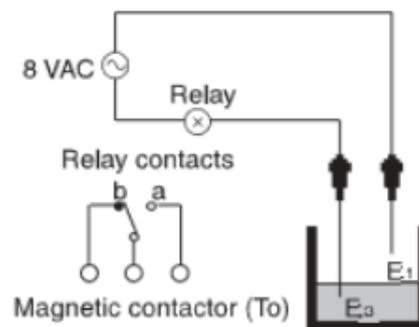


Figura 71 Circuito eléctrico sin corriente de Flujo entre electrodos

Sin embargo, cuando se suministra líquido al tanque como se muestra en la Figura 72 el electrodo E1 se sumerge y el circuito se cierra, de tal manera que el relé "x" se energiza y permite el cambio de estado de los contactos a normalmente abiertos (a) que están conectados generalmente a una bomba.

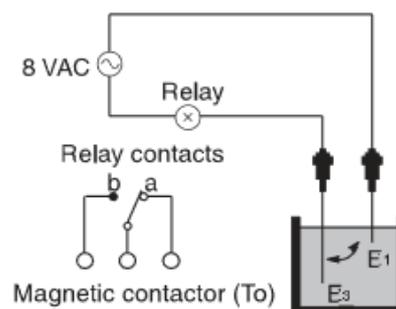


Figura 72 Circuito eléctrico con corriente de Flujo entre electrodos

Tabla 61.

Características técnicas del Controlador de nivel sin flotador

Características	Descripción
Marca	CNC
Modelo	AFR-1
Voltaje Nominal	110 , 220 V

Alimentación	85-110% V.Nom.
Capacidad del contacto para activación del servicio	5A -250 V
% DE HUMEDAD	45-85 %
Peso	200g

4.2.3.1.5 Juego de nivel con visor

Elemento ubicado en una de las bridas del Caldero, permite la visualización del nivel al interior del recipiente. Se encuentra conformado por dos válvulas de corte (superior e inferior) y un tubo de vidrio como se observa en la Figura 73. En la Tabla 62 se detallan las características técnicas que posee el Juego de nivel con visor.



Figura 73 Juego de Nivel con Visor

Tabla 62.

Características técnicas del Juego de Nivel

Características	Descripción
Marca	CONBRANCO
Resistencia	250 libras de vapor
	400 libras de agua
Vidrio	5/8"
Rosca	NPT 1/2"

4.2.3.2 Control de presión

Un adecuado control de presión permite supervisar que la presión de un fluido no sobrepase una medida preestablecida. Se conforma por un presostato, también conocido como interruptor de presión y una válvula de seguridad como se indica en la Figura 74.

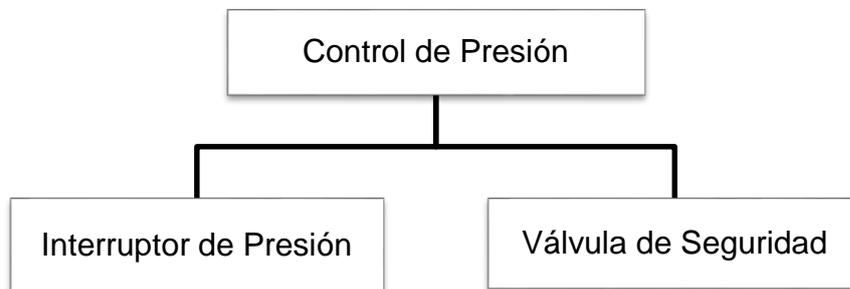


Figura 74 Control de Presión

4.2.3.2.1 Interruptor de Presión

El equipo BPMV requiere un presostato de arranque y parada como se indica en la Figura 75. El fluido transmite una presión sobre un fuelle interno, que permite la unión de dos contactos y cierra el circuito eléctrico. Esta acción produce un corte de energía en los cartuchos de inmersión al llegar a la presión deseada. En el momento que la presión disminuye, el fuelle emite una fuerza en sentido contrario, que ocasiona la separación de los contactos permitiendo que los cartuchos de inmersión se vuelvan a encender. El interruptor de presión presenta las características que se muestra en la Tabla 63.



Figura 75 Presostato

Tabla 63.

Características Técnicas Presostato

Características	Descripción
Marca	SAFE GAUGE
Tipo	S973
Presión	400 libras de agua
Conexión	1/4"

4.2.3.2.2 Válvula de Seguridad

El elemento regulador dentro de la válvula es un resorte que al alcanzar la presión máxima se libera y permite un alivio de presión, en un punto de presión preestablecido. Además, posee un mecanismo para liberar la presión de forma manual como se observa en la Figura 76 y sus características se indican en la Tabla 64. En caso de que el presostato se encuentre en malas condiciones la válvula de seguridad es activada y evita una sobrepresión dentro del caldero.



Figura 76 Válvula de Seguridad

Tabla 64.

Características técnicas de la Válvula de Seguridad

Características	Descripción
Marca	TECVAL
Material	Cuerpo de Bronce, asiento y disco en acero inoxidable
Presión de Operación	5-200 psi
Temperatura de Operación	Hasta 208 °C
Rosca	NPT 1/2"

4.2.3.3 Control de temperatura

El control de temperatura se encuentra conformado por los elementos que se encuentran detallados en la Figura 77.

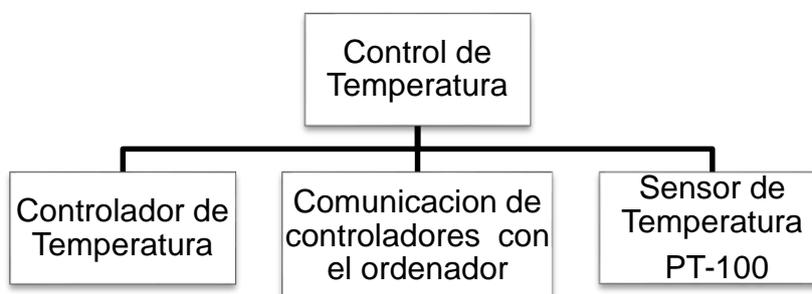


Figura 77 Control de Temperatura

4.2.3.3.1 Controlador de Temperatura

El control de temperatura tipo ON/FF posee tres salidas de control de temperatura. Además, posee una salida serial RS-485 que se comunica con el Software SITRAD. Como se observa en la Figura 78 el control tiene una pantalla de visualización donde presenta la variable medida.



Figura 78 Controlador de Temperatura MT-543Ri Plus

Tabla 65.

Especificaciones técnicas del controlador MT-543Ri plus

Características	Descripción
Marca	FULL GAUGE
Alimentación	115/230 Vac
Temperatura de control	Con NTC: -50 hasta 105°C
	Con: PT-100: -99 hasta 300°C
Temperatura de operación	0 hasta 50°C
Humedad de operación	10 hasta 90% HR
Comunicación serial RS-485 (SITRAD)	SI

Como indica la Tabla 65 el controlador de temperatura presenta la opción de Comunicación serial con el ordenador mediante el Software SITRAD. El programa SITRAD permite evaluar y almacenar de manera continua datos de temperatura con total seguridad y precisión, a través de un convertidor de señal como se observa en la Figura 79. Además, es un software libre de fácil instalación en el ANEXO 2 se detalla el proceso de instalación.

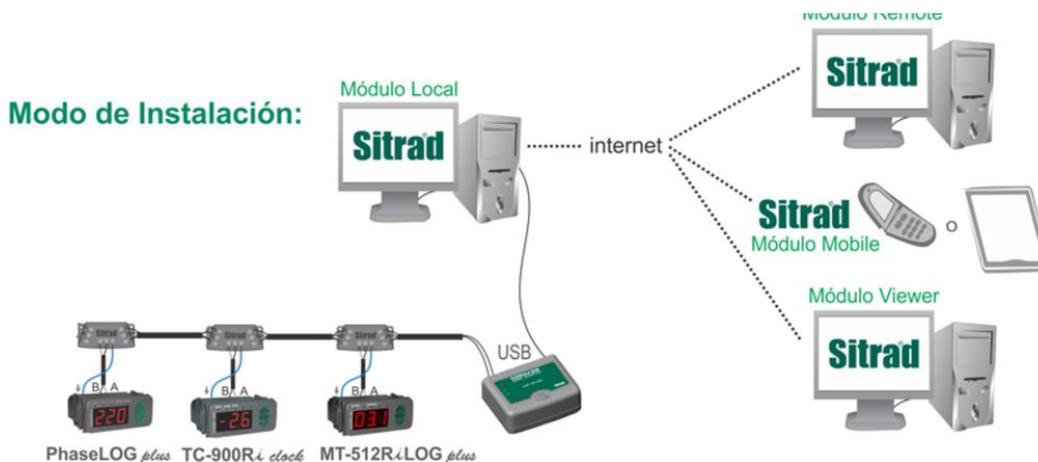


Figura 79 Conexión de Modulo con Ordenador y Módulos Móviles

4.2.3.3.2 Comunicación de Controladores con la Computadora

El CONV32 se conecta al computador a través de un cable USB como se indica en la Figura 80. Además, el elemento permite una comunicación serial de los controladores FULL GAUGE a una PC a través de un puerto USB y presenta las características en la Tabla 66, también proporciona una confiabilidad y robustez en el funcionamiento. (Gauge, 2007).



Figura 80 Módulo CONV32

Tabla 66.
Características técnicas CONV32

Características	Descripción
Marca	FULL GAUGE
Modelo	Interface Serial CONV32
Alimentación	A través de USB

Temperatura de operación	0 hasta 50°C
Soporte	32 Controladores

4.2.3.4 Sensor de Temperatura

El Sensor de Temperatura es de tipo termistor PT-100, que consiste en un alambre de platino, como se indica en la Figura 81, que varía su resistencia al aumentar la temperatura. Se muestran las características del sensor de temperatura Pt-100 en la Tabla 67.

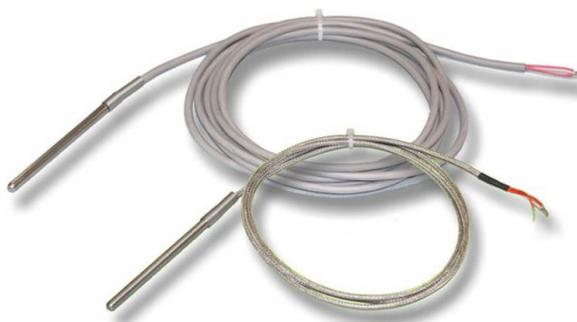


Figura 81 Termistor Pt100

Tabla 67.
Características técnicas del sensor PT-100

Características	Descripción
Tipo de sensor	RTD
Costo	Alto
Temperatura de operación	0 hasta 1250°C
Material	platino
Precisión	Alto
Resistencia a la abrasión	Medio
Número de hilos	3

4.3 Sistema de trabajo

A partir de las soluciones determinadas en el anterior capítulo los elementos que se implementaran se observan detallados en la Figura 82.



Figura 82 Sistema de Trabajo

4.3.1 Temperatura de Salida del Motor a Vapor

El sensor de temperatura que se encuentra ubicado a la salida del motor a vapor es un termistor PT-100, que presenta las características señaladas anteriormente en la Tabla 64. El sensor mide la temperatura del vapor que ha generado trabajo en el motor a vapor y se dirige hacia el condensador.

4.4 Sistema de Intercambio de Calor

Es el sistema encargado de intercambiar calor y convertir el estado del vapor que sale del motor. En la Figura 83 se muestra el componente a implementar, que permite realizar el análisis termodinámico.

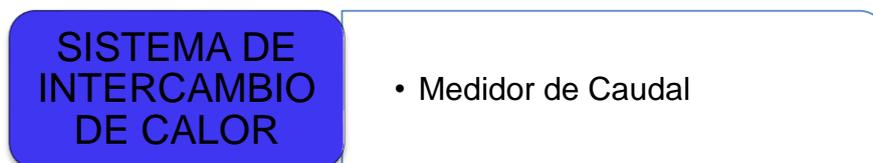


Figura 83 Sistema de Intercambio de calor

4.4.1 Medidor de Caudal

El principio de funcionamiento se basa en el desplazamiento a través de un disco durante mientras se encuentra en una cámara. El flujo de agua que atraviesa el medidor es contabilizado a partir del número de ciclos en el reloj

contador como se observa en la Figura 84. Las características del medidor de caudal se indican en la Tabla 68.



Figura 84 Medidor de Caudal Volumétrico

Tabla 68.

Características técnicas del medidor de caudal

Características	Descripción
Marca	DOROT
Modelo	DVM-A-13
Temperatura de operación	hasta 50°C
Material	Carcasa Bronce, recubrimiento Externo epóxido
Presión de Trabajo	Max. 16 Bar
Lectura Mínima	0.0001m ³
Caudal Máximo	3 m ³ /h

4.5 Tuberías

En las tuberías se aplicó una capa de yeso, que actúa como aislante debido a su estructura porosa. Sin embargo, para minimizar el riesgo de quemarse por altas temperaturas se recubrió con un tubo de espuma de polietileno como se puede observar en la Figura 85 y 86. Los materiales empleados tienen un coeficiente de conductividad térmica como se muestra en la Tabla 69.

Tabla 69.
Coeficientes de Conductividad YESO y POLIURETANO

Características	YESO	ESPUMA DE POLIETILENO
Coeficiente de Conductividad Térmica	$0.3 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$	$0.42 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

Según la norma INEN 4.40 las tuberías deben estar recubiertas de un color que permita identificar el fluido que circula a través de ella, las que cuentan con circulación de vapor deben contar con un aislamiento para evitar accidentes en operadores durante el funcionamiento del equipo BPMV. Es necesario que posean un color acorde a la designación del código de colores como se presenta en la Tabla 70, el cual indica el fluido que circula a través de la tubería.

Tabla 70.
Clasificación de fluidos

FLUIDO	CATEGORÍA	COLOR
AGUA	1	VERDE
VAPOR DE AGUA	2	GRIS PLATA
AIRE Y OXIGENO	3	AZUL
GASES COMBUSTIBLES	4	AMARILLO OCRE
GASES NO COMBUSTIBLES	5	AMARILLO OCRE
ÁCIDOS	6	ANARANJADO
ÁLCALIS	7	VIOLETA
LÍQUIDOS COMBUSTIBLES	8	CAFÉ
LÍQUIDOS NO COMBUSTIBLES	9	NEGRO
VACÍO	0	GRIS



Figura 85 Cañerías de Cobre recubiertas con Yeso

4.6 Resumen

Una vez identificada la solución en los elementos que se deben implementar de cada uno de los sistemas, se procede a describir las características técnicas de los elementos que se adquirió y permita garantizar el correcto y seguro funcionamiento del equipo. Además, se detalla el proceso de diseño de los elementos que requerían construcción. Para el proceso de adquisición de datos se toma en cuenta la compatibilidad de sensores y controladores, que permita el uso de un software libre como SITRAD.

4.7 Ficha técnica del equipo actual

DESCRIPCIÓN FÍSICA	<p>El equipo tiene una construcción robusta, consta de una mesa metálica donde se apoyan: un caldero eléctrico, motor a vapor, condensador, bomba de pistón, tanque de almacenamiento. Al frente del equipo se encuentra el panel de control. Además, el equipo cuenta con sistema de control de temperatura, presión y nivel.</p> <p style="text-align: center;">Peso aproximado: 150 kg Tiene una dimensión (cm): 120x80x170</p>	
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
Voltaje de Operación	220 V	
Presión de Operación	400 KPa	
Temperatura de Operación	150°C	
Cartuchos de Inmersión	3000W c/u	
Potencia de Bomba	2HP	
Volumen Tanque Alm.	10 L	
Máximo caudal de agua de enfriamiento	600 L/hr	
Sensores de Temperatura	2 Pt-100 (-99 a 300°C) 4 NTC (-50 a 105°C)	
Controlador de Temperatura	2 MT- 543 Ri plus	
Rango Switch de Presión	0-6 bar	
Manómetros	0-700 KPa	



Figura 86 Banco de Pruebas Motor a Vapor modernizado

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

En el capítulo se reúne todas las pruebas de implementación y verificación de funcionamiento del equipo BPMV. Además, se realiza el análisis energético que cumple el ciclo del equipo.

5.1 Pruebas de verificación de funcionamiento de los sistemas del BPMV

Una vez de haber finalizado la modernización del banco de pruebas y de ensamblar los sistemas que conforman el mismo, se inicia las pruebas de funcionamiento que permite verificar la correcta operación de los sistemas que se implementaron. Además, es importante verificar los parámetros en los que se encuentran calibrado la instrumentación que conforma el banco de pruebas.

5.1.1 Pruebas de funcionamiento del sistema de alimentación

En primer lugar, se procede a verificar el control de nivel y válvulas de paso al tanque, para ello es necesario unir la manguera de agua a la conexión de la válvula de paso de agua de red, abrir el agua de red a su máximo caudal y verificar que la válvula permita el llenado del tanque. Después se comprueba el funcionamiento del control de nivel del tanque observando si el flotador se encuentra operativo. A través de la válvula de purga como se indica en la Figura 87 se descarga el tanque y observa si el nivel vuelva a subir.



Figura 87 Sistema de Alimentación modernizado

Se observó que, la válvula de paso del tanque permita que el caudal de agua que proviene de la red fluya normal, el nivel de tanque cuando llega al punto establecido para y reinicia con el llenado al vaciar el tanque a través de la válvula de purga.

Posteriormente, para verificar el correcto funcionamiento del sistema, es necesario energizar y encender la bomba con el interruptor presentado en el panel de control, esta parte se inspecciona que el pistón de la bomba presente un movimiento alternativo uniforme sin presentar interrupciones o sonidos extraños. Además, se verifico que la luz piloto que pertenece a la bomba se encuentre encendida. La bomba gira de manera uniforme sin presentar ruidos extraños, conjuntamente la luz piloto verde de la bomba se encuentra encendida.

Para la tercera verificación es necesario observar que el controlador número tres que se encuentra en el panel del control, debería encontrarse ya encendido. Por lo que procedemos a colocar el conector macho en la hembra y se observa que la temperatura que se encuentra al ingreso de la bomba se muestre reflejada en el controlador.

El controlador ya se encontraba encendido por lo que al realizar la conexión del conector presento una marcación correcta de la temperatura en el controlador. En resumen, el sistema satisface los requerimientos mostrados en la Tabla 71

Tabla 71.
Verificación de Sistema de Alimentación

Requerimiento	Cumplimiento
La válvula de paso del tanque permite el flujo continuo del agua	Si
Control de nivel del tanque se encuentra operativo y funcional	Si
Válvula de purga permite descarga del tanque	Si
Pistón de la bomba presenta movimiento continuo sin ruidos extraños	Si
Luz piloto se prende mientras interruptor de bomba esta encendido	Si
Controlador número tres encendido y muestra temperatura.	Si

5.1.2 Pruebas de funcionamiento del sistema de generación de vapor

Para el caldero es importante realizar la prueba hidrostática, que garantiza la seguridad de las personas que harán uso del equipo. Para ello se verifica la resistencia mecánica del caldero sometiéndolo a un esfuerzo de presión. La presente prueba se lo realiza bajo los parámetros establecidos en la norma. (CÓDIGO ASME. SECCIÓN VII DIVISIÓN 1 RECIPIENTES A PRESIÓN).

El caldero soportó la prueba de presión de 450 psi durante el tiempo establecido por la norma sin presentar ningún tipo de fuga en las bridas o uniones soldadas como se observa en la Figura 88.



Figura 88 Prueba Hidroestática de Caldero

Para verificar el control del nivel al interior del caldero, es necesario que el caldero se encuentre vacío y el interruptor de la bomba encendido, la bomba se debe encender de manera automática de tal manera que se observe que inicia a subir el nivel a través del visor de nivel. Después de un tiempo el nivel sube hasta su punto máximo y se apaga la bomba. A continuación, se descarga el agua a través de las purgas del caldero y se observa que el nivel baja hasta que la bomba se encienda nuevamente de manera automática.

Se confirmó que el control de nivel funcione a través del encendido automático de la bomba, no presento ningún tipo de inconveniente, encendió y apago en los niveles establecidos. Además, se observa la variación del nivel a través del visor del nivel y comprobó que las purgas permitan la evacuación del agua en el caldero.

En una tercera parte se realiza la prueba de los cartuchos de inmersión, para ello es necesario energizar el equipo y encender el interruptor que pertenece a los mismos. Es importante el uso de una pinza amperimétrica, a través de ella se mide la cantidad de amperios y voltaje que circulan en los cartuchos, para confirmar con las características reales de los cartuchos. Además, es necesario corroborar que la luz piloto de los cartuchos se encuentre encendida.

En la tabla 72 se muestran los parámetros tomados de los cartuchos como son voltaje, intensidad de corriente y potencia, se realiza una comparación de los parámetros reales con los teóricos.

Tabla 72.

Comparación de parámetros en cartuchos de inmersión

Parámetros teóricos			Parámetros reales		
Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
220	13.6	3000	198	10.4	2059

De manera consecutiva se procede a corroborar el funcionamiento del control de temperatura, para ello es necesario calibrar el controlador en una temperatura determinada y encender el interruptor de los cartuchos como se indica en la Figura 89, esperar que la masa de agua se caliente en el interior del caldero. Así el sensor de temperatura colocado en el caldero permite visualizar a través del controlador la temperatura deseada. Al momento que el controlador indique el punto máximo de temperatura deberá existir un corte de energía en los cartuchos y verificar que la luz piloto de los cartuchos de inmersión se apague.



Figura 89 Panel de control del BPMV

Al finalizar la prueba, se pudo notar que el control de temperatura desconecta los cartuchos de inmersión a la temperatura establecida en el controlador sin presentar ningún tipo de retraso y en el momento exacto.

Finalmente se realiza la comprobación del control de presión, es importante mencionar que el caldero se encuentra sometido a un corte de energía por control de temperatura en el instante en que sube la presión y vuelve a encenderse a través del control de presión en el instante que existe un descenso de la misma. Para esta prueba es necesario establecer la calibración del Switch de presión a un determinado parámetro y encender los cartuchos, esperar hasta que la presión interior del caldero suba hasta el punto de corte por temperatura y abrir la válvula de vapor, esperar que baje la presión hasta la que se calibró el control de presión que se indica en la Figura 90 y esperar el corte de energía en los cartuchos.

Además, es importante verificar que la luz piloto de los cartuchos se apague en el instante en que exista el corte de energía en los mismos.

Se verifico el correcto funcionamiento del control de presión en el instante en que la presión descendió, los cartuchos se encendieron para volver a incrementarla y no presento ningún tipo de fallas ni retrasos.



Figura 90 Interruptor de Presión

En conclusión, el sistema de generación cumple de tal manera que los elementos diseñados e implementados superaron las pruebas y requerimientos que se encuentran resumidos en la Tabla 73 y de esta manera asegura la confiabilidad del banco de pruebas.

Tabla 73.

Verificación del Sistema de Generación de Vapor

Requerimiento	Cumplimiento
CALDERO	Aprobado
Verificar que resista la prueba hidrostática sin ningún tipo de fugas	Si
Purgas de caldero permiten evacuación de agua en el interior del caldero	SI
CONTROL DE NIVEL	Aprobado
Enciende la bomba de manera automática en el instante en que el interruptor es conectado y el nivel se encuentra bajo	Si
Permite visualizar el nivel a través del tubo visor de nivel	Si
Apaga la bomba en el instante que llega al nivel máximo establecido	Si

CARTUCHOS DE INMERSIÓN	Aprobado
Enciende la luz piloto en el instante en que se realiza se conecta el interruptor	Si
Los parámetros de voltaje intensidad y potencia reales se asemejan a los teóricos	Si
CONTROL DE TEMPERATURA	Aprobado
Permite la visualización de la temperatura en el controlador uno del panel del control	Si
Realiza el corte de energía en los cartuchos en el momento en que la temperatura llega a la establecida	Si

5.1.3 Pruebas de funcionamiento del sistema de trabajo

Para comprobar el funcionamiento del sistema de trabajo es necesario energizar y encender los interruptores de la bomba y cartuchos, esperar hasta que la masa de agua que se encuentra en el caldero empiece a convertirse en vapor y llegue hasta los parámetros establecidos por el control de temperatura y presión. Se procede a abrir la válvula de vapor la que permite el paso de vapor desde el caldero hacia el motor, para iniciar el funcionamiento del motor es necesario un movimiento inicial que se verifica que permita el movimiento rotacional en el motor.

Posteriormente se procede a conectar los dinamómetros a través de la banda de interconexión y se realiza la tabulación de las revoluciones que marca el motor respecto a la fuerza ejercida en los dinamómetros mediante un tacómetro como se indica en la Figura 91.



Figura 91 Medición de RPM con tacómetro de contacto

El motor gira de manera uniforme sin presentar ningún tipo de inconveniente y en la Tabla 74 se verifica que mientras existe una mayor carga de fuerza en los dinamómetros, la revolución disminuye de manera paulatina lo que resulta correcto y se aprueba.

Tabla 74.
Fuerza-Rpm en el Motor de Vapor

Fuerza (N)	RPM
0	3985
2	3700
4	3540
6	2720
8	2483

Finalmente se comprobaría el correcto funcionamiento del sensor de temperatura colocado en la salida del motor. Para ello se corrobora que el segundo controlador se encuentra ubicado en el panel de control refleje en la pantalla su respectiva temperatura.



Figura 92 Manómetros del BPMV

Se concluye que el sistema de trabajo cumple con las funciones y requerimientos y pasan las pruebas de manera correcta que se muestran en la Tabla 75.

Tabla 75.

Verificación del Sistema de Trabajo

Requerimiento	Cumplimiento
Movimiento rotacional en el motor después de abrir la válvula de vapor	Si
Conectar dinamómetros y comprobar que disminuya las RPM mientras se aumenta la fuerza.	SI
Permite visualizar la temperatura en el controlador números	Si

5.1.4 Pruebas de funcionamiento del sistema de intercambio de calor

Para iniciar con las pruebas de funcionamiento del presente sistema es necesario que el banco de pruebas alcance un estado estable y se encuentre en funcionamiento el sistema de trabajo. Para ello primero se regula la válvula que está conectada al medidor de flujo volumétrico, una vez abierta la válvula procedemos a verificar que exista un movimiento en las manecillas y una marcación del volumen de agua en el reloj del medidor como se observa en la Figura 93.



Figura 93 Medidor de Flujo Volumétrico

En una segunda parte es necesario comprobar que los sensores de temperatura ubicados en la entrada, salida del condensador y salida del condensado tengan un óptimo funcionamiento, para ello se realiza la conexión del conector macho del sensor de la entrada de agua al condensador en el conector hembra, se verifica que la temperatura se pueda observar en el controlador tres. De la misma manera lo realizamos con los conectores machos de la salida de agua en el condensador y con la salida de condensado.

A continuación, en la Tabla 76 se muestran los datos de las tres temperaturas que fueron tomados durante una prueba de operación.

Tabla 76.

Datos de temperatura en el condensador

Temperatura entrada al condensador (°C)	Temperatura salida del condensador (°C)	Temperatura salida del condensado (°C)
21.8	25.2	55

Los datos mostrados en la tabla verifican el correcto funcionamiento de los sensores de temperatura, de manera lógica la temperatura de entrada al condensador inicia como la más fría por la razón que viene de la red, en la

temperatura de la salida del condensador existe un aumento esto se debe a que el agua gana energía al momento que realiza el paso por el serpentín del condensador. Finalmente, la temperatura de salida del condensador se encuentra más elevada debido a que el vapor que salió del motor perdió energía al realizar el paso por el condensador y realiza su cambio de fase de estado gaseoso a líquido.

Por lo que se concluye que el sistema aprueba las pruebas de funcionamiento y cumple con los requerimientos que se muestran resumidos en la Tabla 77.

Tabla 77.
Verificación del Sistema de Intercambio de calor

Requerimiento	Cumplimiento
Marcación de la cantidad de volumen que realiza el paso por el medidor volumétrico en el reloj del mismo.	Si
Temperatura de los sensores reflejados en la pantalla del controlador tres	SI
Las temperaturas que marcan los sensores son lógicas	Si

5.1.5 Pruebas de funcionamiento de adquisición de datos en el computador a través del programa SITRAD

En un inicio para la corroboración de la adquisición de datos a través del programa SITRAD es necesario realizar la conexión del CONV32 que permite una interconexión serial entre los controladores con la PC a través de un puerto USB. Además, es necesario descargar e instalar el programa SITRAD en el ordenador.

Se inicia la prueba conectando el cable USB en el computador y abriendo el programa, en la pestaña comunicación se ejecuta e iniciar para que el ordenador pueda establecer la conexión con el banco de pruebas.



Figura 94 Interfaz gráfica de programa SITRAD

Posteriormente se realiza la verificación del reconocimiento de los instrumentos conectados al SITRAD, para aquello es necesario ingresar en historial y realizamos clic en instrumentos. En este instante se observa los dispositivos que se encuentran conectados al programa. Como se observa en la Figura 95 se encuentran conectados los tres controladores que forman parte en la adquisición de datos de las temperaturas que conforman el banco de pruebas

Instrumento	Muestras	De	Hasta
NTC	1708	02/06/2017 12:09:27	23/06/2017 15:37:50
Temperatura Caldero	1710	02/06/2017 12:09:26	23/06/2017 15:37:49
Temperatura Salida de Vapor Moto	1710	02/06/2017 12:09:26	23/06/2017 15:37:50

Figura 95 Registro de sensores en SITRAD

Finalmente se realiza la verificación del registro de temperaturas a través de la gráfica mostrada en la Figura 96. Aquí podemos observar el registro de

temperaturas que se encuentra divididas en tres graficas representadas por los colores azul, rojo y verde cuya identificación se observa en la Tabla 78.

Tabla 78.
Verificación Registro de temperatura

Color de identificación	Número del Controlador	Temperaturas
Rojo	1	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de generación de vapor Temperatura caldero
verde	2	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de trabajo Temperatura salida del motor a vapor
Azul	3	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de intercambio de calor. Temperatura entrada al condensador Temperatura salida del condensador Temperatura condensada <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de alimentación de agua Temperatura ingreso a la bomba

En conclusion se verifico el correcto funcionamiento y conexión de la adquisicion de datos, los principales requisitos mostrados en la Tabla 79 y determinamos que se cumplio de manera satisfactoria. (Chicala, 2015)

Tabla 79.
Verificación de Adquisición de datos

Requerimiento	Cumplimiento
Existe una correcta conexión entre PC y controladores	Si
SITRAD reconoce los instrumentos conectados para la adquisición de datos	SI
Existe la gráfica del registro de la lectura de temperaturas realizadas por los sensores colocados en los distintos puntos del banco de pruebas.	Si

5.2 Resumen

Mediante la prueba hidroestática se verifica la resistencia mecánica del caldero sometido a un esfuerzo por presión. La presión a la cual se somete el recipiente es de 450 psi. La prueba hidroestática se realizó mediante el uso de un compresor y la duración de la prueba fue de un día sin reportar ninguna fuga en los puntos de soldadura, de esta manera se garantiza la seguridad en la operación.

El panel de control cuenta con dos interruptores ON/OFF con sus respectivas luces LED de funcionamiento. El interruptor de lado izquierdo activa los cartuchos de inmersión y el interruptor de lado derecho activa la bomba hidráulica.

Los leds de funcionamiento se encienden de acuerdo al circuito de potencia y control, esto quiere decir que cuando los elementos se encuentran operación (cartuchos y bomba) el led emitirá una luz de color verde.

Se verifico que los puntos de control de presión y temperatura no sobrepasen los parámetros preestablecidos. De tal manera se confirma el buen funcionamiento de todos los dispositivos interconectados que permiten el control del equipo.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se estableció el estado actual en el que se encontraba el Banco de pruebas motor a vapor (BPMV) mediante el uso de un conjunto de procedimientos detallados en diagramas de flujo. Para facilitar el análisis antes mencionado se dividió al equipo en cuatro sistemas: Sistema de Alimentación, sistema de generación de Vapor, de Trabajo e Intercambio de calor. Después de las consideraciones anteriores se determinó elementos de los sistemas que requerían ser reemplazados o a su vez ingresados a un mantenimiento, de esta manera planteado varias alternativas que mediante el uso de matrices de decisión se escogió una de ellas como solución.
- Se diseñó y construyó los componentes mecánicos necesarios para el correcto funcionamiento del equipo BPMV. Los componentes que se construyeron son un caldero que genera calor mediante el uso de dos cartuchos de 3000 W cada uno, bridas del caldero y empaques. Para la presente aplicación, el caldero es capaz de producir vapor a través de los cartuchos a una presión de 400 KPa. Es necesario activar el interruptor en el panel de control para empezar el ciclo de trabajo que cuenta con controles de nivel, presión y temperatura para un funcionamiento seguro. El caldero está recubierto con una manta aislante de fibra cerámica.
- Se implementó un sistema de adquisición de datos en el BPMV mediante el uso de sensores de temperatura verificando que operen en el rango que requiera el sistema donde están ubicados. Es evidente entonces que tendremos dos tipos de sensores Pt-100 en los sistemas que requieren medir mayores temperaturas y NTC en los sistemas que la temperatura sea menor

a 105°C. Para establecer la conexión entre el banco de pruebas y el ordenador se seleccionó un controlador que permita comunicarse mediante USB con el PC. El registro de temperaturas tiene un error de 10% con datos teóricos debidos a la transferencia de calor a través de las bridas.

- Se establece al software libre SITRAD para que genere un interfaz usuario ordenador que permite obtener las variables del sistema. SITRAD es un programa compatible con los sensores y controladores escogidos por lo que se facilita el proceso de conexión entre el banco de pruebas y ordenador.
- Con el rediseño del Banco de Pruebas Motor a Vapor se analizó y elaboró una guía de práctica la cual nos permite estudiar el ciclo Rankine de forma experimental mediante balances exergéticos en cada uno de los componentes que conforman el ciclo.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar la fabricación de bancos de pruebas con manufactura nacional mediante la ayuda de la división de sistemas y selección de componentes expuestos en el presente proyecto.
- Para minimizar las pérdidas de calor en el caldero se recomienda ampliar el recubrimiento del aislante, es decir, recibir las bridas con material aislante sin que interfiera con los instrumentos instalados en las mismas. Así mismo es preciso esperar a que el banco de pruebas llegue al estado estable, para esto se debe dejar el equipo funcionando por un lapso de 15 min, de tal manera que las temperaturas en los sensores no varíen en las diferentes pruebas.
- Se recomienda verificar siempre que la banda de regulación de trabajo se encuentra colocada de manera correcta al interior del canal del volante del motor. Además, se podría implementar un encoder el cual mida de manera

directa las RPM del motor, de esta manera se reducirá aún más los tiempos de recolección de datos.

- Para alargar la vida útil del caldero se recomienda establecer un sistema que cada determinado tiempo mida la dureza y el pH del agua al interior del caldero, de esta manera se podrá determinar si los parámetros son adecuados para la operación y alargar la vida útil del equipo.
- Es importante al momento de iniciar a operar el equipo que se verifique que las cañerías de cobre se encuentren libre de líquido debido a que podrían contener condensado producto de un ciclo anterior de trabajo.
- Se recomienda investigar posibles nuevas aplicaciones del equipo que permita realizar ampliar la cantidad de prácticas realizadas en el laboratorio.
- La familiarización con el funcionamiento del equipo es importante, de esta manera se realizará ensayos y pruebas en el banco adecuadamente. De la misma manera se debe conocer los sistemas que conforman el banco de pruebas para darle el mantenimiento requerido con el objetivo de alargar la vida útil.

BIBLIOGRAFÍA

- Arquigráfico*. (5 de septiembre de 2014). Obtenido de <https://arquigrafico.com/ques-una-caldera/>
- Automatización industrial*. (15 de agosto de 2011). Obtenido de neumática, hidráulica, microcontroladores y autómatas: <http://industrial-automatica.blogspot.com/2011/08/bombas-hidraulicas-2-bombas-de.html>
- Canoura, j. (2016). *Diseño de un condensador para planta de producción industrial*. Coruña.
- Chicala, c. (2015). *Adquisición de datos: medir para conocer y controlar*. Cengage learning.
- Clayton. (2011). *Calderas y periféricos "vapor y agua caliente"*. México: clayton industries.
- Colmenar, c. C. (24 de marzo de 2012). *Mailx mail*. Obtenido de <http://www.mailxmail.com/curso-centrales-energia-geotermica-1-2/energia-geotermica-plantas-termicas>
- Dellicompagni, p. F. (2015). *Caracterización de un motor a vapor de doble efecto. Avances en energías renovables y medio ambiente*.
- Estrella, s. (28 de octubre de 2010). *La máquina de vapor*. Obtenido de <http://tic6-starspuff.blogspot.com/>
- Física termodinámica*. (2 de mayo de 2011). Obtenido de <https://hernanleon1002.wordpress.com/fisica-de-fluidos-y-termodinamica/tercer-corte/marco-teorico-2/>
- Fristam. (2011). *Manual de instrucciones y mantenimiento*.
- Gaffert, g. A. (1981). *Centrales de vapor: estudio de la construcción, características del funcionamiento e integración de toda la maquinaria pesada y ligera de una central*. Reverte.
- Gauge, f. (2007). *Manual do usuário do software sitrad versão 4.5*. Full gauge controls.
- Haywood, r. (2000). *Ciclos termodinámicos de potencia y refrigeración*. Limusa .

- Luna, r. (10 de diciembre de 2016). *Análisis, diseño e incremento de la eficiencia del ciclo rankine para la empresa edegel*. Obtenido de <https://www.emaze.com/@afootftf/termo>
- Montaño, m. (1 de diciembre de 2009). *Física ii*. Obtenido de exposición ciclo rankine: <http://mms2815.blogspot.com/>
- Moran, m. J., & shapiro, h. N. (1999). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Reverte.
- Moreno, g. (15 de octubre de 2014). Obtenido de <http://giannnorbet.blogspot.com/>
- Otegui, j. L. (2012). *Cañerías y recipientes de presión*. Eudem.
- Pérez , a., rodíguez, p. J., & sancho, j. L. (2007). *Mantenimiento mecánico de máquinas*. Universitat jaume i. Servei de comunicac.
- Shigley, j. E. (1990). *Diseño en ingeniería mecánica 8va edición*. Londres: mcgraw-hill.
- Yunus, c. (1996). *Termodinámica*. Mc graw-hill.