

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
GENERADOR DE VAPOR ELÉCTRICO PARA PROCESOS
DE RECOBRO TÉRMICO EN UN MODELO FÍSICO DE
DESPLAZAMIENTO RADIAL**

GABRIEL HUMBERTO CASTIBLANCO

DANNY ALEXIS MORANTES DIAZ



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
GENERADOR DE VAPOR ELÉCTRICO PARA PROCESOS
DE RECOBRO TÉRMICO EN UN MODELO FÍSICO DE
DESPLAZAMIENTO RADIAL**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

GABRIEL HUMBERTO CASTIBLANCO

DANNY ALEXIS MORANTES DIAZ

Directores

M. Sc. SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO

Dr. DAVID ALFREDO FUENTES DIAZ

Codirector

M. Sc. CARLOS EDUARDO NARANJO SUAREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fuerza para lograr todas mis metas...

A mis abuelos, por apoyarme en todos mis retos...

A mi novia, por ser una gran compañía y fortaleza para lograr mis metas y emprender nuevos retos...

Gabriel Humberto Castiblanco.

DEDICATORIA

A Dios por darme la fortaleza para seguir siempre adelante...

A mi madre por su amor y por su apoyo para ayudarme a alcanzar mis metas...

A mi hermano por su apoyo y por estar siempre conmigo...

Danny Alexis Morantes Diaz.

AGRADECIMIENTOS

A Samuel Fernando Muñoz, Ingeniero de petróleos, director del grupo de investigación GRM por permitirnos desarrollar este proyecto de grado y por su colaboración en el desarrollo del mismo.

A David Alfredo Fuentes Diaz, ingeniero mecánico, director del proyecto, por su respaldo, asesoría y colaboración oportuna en el desarrollo del trabajo de grado.

A Carlos Eduardo Naranjo Suarez, Ingeniero de petróleos por la colaboración prestada como codirector del proyecto.

A Omar Gélvez Arocha, ingeniero mecánico, docente que nos brindó una gran orientación en el desarrollo del proyecto.

Al Grupo de Investigación de Recobro mejorado por permitirnos realizar este proyecto de grado, por el conocimiento, experiencia y colaboración de cada uno de sus integrantes, en especial a los ingenieros Fernando Londoño y Nelson León Martínez.

A mis abuelos Marco Fidel Castiblanco Malagón y Dulcelina Reyes, por ser mi fuente de inspiración para lograr superar un escalón más en mi desarrollo personal, por su incondicionalidad y porque a ellos les debo gran parte de todos mis logros.

A mi novia Laura Isabel Rincón Remolina, por su paciencia, por su colaboración en todo el desarrollo de este proyecto de grado y en esta etapa de mi vida.

A todos mis amigos.

Gabriel Humberto Castiblanco.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Ing. David Alfredo Fuentes Diaz por la dirección, colaboración, recomendaciones y por el tiempo que nos regaló para que esta tesis fuera lo mejor posible.

Al Ing. Samuel Fernando Muñoz Navarro por brindarnos su confianza y la oportunidad de pertenecer al GRM (Grupo de Recobro Mejorado), por su colaboración y gestión en el desarrollo del proyecto.

Al Ing. Carlos Naranjo por su colaboración.

Al grupo de ingenieros y compañeros del GRM por su apoyo, colaboración y aportes, en especial los Ingenieros Nelson León y Fernando Londoño por su brindarnos su amistad, su apoyo y colaboración en la gestión y desarrollo del proyecto.

A mi madre y mi padre por hacerme una persona integral en todos los sentidos, por inculcarme el valor de la responsabilidad, la honestidad, amabilidad y por su esfuerzo para sacarme adelante.

A mi novia Melissa Torrado por su amor y apoyo incondicional en todo momento.

A todos mis compañeros, en especial a Gabriel Humberto Castiblanco amigo y compañero de tesis, a Oscar Florez, Jeisson Quintero, Diego Santander, Oscar Tarazona, Elkin moreno, Deyber Ramirez y Edgar Ferreira por conformar el mejor grupo de trabajo y por el apoyo incondicional mutuo y porque me llevo una parte y una enseñanza de cada uno.

Danny Alexis Morantes Diaz.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	26
1. GENERADOR DE VAPOR PARA PRUEBAS DE RECOBRO TÉRMICO POR INYECCIÓN DE VAPOR EN UN MODELO FÍSICO DE DESPLAZAMIENTO RADIAL	29
1.1 GENERALIDADES	29
1.2 PARÁMETROS DE YACIMIENTO.	30
1.3 CALDERA PARA RECOBRO MEJORADO DE PETRÓLEO	31
1.4 GENERADOR DE VAPOR ELÉCTRICO	32
2. PROCESO DE DISEÑO DEL GENERADOR DE VAPOR	33
2.1 DISEÑO MECÁNICO	33
2.1.1 Procedimiento de cálculo del espesor del tanque.	34
2.1.2 Presión de prueba.	36
2.1.3 TAPA (Brida blind).	37
2.1.4 Diseño de la tapa roscada.	38
2.2 DISEÑO TÉRMICO	41
2.2.1 Cálculo del tiempo de calentamiento.	42
2.2.2 Cálculo de la temperatura exterior del recipiente.	46
3. PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL GENERADOR DE VAPOR.	56
3.1 TANQUE DE PRESIÓN	56
3.1.1 Tanque cilíndrico.	56
3.2 TAPA ROSCADA	57

3.3	TAPA CAP	59
3.4	PRUEBA HIDROSTÁTICA	60
3.5	ENVOLTORIO	60
3.6	TAPA AISLADA REMOVIBLE	61
3.7	BASE DE SOPORTE DEL TANQUE	62
3.8	PLANOS DEL GENERADOR DE VAPOR	62
4.	SISTEMAS BÁSICOS Y MÓDULOS DE CONTROL DEL GENERADOR DE VAPOR.	65
4.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS	68
4.1.1	Tarjeta NI PCI 6259.	68
4.1.2	Tarjeta NI SCB-68.	71
4.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES Y COMPONENTES DEL GENERADOR DE VAPOR.	72
4.2.1	Sensor de presión.	72
4.2.2	Sensor de nivel.	73
4.2.3	Termopares.	74
4.2.4	Controlador de ángulo de fase digital.	74
4.2.5	Resistencias eléctricas.	75
4.2.6	Válvula milimétrica.	76
4.2.7	Motor paso a paso.	77
4.2.8	Fuente de alimentación de 24 voltios DC.	77
4.2.9	Bomba de desplazamiento positivo.	77
4.2.10	Válvula ON/OFF de inyección de agua de reposición y salida de vapor.	78
4.2.11	Válvula de seguridad.	79
4.2.12	Válvula manual de cierre de salida de vapor.	80

4.2.13	Válvula de drenaje o vaciado del tanque.	80
4.2.14	Manómetro.	80
4.3	LAZOS Y MÓDULOS DE CONTROL	81
4.3.1	Lazo de control de presión.	81
4.3.2	Lazo de control de nivel.	84
4.3.3	Módulo de medición de temperatura.	85
4.3.4	Módulo de graduación de flujo de vapor.	86
4.4	CAJA DE CONTROL	88
5.	DISEÑO DEL CONTROL DEL GENERADOR EN LABVIEW	91
5.1	DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN	91
5.2	ADECUACIÓN DE LA ECUACIÓN DE LA VÁLVULA MILIMÉTRICA PARA LA GRADUACIÓN DEL FLUJO DE VAPOR	92
5.3	PUERTOS UTILIZADOS PARA EL CONTROL EN LAS TARJETAS NATIONAL INSTRUMENTS	95
5.4	PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA	96
5.5	MÓDULOS DE CONTROL DEL GENERADOR DE VAPOR	97
5.5.1	Módulo de inicio del generador de vapor.	97
5.5.2	Módulo de obtención de datos de operación.	97
5.5.3	Módulo de cambio de datos de operación.	99
5.5.4	Módulo de cálculo de la posición de la válvula.	104
5.5.5	Módulo de control PID del generador de vapor.	105
5.5.6	Módulo de medición de temperatura.	106
5.5.7	Módulo de detección de estado del tanque.	107
5.5.8	Módulo de control de nivel.	108

5.5.9 Botones de operación para el inicio de inyección, parada de inyección y apagado del equipo.	109
5.5.10 Módulo de posicionamiento de la válvula milimétrica mediante el motor paso a paso.	111
5.5.11 Módulo de apagado del equipo.	113
6. AJUSTES DEL EQUIPO	114
6.1 VERIFICACIÓN DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO DEL EQUIPO	114
6.2 MEDICIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE DEL EQUIPO Y COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL DISEÑO TÉRMICO	114
6.3 FLUJO DE VAPOR	116
6.4 CÁLCULO DE LAS CONSTANTES DEL PID PARA EL CONTROL DE PRESIÓN	116
6.5 LÍMITES MÁXIMOS DE FLUJO DE VAPOR SEGÚN EL CONTROL Y LA POTENCIA DISPONIBLE	117
6.6 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL PID Y MEDICIÓN DE TEMPERATURAS DE OPERACIÓN	117
CONCLUSIONES	120
RECOMENDACIONES	122
BIBLIOGRAFÍA	123
ANEXOS	126

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Equipo de desplazamiento radial	30
Figura 2. Bomba de desplazamiento positivo	31
Figura 3. Caldera para extracción mejorada de aceite	31
Figura 4. Diagrama de proceso de diseño del tanque de presión	33
Figura 5. Esfuerzos en las costuras longitudinal SL y transversal ST	35
Figura 6. Tapa tipo CAP	37
Figura 7. Tapa roscada	38
Figura 8. Dimensiones de una rosca cuadrada	39
Figura 9. Esquema de rosca considerada como viga corta en voladizo	40
Figura 10. Esquema de materiales y dimensiones del cuerpo del generador	47
Figura 11. Analogía eléctrica de la transferencia de calor en el generador	47
Figura 12. Circuito analogía eléctrica simplificado	48
Figura 13. Proceso de iteración para el cálculo de los coeficientes de convección	52
Figura 14. Proceso de torneado del tanque cilíndrico	57
Figura 15. Tanque generador de vapor terminado	57
Figura 16. Tapa roscada	58
Figura 17. Tuerca hexagonal soldada	58
Figura 18. Agujeros y half coupling NPT de una pulgada	58
Figura 19. Tapa CAP y tanque soldados	59
Figura 20. Prueba hidrostática	60
Figura 21. Sistema de sujeción entre la tapa removible y el envoltorio	61

Figura 22. Base y envoltorio del generador	62
Figura 23. Esquema general de los componentes del equipo	67
Figura 24. Tarjeta NI PCI 6259 de National Instruments	69
Figura 25. Componentes de instalación tarjetas National Instruments	69
Figura 26. Esquema general tarjeta de adquisición de datos	70
Figura 27. Tarjeta electrónica de distribución de puertos	71
Figura 28. Sensor presión	72
Figura 29. Visor de nivel y Sensor capacitivo	73
Figura 30. Termopares	74
Figura 31. Controlador de ángulo de fase digital	75
Figura 32. Resistencias eléctricas	75
Figura 33. Válvula milimétrica	76
Figura 34. Motor paso a paso	77
Figura 35. Fuente de alimentación	77
Figura 36. Cilindro de desplazamiento aceite-agua	78
Figura 37. Bomba de desplazamiento positivo	78
Figura 38. Válvulas servo-accionadas	79
Figura 39. Válvulas de seguridad	79
Figura 40. Válvula manual	80
Figura 41. Válvulas globo para el vaciado del tanque	80
Figura 42. Manómetro	81
Figura 43. Lazo de control de presión	82
Figura 44. Instalación mecánica del sensor de presión	82
Figura 45. Circuito electrónico de adaptación de voltaje del sensor de presión	83
Figura 46. Diagrama de conexiones eléctricas controlador de potencia	83

Figura 47. Lazo de control de nivel	84
Figura 48. Circuito electrónico de control de nivel	85
Figura 49. Módulo de medición de temperatura	86
Figura 50. Circuito electrónico de control del motor paso a paso	86
Figura 51. Módulo de graduación de flujo de vapor	87
Figura 52. Componentes del sistema mecánico de variación de flujo	87
Figura 53. Vistas frontal y posterior de la caja de control	88
Figura 54. Distribución de componentes en la caja de control	90
Figura 55. Conectores de las tarjetas National Instruments	95
Figura 56. Algoritmo de inicio del software del generador	97
Figura 57. Algoritmo de obtención de datos de operación	99
Figura 58. Algoritmo de selección de cambio de datos de operación	100
Figura 59. Algoritmo de cambio de presión	101
Figura 60. Algoritmo de cambio de flujo	102
Figura 61. Algoritmo de cambio del modo de operación	102
Figura 62. Algoritmo de cambio de la presión del medio poroso	103
Figura 63. Algoritmo de cálculo de la posición de apertura de la válvula milimétrica	104
Figura 64. Algoritmo de control PID	106
Figura 65. Algoritmo de medición de temperatura	107
Figura 66. Algoritmo de detección de estado del tanque	108
Figura 67. Algoritmo de control de nivel	109
Figura 68. Algoritmo de apagado del equipo	110
Figura 69. Algoritmo de iniciar inyección	110
Figura 70. Algoritmo de parada del equipo	110
Figura 71. Algoritmo de control de flujo	111

Figura 72. Algoritmo de apagado del equipo	113
Figura 73. Interfase gráfica software generador de vapor	145
Figura 74. Descripción de las partes de la interfase de usuario	146
Figura 75. Iniciar programa	147
Figura 76. Mensaje de orientación 1	147
Figura 77. Mensaje de orientación 2	147
Figura 78. Mensaje nivel mínimo alcanzado	148
Figura 79. Mensaje nivel máximo alcanzado	148
Figura 80. Mensaje ingreso de datos de operación	148
Figura 81. Mensaje iniciación del proceso de calentamiento	149
Figura 82. Datos cargados en pantalla	149
Figura 83. Botones de cambio de proceso y apagado del equipo	150
Figura 84. Botones activados luego de que el equipo llega a operación.	151

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros que afectan la inyección cíclica de vapor	30
Tabla 2. Dimensiones de tubería sin costura	36
Tabla 3. Tiempos y corrientes para diferentes valores de potencia eléctrica	45
Tabla 4. Formulas para el cálculo de la transferencia de calor	49
Tabla 5. Áreas y longitudes características de las superficies del tanque y las tapas del generador	51
Tabla 6. Resultados de los cálculos de las resistencias por conducción	51
Tabla 7. Resultados del proceso iterativo para el cilindro a 150 PSI	53
Tabla 8. Resultados del proceso iterativo para el cilindro a 100 PSI	53
Tabla 9. Resultados del proceso iterativo para las tapas a 150 PSI	54
Tabla 10. Resultados del proceso iterativo para las tapas a 100 PSI	54
Tabla 11. Resumen valores de temperatura y resistencias de convección para el cilindro y las tapas.	54
Tabla 12. Descripción de los planos de construcción y ensamble del equipo	63
Tabla 13. Voltajes manejados por la tarjeta de adquisición de datos.	71
Tabla 14. Componentes del sistema mecánico de variación de flujo.	88
Tabla 15. Conexiones de la caja de control.	89
Tabla 16. Componentes internos de la caja de control.	90
Tabla 17. Datos de los límites de operación del sensor de presión Voltaje vs Presión	91
Tabla 18. Relación del Cv Vs el número de vueltas de la válvula milimétrica	94
Tabla 19. Puertos de conexiones tarjetas National Instruments PCI-6259.	95
Tabla 20. Temperaturas superficiales medidas.	115

Tabla 21. Recopilación de cálculos y mediciones de temperaturas superficiales.	115
Tabla 22. Constantes del PID.	116
Tabla 23. Datos de monitoreo temperatura, presión y porcentaje de error de la presión.	118

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Propiedades de los materiales acero al carbono y de bajo contenido de elementos de aleación.	127
ANEXO B. Propiedades de los materiales: acero al carbono y de bajo contenido de aleación.	128
ANEXO C. Eficiencia de soldaduras.	129
ANEXO D. Hoja de datos sensor de presión.	129
ANEXO E. Hoja de datos sensor de nivel.	131
ANEXO F. Controlador de ángulo de fase digital.	133
ANEXO G. Válvula milimétrica Hoke.	136
ANEXO H. Válvula ON/OFF.	140
ANEXO I. Manual de operación del generador de vapor	144
ANEXO J. Medidas temperaturas superficiales generador de vapor	152

GLOSARIO

RECOBRO MEJORADO: También llamado recuperación terciaria del petróleo, es un conjunto de métodos que consisten en inyectar energía al yacimiento que puede ser química o térmica con el fin de aprovecharlo y recuperar al máximo la producción.

GENERADOR DE VAPOR: Máquina de ingeniería donde la energía, generalmente de tipo química, es transformada en energía térmica habitualmente almacenada en vapor de agua, con energía suficiente como para hacer funcionar una turbina en un ciclo de Rankine modificado.

RESISTENCIA ELÉCTRICA SUMERGIBLE: Elemento cuyo principio de funcionamiento está basado en la ley de joule utilizado para realizar calentamiento de líquidos.

EBULLICIÓN NUCLEADA: fenómeno de ebullición en el cual se forman burbujas aisladas en lugares de nucleación y se separan de la superficie de calentamiento, en cuyo régimen la transferencia de calor se da principalmente entre la superficie y el agua y no por las burbujas de vapor.

LABVIEW: Herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

SENSOR: Aparato capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas.

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

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR DE VAPOR ELÉCTRICO PARA PROCESOS DE RECOBRO TÉRMICO EN UN MODELO FÍSICO DE DESPLAZAMIENTO RADIAL.*

AUTORES:

Gabriel Humberto Castiblanco.

Danny Alexis Morantes Diaz. **

PALABRAS CLAVES:

Recobro térmico, Generador de vapor, control PID.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo del proyecto es diseñar y construir un generador de vapor que será utilizado para la realización de pruebas de recobro térmico de hidrocarburos para el grupo de investigación de recobro mejorado de la escuela de ingeniería de petróleos.

La construcción de este equipo pretende suplir la necesidad de realizar pruebas de laboratorio sobre inyección cíclica de vapor en modelos físicos de desplazamiento radial, que representan un gran aporte a la investigación en la industria petrolera. Aunque en la industria existen equipos para el desarrollo de estos procesos, se debe resaltar que no existe para laboratorio uno que cumpla con las características necesarias para el adecuado estudio del proceso.

El equipo cuenta con un cuerpo cilíndrico, una tapa CAP y una tapa roscadas de acero A106B, aislados con manta de perlita, el proceso de calentamiento se realiza mediante resistencias eléctricas de 1000 vatios y es controlado mediante un sensor de presión, sensores de nivel capacitivos y un acoplador de potencia integrados mediante dos lazos de control que corresponden a un PID de presión y un ON/OFF para el nivel, la regulación de flujo es realizada por medio de la adaptación mecánica de un motor paso a paso con una válvula milimétrica manual utilizada en equipos médicos y bioquímicos para la regulación de flujos de gases y vapores, la interfaz gráfica y el control fueron programados en LabVIEW, permitiendo al usuario establecer las variables de operación y dando la posibilidad de desarrollar mejoras a futuro.

Como resultados se obtuvieron los planos de construcción del equipo en SolidWorks, se construyó el equipo, se desarrolló la aplicación de software que controla el equipo y se realizaron las pruebas de ajuste entregando un generador que cumple con las variables de proceso exigidas en las especificaciones técnicas y apto para la realización de pruebas.

* Trabajo de Grado en la modalidad de investigación.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Dr. David Alfredo Fuentes Diaz, M. Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro, Ing. Carlos Eduardo Naranjo Suarez.

SUMMARY

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ELECTRIC STEAM GENERATOR PROTOTYPE FOR TERMIC RECOVERING IN A PHYSICAL MODEL OF RADIAL DISPLACEMENT *

AUTHORS:

Gabriel Humberto Castiblanco.

Danny Alexis Morantes Diaz. **

KEY WORDS:

Termic recovering, steam generator, PID controller

DESCRIPTION:

The objective of this project is to design and construct a steam generator that will be used on the carrying out of hydrocarbon termic recovering tests, for the improvement recovering research group of the UIS petroleum Engineering department.

The construction of this equipment aims to fulfill the necessity of doing laboratory tests about cyclical steam injection in physical models of radial displacement, which are a great contribution to the oil companies. Even though there are already some equipments that help to this duty, It is important to know that there isn't any laboratory that can carry out in suitable conditions such process.

The equipment has a cylindrical body, a CAP, and a steel threaded cap A106B, isolated with perlite, the heating process is made by 1000 watt electric resistors and is controlled by a pressure sensor, capacitive sensors and a power coupler, integrated by two control loops that are a PID pressure and an ON/OFF for the level, the flow control is made by the mechanic adjustment of a stepper motor with a millimetric manual valve used in medical and biochemical equipments for the control of gas and steams, graphical user interface and the control were programmed in LabVIEW, which allows users to establish the processing variables and to have the possibility of improving it.

Finally, there were obtained the machine's constructions drafts in SOLIDWORKS, then equipment was made, as well as the software application that controls it, and several adjustment tests having as a result a steam generator that fulfills the technic specifications.

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Dr. David Alfredo Fuentes Diaz, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Dr. David Alfredo Fuentes Diaz, M. Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro, Ing. Carlos Naranjo Suarez.

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera se ha posicionado como un gran campo de acción para el ingeniero mecánico y por ello es importante la aplicación de conceptos adquiridos durante la carrera para plantear y generar soluciones de ingeniería ante problemas que surgen en esta área de la industria como la de la explotación de los hidrocarburos.

La explotación del petróleo es muy importante debido a que ésta es la principal fuente de energía primaria del mundo, por ello y con el fin de aprovechar al máximo los yacimientos petrolíferos, que algunas veces no se han explotado debido a que se dificulta su extracción por ser crudos de alta viscosidad o porque no es viable económicamente su recuperación por medio de métodos convencionales, se han desarrollado diferentes técnicas de recobro mejorado. Estas técnicas consisten en la inyección de compuestos químicos disueltos en agua, inyección de gases miscibles alternando con las aplicaciones de agua, la inyección de las denominadas micellar solutions (que son microemulsiones compuestas por surfactantes, alcoholes y aceites crudos), la inyección de vapor y la combustión in-situ.

Aplicar estas técnicas en campo sin antes realizar una evaluación técnica y económica puede resultar en altos costos de operación; debido a esto es importante contar con herramientas como la simulación numérica, los modelos analíticos y los modelos físicos escalados que permiten estudiar la posible aplicabilidad de los diferentes métodos de recobro. Esta última herramienta sirve a los investigadores para determinar, a nivel de laboratorio, fenómenos que ocurren al interior de yacimiento de manera cuantitativa y cualitativa, resultados con los que se puede simular, evaluar y predecir el comportamiento de los yacimientos a técnicas como la inyección de vapor, agua, dióxido de carbono u otros.

Con el presente trabajo de grado se busca brindar una herramienta para la investigación de la inyección de vapor para recobro mejorado del petróleo a escala

de laboratorio, a través del diseño y la construcción de un generador de vapor de pequeño tamaño capaz de suministrar vapor saturado a bajas tasas y hasta la presión de 150 psi por el tiempo de prueba necesario. De esta forma se logrará realizar pruebas escaladas del comportamiento de yacimientos estimulados con vapor permitiendo determinar la respuesta del mismo a tal técnica y determinar de esta manera si los proyectos son viables desde el punto de vista técnico y económico.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los capítulos de lo que se encuentra en cada uno de los capítulos presente libro.

En el capítulo 1, se habla de las generalidades del proceso de recobro mejorado del petróleo mediante inyección de vapor, el generador de vapor utilizado en campo, los requerimientos y el tipo de generador que se construyó.

En el capítulo 2, se presenta el diseño mecánico del recipiente a presión según los requerimientos del código A.S.M.E. sección VIII, división 1, el modelo térmico y de transferencia de calor utilizado en la selección del sistema de calentamiento, el aislamiento térmico obteniendo como resultados el tiempo de calentamiento, las temperaturas alcanzadas en la superficie y la eficiencia del equipo.

En el capítulo 3, se muestra el proceso de construcción de los diferentes componentes del equipo, los procesos que se llevaron a cabo en la fabricación de cada uno y se explican los cuidados y recomendaciones para su ensamblaje. Como resultados se obtuvieron los planos de construcción y ensamble del equipo.

En el capítulo 4, se presentan los sistemas básicos de control, las características de las tarjetas National Instruments utilizadas, los componentes y accesorios del equipo. Se muestran los módulos de graduación de flujo, medición de temperatura y los lazos de control de presión y nivel.

En el capítulo 5, se muestran los algoritmos de cada una de las etapas programadas en LabVIEW. Iniciando con los modelos matemáticos del sensor de

presión y la válvula milimétrica. Se realiza la descripción del control de presión PID, el control de nivel ON/OFF, los módulos de control de flujo y medición de temperatura así como de la interfaz gráfica de comunicación con el usuario.

En el capítulo 6, se presentan los resultados de las pruebas realizadas para lograr el ajuste del funcionamiento del equipo, la verificación del tiempo de calentamiento, la sintonización de las constantes del PID y algunos cuidados que deben tenerse en la operación.

1. GENERADOR DE VAPOR PARA PRUEBAS DE RECOBRO TÉRMICO POR INYECCIÓN DE VAPOR EN UN MODELO FÍSICO DE DESPLAZAMIENTO RADIAL

1.1 GENERALIDADES

La inyección de vapor es un método de recobro mejorado utilizado para la recuperación de crudos pesados y extra pesados, que disminuye la viscosidad y aumenta la movilidad del crudo para facilitar su extracción. La aplicación de estos métodos en campo requieren previamente de una evaluación técnica y económica del proyecto, una de las herramientas utilizadas para tal fin son los modelos físicos escalados que permiten investigar los fenómenos que ocurren en el yacimiento de manera cualitativa y cuantitativa.

El desarrollo de esta tesis nace como una necesidad de contribuir al estudio del método de inyección continua de vapor por parte del proyecto titulado “Desarrollo de un modelo físico de desplazamiento radial para simular procesos de recobro de hidrocarburos”¹, el equipo construido en este proyecto se muestra en la Figura 1. Este proyecto busca desarrollar un modelo radial físico escalado, para realizar pruebas de desplazamiento que permitan evaluar los fenómenos físicos que ocurren en un yacimiento de petróleo sometido a un proceso de inyección de agua o inyección continua de vapor².

Para la realización de pruebas de inyección de vapor son importantes algunos parámetros de yacimiento y operacionales. Establecer los parámetros mostrados en la Tabla 1 que permiten garantizar un buen desempeño del proceso.

¹ Aprobado dentro de la Convocatoria permanente para el apoyo de Programas Estratégicos y Proyectos de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación en las modalidades de Cofinanciación y Crédito-403

² Manual de procedimientos en el equipo de desplazamiento radial...NTC 5613

Figura 1. Equipo de desplazamiento radial



Tabla 1. Parámetros que afectan la inyección cíclica de vapor

PARÁMETROS	
YACIMIENTO	OPERACIONALES
❖ Profundidad de la formación.	❖ Tasa de inyección.
❖ Presión del yacimiento.	❖ Presión de inyección.
❖ Viscosidad del crudo.	❖ Calidad del vapor a la salida del generador, en cabeza de pozo y cara de la arena.
❖ Espesor de la arena productora.	
❖ Intercalaciones de arcilla.	❖ Temperatura del vapor.

1.2 PARÁMETROS DE YACIMIENTO.

Los parámetros del yacimiento necesarios para las pruebas de recobro mejorado con inyección de vapor según los cálculos de escalamiento realizados por parte de la escuela de petróleos, sugieren la construcción de un generador de vapor que cumpla con las siguientes condiciones de operación:

- ✚ Suministro de vapor saturado a presión constante de hasta 150 psig.
- ✚ El vapor saturado debe ser suministrado con calidad lo más cercana posible a uno ($x = 1$) a la salida del generador.

- ✚ Un caudal de vapor equivalente a una tasa de inyección de agua de 0,1 a 4 cm³/min suministrada por una bomba desplazamiento positivo como la que se muestra en la Figura 2 perteneciente a la Escuela de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, que tiene una capacidad máxima de 10 cm³/min y una presión máxima de 5000 psi.
- ✚ Debe ser de tamaño reducido para utilización en laboratorio.

Figura 2. Bomba de desplazamiento positivo



1.3 CALDERA PARA RECOBRO MEJORADO DE PETRÓLEO

Para satisfacer las condiciones de operación en campo se usa un equipo especial como el mostrado en la Figura 3, llamado caldera para extracción mejorada de aceite (EOR). En esta caldera se utiliza un circuito de un paso agua-vapor, o proceso directo de vaporización. El agua de alimentación fluye continuamente por un circuito tubular simple a través de la sección del economizador, hacia la sección del hogar, donde el agua se vaporiza.

El proceso de generación de vapor se controla mediante la regulación de la combustión en el quemador y la regulación del bombeo de agua de alimentación; con este control se busca que el título a la salida sea aproximadamente del 0,8.

Figura 3. Caldera para extracción mejorada de aceite



Fuente: <http://es.libros.redsauce.net/index.php?folderID=14>, Pdf 25: diseño de calderas industriales.

El diseño de este tipo de generador de vapor a una escala de laboratorio no se contempló principalmente porque no existen accesorios ni dispositivos de control adecuados para el tamaño de tuberías involucradas debido a las bajas tasas de inyección necesarias.

1.4 GENERADOR DE VAPOR ELÉCTRICO

Según la búsqueda realizada en empresas proveedoras y fabricantes de generadores de vapor como Spirax Sarco, Certuss, Termoflux y Colmáquinas, los generadores de bajas tasas de suministro son eléctricos y se encuentran en rangos entre 100 y 120 *psi* de presión máxima de operación y flujos de vapor entre 27000 y 337000 cm^3/min (8 y 97 *Kg/h*) dependiendo del tamaño del equipo. Los generadores de vapor eléctricos son muy utilizados en lugares donde se dispone de un espacio de generación de vapor pequeño o donde se dificulta el suministro de gas, razones que justifican que el generador de vapor diseñado y construido sea de tipo eléctrico permitiendo cumplir con las condiciones de operación requeridas en las pruebas de desplazamiento.

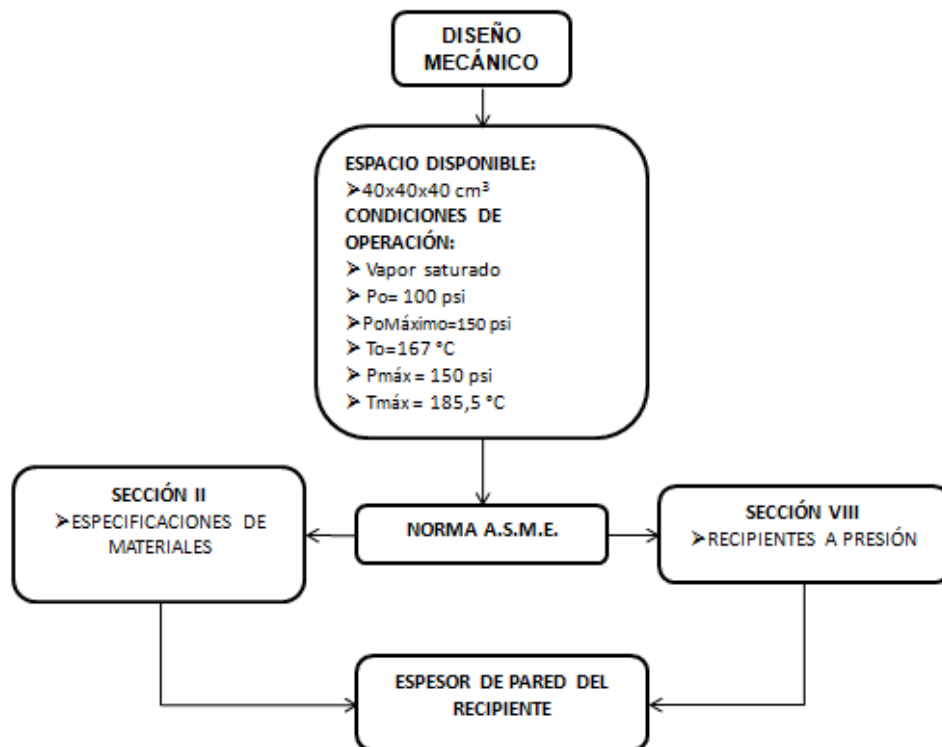
2. PROCESO DE DISEÑO DEL GENERADOR DE VAPOR

El diseño del generador de vapor se divide en diseño mecánico y diseño térmico.

2.1 DISEÑO MECÁNICO

Como se observa en el diagrama de la Figura 4, el diseño mecánico del generador de vapor se define a partir del espacio disponible para el equipo y las condiciones de operación. Según estas condiciones, se obtienen las dimensiones y una estimación del material del tanque de presión, luego se diseña el recipiente a presión siguiendo las especificaciones de materiales y cálculos de la norma ASME, que tiene como objetivo la determinación del espesor para la pared del recipiente.

Figura 4. Diagrama de proceso de diseño del tanque de presión



2.1.1 Procedimiento de cálculo del espesor del tanque. Un recipiente a presión es cualquier vasija cerrada sometida a presión ya sea interna o externa. En estos recipientes la presión de trabajo o presión de operación P_o es la presión manométrica a la que estará sometido el equipo en condición normal de operación. Para el cálculo se define la presión de diseño, que según la norma ASME sección VIII, división 1, “recipientes a presión no sometidos a fuego directo”, es igual a:

$$P_D = P_o \text{ máxima} + 30 \frac{\text{lbs}}{\text{pulg}^2} \quad \text{si} \quad P_o \leq 300 \frac{\text{lbs}}{\text{pulg}^2}$$

$P_D =$ presión de diseño.

$P_o \text{ máxima} =$ presión máxima de operación.

Remplazando los valores que se indican en el diagrama de la Figura 4, se obtiene:

$$P_D = 150 + 30 = 180 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$$

Con el dato de presión de diseño se calcula el espesor de pared para el esfuerzo en la unión longitudinal S_L mostrado en la Figura 5 que es el que rige generalmente en el diseño de recipientes a presión según la siguiente fórmula:

$$t = \frac{P * R}{S * E - 0,6P}$$

$t =$ espesor de la pared [pulg].

$P =$ presión de diseño [lb/pulg²].

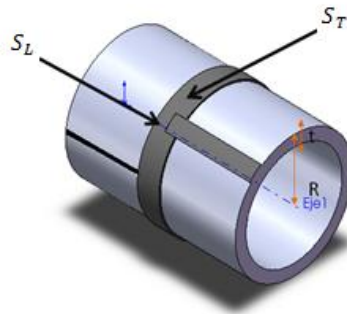
$S =$ valor del esfuerzo del material en [lb/pulg²].

$E =$ eficiencia de la junta (tabla factores M)

$R =$ radio interior [pulg].

A continuación se muestran los criterios de seleccionados para cada uno de los parámetros de la ecuación.

Figura 5. Esfuerzos en las costuras longitudinal S_L y transversal S_T



❖ **Esfuerzo del material:** El material recomendado para el cuerpo del tanque fue acero inoxidable debido a que brinda mayor vida útil y es ideal para ambientes corrosivos, como segunda posibilidad y según la norma ASME se seleccionó el material SA 106 B ver ANEXO A, que corresponde a un acero al carbono utilizado para tuberías en servicio de alta temperatura. Finalmente se utilizó A 106 B para la construcción del tanque debido a razones económicas justificadas por el interventor del proyecto. Este material posee un valor de esfuerzo máximo permitido $S_y = 15000 \text{ psi} \approx 100 \text{ Mpa}$, para mayor información ver el ANEXO B.

❖ **Eficiencia de la junta:** La eficiencia de la junta es igual a uno debido a que se tomó un tubo sin costura para la fabricación del cuerpo del tanque.

$$E = 1$$

❖ **Radio interior:** Esta dimensión está restringida por el espacio disponible y la capacidad de almacenamiento requerida de, 10 lt de agua, por estas dos razones se tomó un radio interior de 4 pulgadas (10,2 cm).

Una vez definidos todos los parámetros el espesor del tubo calculado fue:

$$t = \frac{180 * 4}{15000 * 1 - 0,6 * 180} = 0,05 \text{ pulg} = 1,2 \text{ mm}$$

Por facilidad de adquisición la empresa que fabricó el equipo utilizó un tubo comercial de acero ASME A 106-B Schedule 40 que posee un espesor de 8,2 mm, sus dimensiones se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones de tubería sin costura

Diámetro nominal	Diámetro exterior		Schedule	Espesor de pared	
	Pulgadas.	mm		Pulgadas.	mm
8	8,625	219,1	40	0,322	8,18

Fuente: Catálogo de Fierro Tradi S.A.

2.1.2 Presión de prueba. Una vez ha sido fabricado el recipiente, se procedió a realizar la prueba hidrostática tomando como referencia el valor dado por la siguiente ecuación:

$$P_p = 1.5 * P_D * \left(\frac{Sta}{Std} \right)$$

$P_D =$ presión de diseño.

$P_p =$ Presión de prueba.

$Sta =$ Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura ambiente [psi].

$Std =$ Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura de diseño [psi].

La presión máxima de operación del tanque es de 150 psi, en donde la temperatura de saturación correspondiente es de 185.5°C (366°F) que se tomará como temperatura de diseño y la temperatura ambiente es de 25°C (77°F). Para estas temperaturas el cambio en la resistencia del material es despreciable por tanto la relación $\frac{Sta}{Std} = 1$ y la presión de prueba se calcula así:

$$P_p = 1.5 * 180 * 1 = 270 \text{ psi}$$

$$P_p = 270 \text{ psi}$$

2.1.3 TAPA (Brida blind). Para la tapa soldada del generador se seleccionó una tipo CAP de ocho pulgadas de diámetro ($\phi = 8''$) shudule 40, como la que puede verse en la Figura 6, el material de ésta es ASME A 106-B. Las razones principales de seleccionar este tipo de tapa es que son comerciales y por su forma son especiales para trabajo en altas presiones.

Figura 6. Tapa tipo CAP



Estas tapas son fabricadas según norma ASME-B36.10M-2004 “Welded and Seamless Wrought Steel Pipe” y soportan grandes presiones manométricas. Para calcular el espesor necesario de esta tapa se toma la ecuación de una tapa toriesférica:

$$t = \frac{P * R}{2 * S * E - 0,2 P}$$

$t =$ espesor de la pared [pulg].

$P =$ presión de diseño [$lb/pulg^2$].

$S =$ valor del esfuerzo del material en [$lb/pulg^2$].

$E =$ eficiencia de la junta (tabla factores M)

$R =$ radio interior [pulg].

En el cálculo se realizan dos consideraciones: la primera es que el radio de abombado es igual al radio de la tapa y la segunda es que la eficiencia de la tapa

es de 0,6 cuando es soldada como junta a tope sin tira de respaldo, para mayor detalle ver ANEXO C.

Reemplazando estos datos se tiene:

$$t = \frac{180 * 4}{2 * 15000 * 0,6 - 0,2 * 180} = 0,04 \text{ Pulg} = 1 \text{ mm}$$

Al igual que el tanque la tapa tiene un espesor de 8,2 mm, lo que asegura que resistirá el esfuerzo al que está sometida.

2.1.4 Diseño de la tapa roscada. Debido a que se desea tener acceso al interior del tanque para la realización de mantenimiento y que el tanque tenga un diseño más compacto y estético, se decidió instalar una tapa con rosca cuadrada como la que se observa en la Figura 7. Las dimensiones de la tapa son 8 pulgadas de diámetro interior, 8 mm de paso y 6 vueltas para la rosca, estos valores fueron calculados con la siguiente ecuación:

$$W = D = 0,5 * P$$

P = paso de la rosca.

W = ancho del filete.

D = altura de la rosca.

$$P = 8 \text{ mm} \quad W = D = 4 \text{ mm}$$

En la Figura 8 puede verse una representación gráfica de estas medidas.

Una de las ventajas principales de este modelo de tapa es que puede transmitir todas las fuerzas en dirección casi paralela al eje para resistir los grandes esfuerzos creados por la presión.

Figura 7. Tapa roscada

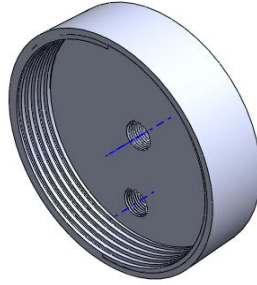
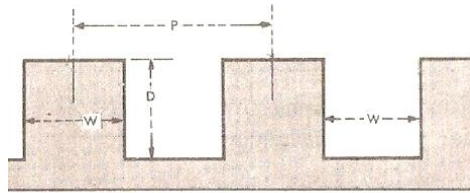


Figura 8. Dimensiones de una rosca cuadrada



Fuente: proyecto de elementos de sujeción, anclaje y cierre.

❖ **Cálculo de la rosca.** No es muy común encontrar tapas roscadas en recipientes a presión y por ello es importante calcular el esfuerzo al que estará sometida la rosca en la tapa. En este diseño el valor de la altura es igual al ancho del filete de la rosca ocasionando que el esfuerzo predominante sea el de flexión en la base, este valor fue calculado con la siguiente ecuación:

$$S_s = \frac{3 * W}{2 * \pi * n * r_m * b^2}$$

$W = \text{carga}$

$n = \text{numero de vueltas de la rosca}$

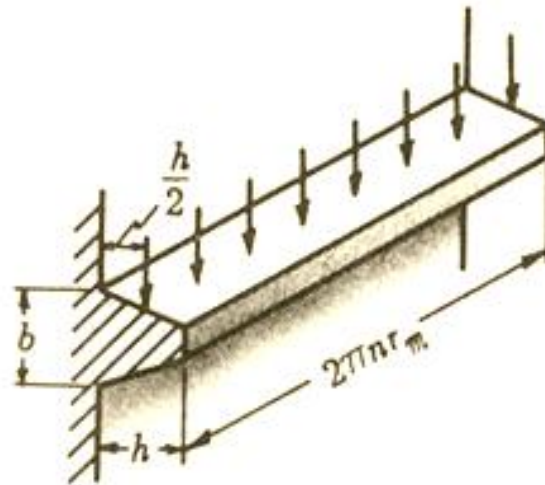
$r_m = \text{radio a la seccion media del filete de la rosca}$

$b = \text{ancho del filete}$

Los esfuerzos se calculan considerando que la rosca es una viga corta en voladizo proyectada desde el núcleo como se observa en la Figura 9. La carga sobre la

viga se toma como la carga axial (W) del tornillo, concentrada en el radio medio (r_m), lo anterior corresponde a la mitad de la altura (h) de la rosca. El ancho de la viga (b) es la longitud de la rosca (medida en el radio medio) sometida a la carga.³

Figura 9. Esquema de rosca considerada como viga corta en voladizo



Fuente: Diseño de máquinas serie Schaum, capítulo 12, página 147.

La fuerza debida a la presión máxima de 150 *psi* sobre la cara de la tapa que posee un área de 360 cm^2 (55,8 *pulg*²)⁴ es:

$$W = P * A = 150 * 55.8$$

$$W = 8370 \text{ lb}$$

El radio medio se calcula con el diámetro interior de la rosca y la altura de la rosca así:

³ A.S. HALL, A.R. HOLLOWENCO Y H.G. LAUGHLIN. Diseño de máquinas. Serie Schaum - McGraw Hill, 1975. 346p.

⁴ Obtenida mediante el dibujo realizado en SolidWork.

$$r_m = r_{int} + \frac{h}{2}$$

$$r_m = 10.955 + \frac{0.8}{2} = 11.355 \text{ cm} \approx 4.5 \text{ pulg}$$

Reemplazando se tiene:

$$S_s = \frac{3 * 8370}{2 * \pi * 6 * 4.5 * \left(\frac{4}{25.4}\right)^2} = 5968 \text{ psi}$$

Calculando el factor de seguridad:

$$N = \frac{S_y}{S_s}$$

$S_s = \text{esfuerzo por flexión en la base de la rosca}$

$S_y = \text{esfuerzo de fluencia del material}$

$$N = \frac{15000}{5968} = 2.5$$

Este factor de seguridad cumple con el criterio de operación del equipo y es mayor que el factor de seguridad aplicado en la prueba hidrostática (1.5).

2.2 DISEÑO TÉRMICO

El diseño térmico tiene por objetivo seleccionar la potencia de las resistencias eléctricas de calentamiento de agua, el material y espesor para el aislante y calcular la temperatura de la superficie exterior del equipo.

Para cumplir con la capacidad de 10 lt requerida para el generador de vapor se tomó una longitud de 30 cm para el cilindro del tanque y se cálculo el volumen con la siguiente expresión:

$$V_{total} = V_{cap} + V_{cilindro}$$

$$V_{total} = \frac{4}{6} \pi * r_{int}^2 * + \pi * r_{int}^2 * L$$

$$d_{int} = d_o - 2t_{int} = 219.1 - 2 * 8,18 = 202.7 \text{ mm}$$

$$r_{ext} = 101.35 \text{ mm}$$

$$V = \frac{4}{6} \pi * 101,35^3 + \pi * 101,35^2 * 300 = 11866445 \text{ mm}^3 = 11.86 \text{ lt}$$

El volumen obtenido cumple con el requerimiento de capacidad de almacenamiento. Para iniciar el calentamiento de agua se recomienda que el llenado del tanque se haga a dos tercios del nivel total líquido para mantener las resistencias sumergidas y para evitar problemas de sobre nivel que se presentan en las calderas cuando el nivel es muy alto. De esta manera el volumen disponible aproximado para el agua y el vapor son⁵:

$$V_{total} = 11.86 \text{ lt}$$

$$V_f = 8.47 \text{ lt}$$

$$V_g = 3.4 \text{ lt}$$

El tanque se llena automáticamente o manualmente dependiendo de la disponibilidad de bomba en el laboratorio el día de la prueba⁶, en ambos casos el control de nivel indica cuando el tanque se encuentra en el nivel adecuado sea por llenado con bomba o manual.

2.2.1 Cálculo del tiempo de calentamiento. Es necesario calcular el tiempo que demora el equipo en llegar a la condición de operación, para diferentes valores de

⁵ Calculados con SolidWorks.

⁶ La bomba de desplazamiento positivo en ocasiones se encuentra ocupada.

resistencias eléctricas de calentamiento, buscando evitar largos tiempos de espera para el usuario y corrientes altas en la línea de alimentación que requieran acometidas especiales.

Para una presión máxima de operación de 150 Psig, las propiedades de líquido y vapor saturado son:

$$P = 10,34 \text{ bar}$$

$$T = 185.5^{\circ}\text{C}$$

$$v' = 1,13493 * 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

$$u' = 786,48 \text{ KJ} / \text{Kg}$$

$$h' = 787,66 \text{ KJ} / \text{Kg}$$

$$v'' = 0.17217 \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

$$u'' = 2604,38 \text{ KJ} / \text{Kg}$$

$$h'' = 2782,4 \text{ KJ} / \text{Kg}$$

De acuerdo con las propiedades listadas anteriormente los volúmenes y las masas calculados para el líquido y el vapor son:

$$V_{liq} = 8,47 \text{ lt}$$

$$m_{liq} = \frac{V_{liq}}{v'} = \frac{8,47 * 10^{-3}}{1.134 * 10^{-3}} = 7,47 \text{ Kg}$$

$$V_{vapor} = 3,4 \text{ lt}$$

$$m_{vapor} = \frac{V_{vapor}}{v''} = \frac{3.4 * 10^{-3}}{0.17217} = 1,975 * 10^{-2} \text{ Kg}$$

$$m_{total} = m_{liq} + m_{vapor}$$

$$m_{total} = 7,47 + 0,01975$$

$$m_{total} = 7,5 \text{ kg}$$

Posteriormente se calcula la calidad y la energía interna al interior del recipiente como sistema cerrado según:

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{vapor} + m_{liq}}$$

$$x = \frac{0.01975}{7.5} = 2.63 * 10^{-3}$$

$$u_2 = u' + x * u''$$

$$u_2 = 786.48 + 2.63 * 10^{-3} * 2604.38$$

$$u_2 = 793.33 \text{ KJ/ Kg}$$

Al iniciar el calentamiento el agua se encuentra a condiciones estándar y tiene las siguientes propiedades:

$$P = 1.01325 \text{ bar}$$

$$T = 25^{\circ}\text{C}$$

$$v_1 = 1.003 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{Kg}$$

$$u_1 = 104,75 \text{ KJ/ Kg}$$

$$h_1 = 104.878 \text{ KJ/Kg}$$

Aplicando la primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados se calcula la energía necesaria para llevar el agua desde la condición inicial al punto de operación:

$$Q - W = m (u_2 - u_1)$$

$$Q - 0 = 7.5 * (793.33 - 104.75)$$

$$Q = 5164.35 \text{ KJ} = 4894.8 \text{ BTU}$$

Conocida la energía se calcula el tiempo en alcanzar la condición de operación según:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$$

Dónde:

\dot{Q} = potencia de las resistencias eléctricas de calentamiento [W].

Q = energía necesaria para llevar el agua de las condición inicial a la final [J].

t = tiempo empleado en alcanzar la condición final. [sg].

En la Tabla 3 se muestran los tiempos calculados para diferentes valores de potencia de resistencias eléctricas y los respectivos consumos de corriente eléctrica para cada caso. De acuerdo con la Tabla 3 se seleccionó la potencia de 2000 W debido a que la acometida del laboratorio maneja 15 amperios, pero se debe tener en cuenta que el generador de vapor no es el único equipo conectado a esta línea eléctrica. Se decidió tomar como referencia las potencias con consumos de hasta 10 amperios y adicionalmente el menor tiempo invertido en el calentamiento, con este criterio se seleccionó el caso en que el equipo tarda el menor tiempo en llegar a su punto de operación que fue el de 43 minutos. Para lograr una mejor distribución del calor generado se adaptaron dos resistencias de 1000 watts conectadas en paralelo.

Tabla 3. Tiempos y corrientes para diferentes valores de potencia eléctrica

Potencia de las resistencias (W)	tiempo de calentamiento (min)	Corriente (A)
1000	86,07	4,55
1500	57,38	6,82
2000	43,04	9,09
2500	34,43	11,36
3000	28,69	13,64
4000	21,52	18,18

2.2.2 Cálculo de la temperatura exterior del recipiente. Esta temperatura debe ser un valor bajo, se calcula para evitar que el operario sufra quemaduras al entrar en contacto con la superficie del equipo y para verificar que el aislante seleccionado es el adecuado para minimizar las pérdidas por transferencia de calor con el ambiente. La transferencia de calor en el generador ocurre principalmente por el área cilíndrica del tanque y por las dos tapas laterales. Existe una serie de conectores que funcionan como aletas pero las pérdidas en estos componentes son despreciables respecto al equipo en general. Para realizar el cálculo de la temperatura superficial del equipo se tomó como aproximación que la temperatura interior del tanque es igual a la temperatura del vapor, la transferencia de calor ocurre principalmente por medio de la conducción en los componentes del cuerpo del tanque y por convección natural en el exterior. En la transferencia por conducción se encuentran tres componentes, el cilindro en acero A106B del cuerpo del tanque, el aislante de manta de perlita o cabul con una conductividad de $0,047 W/K * m$ y con un espesor de una pulgada ($e_{aisl} = 1 \text{ pulg}$) y la lámina metálica que envuelve el aislante. De estos tres componentes el único que aporta una resistencia considerable es el aislante las otras dos resistencias son despreciables. Para la convección natural se tomó la formulación de Churchill y Chu para cilindros horizontales y placas verticales.

Para el cálculo de las pérdidas por transferencia de calor se tomó el punto máximo de operación que corresponde a 150 PSI y una temperatura de saturación del vapor de 185,5 °C.

En la Figura 10 se muestra en resumen los materiales que componen el cuerpo del tanque y sus respectivas dimensiones. En la Figura 11 se muestra el esquema completo de la analogía eléctrica utilizada para definir las ecuaciones que permiten realizar el cálculo del calor total transferido por el generador.

Figura 10. Esquema de materiales y dimensiones del cuerpo del generador

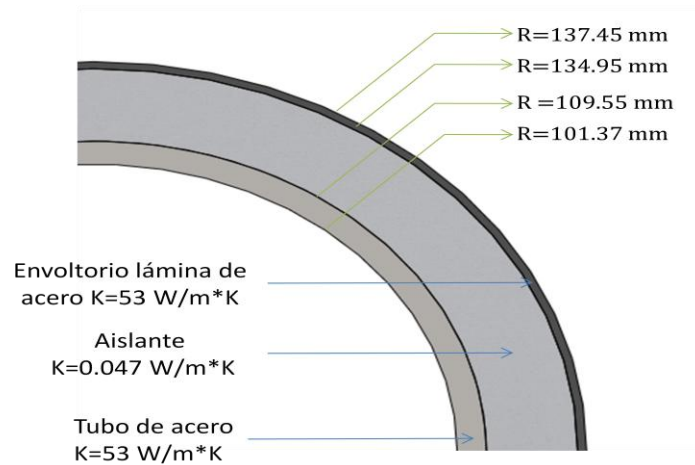
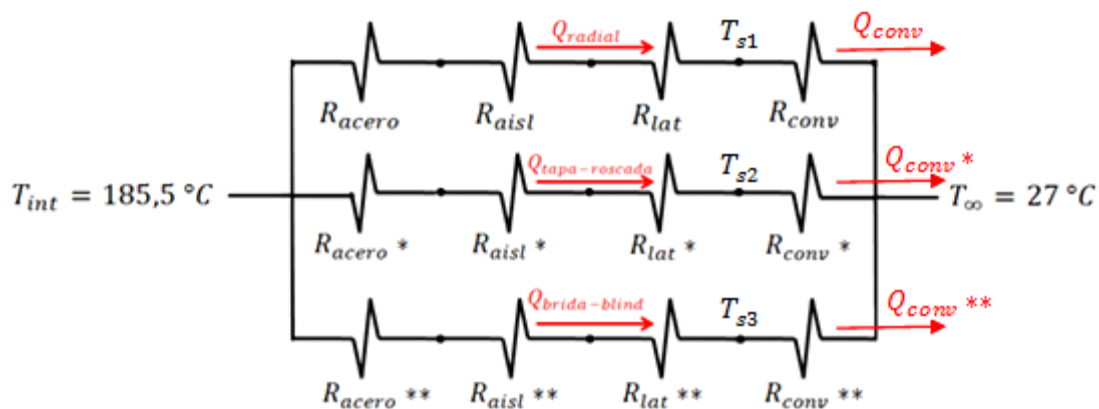
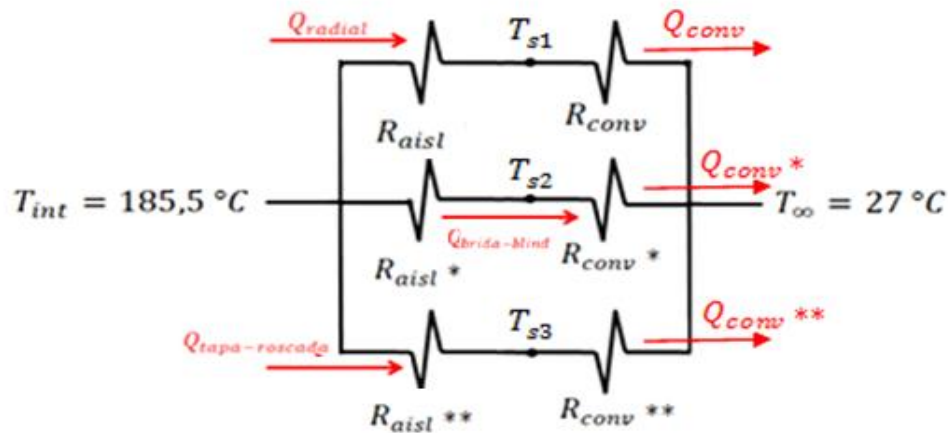


Figura 11. Analogía eléctrica de la transferencia de calor en el generador



Como se mencionó anteriormente las resistencias del acero y de la lámina son despreciables lo que reduce el diagrama de la analogía eléctrica al mostrado en la Figura 12.

Figura 12. Circuito analogía eléctrica simplificado



Según el diagrama simplificado la transferencia de calor total esta dada por la siguiente ecuación:

$$Q_L = Q_{radial} + Q_{tapa-roscada} + Q_{brida-blind}$$

Q_L = calor total de pérdidas [W].

Q_{radial} = Calor de pérdidas a través del cilindro de manera radial [W].

$Q_{tapa-roscada}$ = Calor de pérdidas a traves de la tapa roscada[W].

$Q_{brida-blind}$ = Calor de pérdidas a traves de la brida blind[W].

Para realizar todos los cálculos se utilizaron las formulaciones contenidas en la Tabla 4, donde se explican cada uno de los parámetros.

Tabla 4. Formulas para el cálculo de la transferencia de calor

Nº	Cálculo	Fórmula	Parámetros
1	Calor transferido por conducción	$Q = \frac{\Delta T}{\sum R_T}$	<p>Q = Calor transferido [W].</p> <p>ΔT = Diferencia de temperaturas entre puntos [K].</p> <p>R_T = resistencia térmica de los materiales $\left[\frac{K}{W}\right]$.</p>
2	Resistencia de conducción paredes cilíndricas	$R = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 * \pi * L * K}$	<p>r_1 = radio interior de la tubería [m].</p> <p>r_2 = radio exterior de la tubería [m].</p> <p>L = longitud de la tubería [m].</p> <p>K = conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m * K}\right]$.</p>
3	Resistencia de conducción paredes planas	$R = \frac{e}{K * A}$	<p>e = Espesor de la pared [m].</p> <p>A = Área de la superficie de la pared [m²].</p>
4	Resistencia de convección natural	$R_{conv \text{ nat}} = \frac{1}{h_{conv \text{ nat}} * A}$	<p>$h_{conv \text{ nat}}$ = coeficiente de convección natural $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$.</p> <p>$A$ = Área de la superficie [m²].</p>

Tabla 4. (Continuación)

No	Cálculo	Fórmula	Parámetros
Formulaciones de Churchill y Chu para convección natural			
5	Nusselt para cilindros horizontales	$\overline{Nu}_D = \left(0,6 + \frac{0,387 * Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$	<p>Ra_D = número de Rayleigh.</p> <p>Pr = número de Prandtl.</p> <p>(Pr: es obtenido de tablas).</p>
6	Nusselt para placas verticales	$\overline{Nu}_D = \left(0,825 + \frac{0,387 * Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$	
7	Rayleigh	$Ra_D = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * D^3}{\nu * \alpha}$ <p>g = aceleración gravitacional (9,81 m/s²).</p> <p>β = coeficiente volumétrico de expansión térmica [K⁻¹].</p> <p>$\beta = \frac{1}{T}$ Para gases ideales (aire a condiciones estándar)[K⁻¹].</p>	<p>D = diámetro del cilindro [m], o longitud característica de la placa.</p> <p>ν = viscosidad cinemática [m²/s].</p> <p>α = difusividad térmica [m²/s].</p> <p>(ν y α: son obtenidos de tablas).</p>
8	Coefficiente de convección natural	$\bar{h}_{conv} = \frac{Nu * K}{D}$	<p>K = conductividad térmica del aire $\left[\frac{W}{m * K} \right]$; obtenido de tablas.</p>

El cálculo de las áreas de cada una de las superficies y las longitudes características se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Áreas y longitudes características de las superficies del tanque y las tapas del generador

Área superficie	m²
Cilindro	0,3
Tapas	0,06
Calculados con Solidworks	
Longitud característica(m)	
Cilindro (D)	0,275
Tapas (D/4)	0,06873

Los valores de las resistencias por conducción obtenidas según las formulaciones 1 y 2 de la Tabla 4 para el cilindro y las tapas se resumen en la Tabla 6.

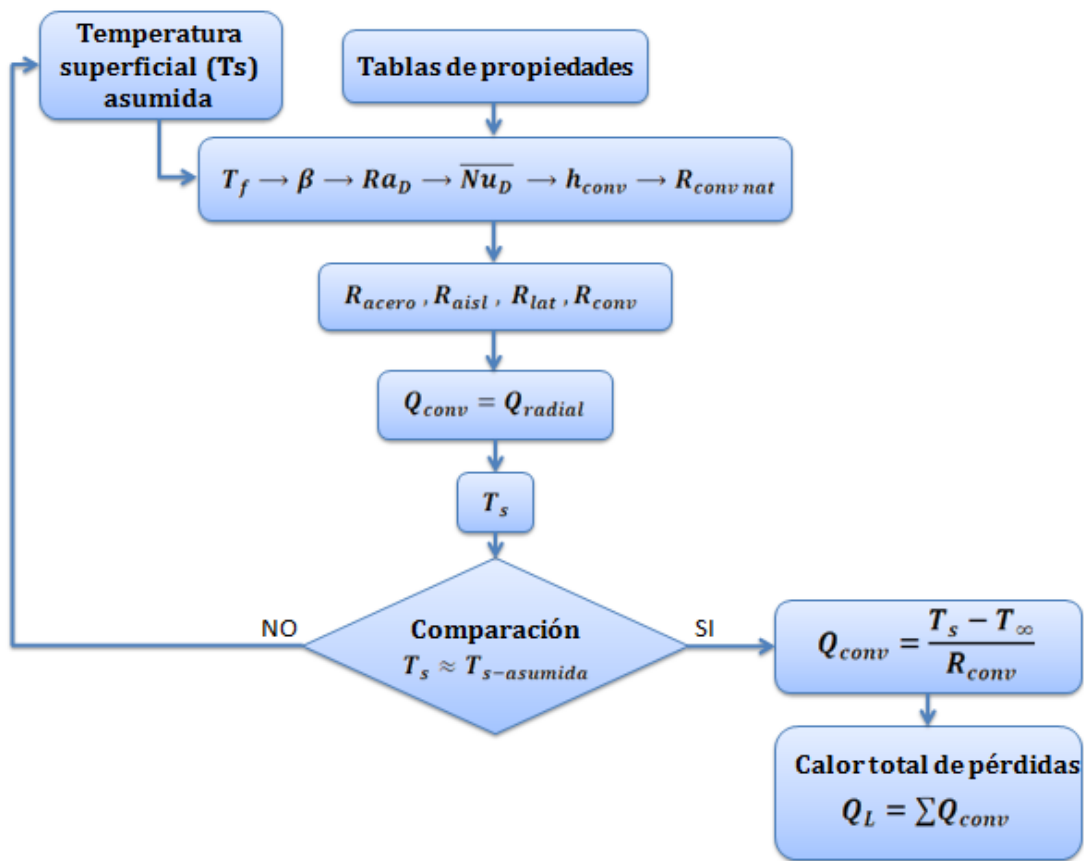
Tabla 6. Resultados de los cálculos de las resistencias por conducción

Resistencia	Valor obtenido (K/W)
Aislante cilindro	2,35
Aislante de la tapa CAP	1,51
Aislante tapa roscada	1,51

Para poder realizar el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección y de las temperaturas superficiales del cilindro y las tapas se realizó el proceso iterativo que se muestra en la Figura 13. Se inicia suponiendo una temperatura superficial, luego se calcula la temperatura fílmica como el promedio entre la temperatura superficial y la del ambiente, con este valor se determinan las propiedades del aire; mediante las fórmulas 4, 5, 7 y 8 de la Tabla 4 se obtiene el coeficiente de convección y realizando la igualación entre la transferencia de calor por convección y conducción se calcula el valor de la temperatura superficial, este procedimiento continua hasta obtener una igualdad entre la temperatura supuesta y la temperatura calculada. Una vez terminado este proceso se halla el calor total de pérdidas y la eficiencia del equipo.

El primer cálculo realizado siguiendo el procedimiento descrito anteriormente fue el del coeficiente de transferencia de calor por convección y el de la temperatura superficial para el cilindro, en este cálculo se necesita el valor del área de la superficie del cilindro que se muestra en la Tabla 5. Los resultados obtenidos iniciando con una temperatura supuesta de 30 °C hasta el valor que genera la igualdad se muestran en la Tabla 7. De la cual podemos concluir que el valor máximo de la temperatura exterior del cilindro (62°C) es aceptable y no causaría quemaduras a los usuarios.

Figura 13. Proceso de iteración para el cálculo de los coeficientes de convección



Debido a que la condición de operación normal del equipo son 100 PSI se realiza nuevamente el procedimiento mostrado anteriormente para poder hacer la comparación con los datos obtenidos durante la prueba de funcionamiento, el

resultado obtenido en este caso se muestra en la Tabla 8. Esto permite concluir que para la condición de operación normal el equipo sin igualmente manejable sin correr el riesgo de quemadura por parte del operario.

Para realizar el cálculo de la temperatura superficial en las tapas laterales del tanque se utilizó la formulación № 6 de la Tabla 4, con este modelo matemático se calcula cuánto debería ser la temperatura superficial para un Nusselt correspondiente al coeficiente de convección que se obtuvo para el caso de los cilindros y de esta forma poder realizar la comparación con los datos obtenidos en la prueba de funcionamiento. El procedimiento consiste en suponer una temperatura superficial, determinar las propiedades del aire a la temperatura fílmica correspondiente y con estos valores hallar el valor del Nusselt, el valor del Rayleigh y de este último realizar el despeje de la temperatura superficial. Este procedimiento se repite hasta el momento en que la temperatura supuesta se hace igual a la temperatura calculada. Los cálculos realizados se muestran en la Tabla 9 para 150 PSI y en la Tabla 10 para el caso de 100 PSI. En este caso se concluye según el cálculo que la temperatura más baja del tanque se encuentra situada en las tapas laterales. Como más adelante se verá, todas las temperaturas calculadas para la presión de 100 psig fueron comparadas con las reales medidas en el equipo y la temperatura calculada para las tapas laterales no es cercana a la real debido causas que se enunciaran posteriormente.

Tabla 7. Resultados del proceso iterativo para el cilindro a 150 PSI

Temperatura exterior del cilindro ($T_{\text{Superficie interior}}=185,5\text{ °C}$)											
$T_{S1}(\text{°C})$ asumida	T_f (K)	$\rho \cdot 10^5$ (m^2/s)	$\alpha \cdot 10^5$ (m^2/s)	Pr	$K \cdot 10^2$ ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	$\beta \cdot 10^3$ (K^{-1})	$Ra_D \cdot 10^{-6}$	\overline{Nu}_D	h_{conv} ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	R_{conv} (K/W)	$T_{S1}(\text{°C})$ Calculada
30	300,5	1,594	2,26	0,707	2,63	3,33	9,33	27,67	2,659	1,253	80,79
80,79	325,9	1,85	2,63	0,703	2,82	3,07	70,9	50,86	5,238	0,636	59,2
59,2	315,1	1,74	2,47	0,705	2,74	3,17	50,86	45,99	4,601	0,725	62,8
62,8	316,9	1,76	2,5	0,705	2,76	3,16	54,73	47,01	4,73	0,705	62,02

Tabla 8. Resultados del proceso iterativo para el cilindro a 100 PSI

Temperatura exterior del cilindro ($T_{\text{Superficie interior}}=170\text{ °C}$) y una temperatura ambiente de 25 °C .											
$T_{S1}\text{ (°C)}$ asumida	T_f (K)	$\vartheta \cdot 10^5$ (m^2/s)	$\alpha \cdot 10^5$ (m^2/s)	Pr	$K \cdot 10^2$ ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	$\beta \cdot 10^3$ (K^{-1})	$Ra_D \cdot 10^{-6}$	\overline{Nu}_D	h_{conv} ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	R_{conv} (K/W)	$T_{S1}\text{ (°C)}$ Calculada
50	310,5	1,695	2,41	0,706	2,71	3,22	39,86	42,71	4,22	0,789	61,47
61	316	1,75	2,49	0,705	2,75	3,16	52,83	46,51	4,665	0,715	58,8
59	315	1,74	2,47	0,705	2,74	3,17	50,64	45,92	4,593	0,725	59,21

Tabla 9. Resultados del proceso iterativo para las tapas a 150 PSI

Temperatura exterior de las tapas ($T_{\text{Superficie interior}}=185,5\text{ °C}$)											
$T_{S1}\text{ (°C)}$ asumida	T_f (K)	$\vartheta \cdot 10^5$ (m^2/s)	$\alpha \cdot 10^5$ (m^2/s)	Pr	$K \cdot 10^2$ ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	$\beta \cdot 10^3$ (K^{-1})	h_{conv} ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	\overline{Nu}_D	$Ra_D \cdot 10^{-6}$	R_{conv} (K/W)	$T_{S1}\text{ (°C)}$ Calculada
60	315,5	1,745	2,48	0,705	2,74	3,17	4,73	11,78	0,27	3,52	36,6
36,6	303,8	1,627	2,31	0,706	2,66	3,29	4,73	12,22	0,312	3,52	36,2
36,2	303,6	1,625	2,3	0,706	2,66	3,29	4,73	12,22	0,312	3,52	36,12

Tabla 10. Resultados del proceso iterativo para las tapas a 100 PSI

Temperatura exterior de las tapas ($T_{\text{Superficie interior}}=170\text{ °C}$) y una temperatura ambiente de 25 °C .											
$T_{S1}\text{ (°C)}$ asumida	T_f (K)	$\vartheta \cdot 10^5$ (m^2/s)	$\alpha \cdot 10^5$ (m^2/s)	Pr	$K \cdot 10^2$ ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	$\beta \cdot 10^3$ (K^{-1})	$Ra_D \cdot 10^{-6}$	\overline{Nu}_D	h_{conv} ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	R_{conv} (K/W)	$T_{S1}\text{ (°C)}$ Calculada
50	310,5	1,695	2,41	0,706	2,71	3,22	0,258	11,648	4,593	3,63	27,28
27	299	1,58	2,24	0,707	2,62	3,34	0,295	12,05	4,593	3,63	26,82

El resumen de los resultados obtenidos para el cilindro y las tapas se puede ver en la Tabla 11.

Tabla 11. Resumen valores de temperatura y resistencias de convección para el cilindro y las tapas.

Temperatura	Cálculo (°C) a 150 PSI	R_{conv} (K/W) a 150 PSI	Cálculo (°C) a 100 PSI	R_{conv} (K/W) a 100 PSI
Cilindro	62,02	0,705	59,21	0,725
Tapas	36,12	3,52	26,82	3,63

Conocidas las temperaturas exteriores de cada una de las paredes externas del generador se calcula el calor de pérdidas totales así:

Cálculo para la presión de 150 PSI

$$Q_L = Q_{radial} + Q_{tapa - roscada} + Q_{brida - blind}$$

$$Q_{radial} = Q_{conv} = \frac{62,02 - 25}{0,705} = 52,51 W$$

$$Q_{tapa - roscada} = Q_{conv} * = Q_{brida - blind} = Q_{conv} ** = \frac{36,12 - 25}{3,52} = 3,16 W$$

$$Q_L = 52,51 + 3,16 + 3,16 = 58,83 W$$

El calor aprovechado por el agua (calor útil Q_U) para calentamiento es:

$$Q_U = Q - Q_L$$

$Q_U =$ Calor aprovechado para el calentamiento(W).

$Q =$ potencia entregada por las resistencia electricas (W).

$Q_L =$ Calor de pérdidas (W).

Reemplazando:

$$Q_U = 2000 - 58,83 = 1941,17 W$$

Ahora se calcula el rendimiento térmico del equipo según:

$$\eta = \frac{Q_U}{Q}$$

$$\eta = \frac{1941,17}{2000} * 100 = 97\%$$

Como se observa el rendimiento del generador es bastante alto (97%) lo que indica que el espesor y el material aislante son adecuados para la aplicación.

3. PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL GENERADOR DE VAPOR.

El proceso de construcción lo realizó MULTISERVICIOS INDUSTRIALES, empresa con experiencia en la construcción de equipos industriales. Para la construcción del equipo se tuvieron en cuenta las recomendaciones realizadas por la empresa y el interventor de la Universidad Industrial de Santander.

3.1 TANQUE DE PRESIÓN

El tanque de presión del generador consta principalmente de tres elementos:

3.1.1 Tanque cilíndrico. El tanque fue construido a partir de un tubo de 8 pulgadas cedula 40 con una longitud de 30 cm al que se le realizó un proceso de taladrado de los agujeros en los que se insertaron uniones half coupling de un cuarto de pulgada (1/4") llevando a cabo posteriormente el proceso de soldadura de las mismas al tanque, en estas uniones se encuentran las conexiones de los siguientes accesorios:

- ✚ Válvula de salida de vapor.
- ✚ Termopares (vapor y agua).
- ✚ Tee para el manómetro y válvula de seguridad.
- ✚ Sensor de presión.
- ✚ Visor de nivel.
- ✚ Válvula de agua de reposición.
- ✚ Válvula de purga.

Al tanque cilíndrico se le practicó un proceso de torneado como el que se muestra en la Figura 14 donde se mecanizó una rosca cuadrada macho en el extremo del tubo en la que va a estar roscada una de las tapas del tanque.

Figura 14. Proceso de torneado del tanque cilíndrico



En la Figura 15 puede observarse el tanque del generador con las uniones half coupling soldadas y la rosca cuadrada terminadas.

Figura 15. Tanque generador de vapor terminado



3.2 TAPA ROSCADA

La tapa roscada que puede verse en la Figura 16, fue obtenida a partir de un disco de acero al que se le practicó un proceso de torneado para dar forma y otro para crear la rosca cuadrada hembra. Posteriormente se llevó a cabo el proceso

de soldadura de una tuerca hexagonal para su apriete que puede observarse en la Figura 17 y finalmente se taladraron dos agujeros para la instalación y soldadura de dos half coupling de una pulgada (1") como los que se observan en la Figura 18, en los que se instalaron las dos resistencias eléctricas de calentamiento que están provistas de una conexión NPT de una pulgada (1").

Figura 16. Tapa roscada

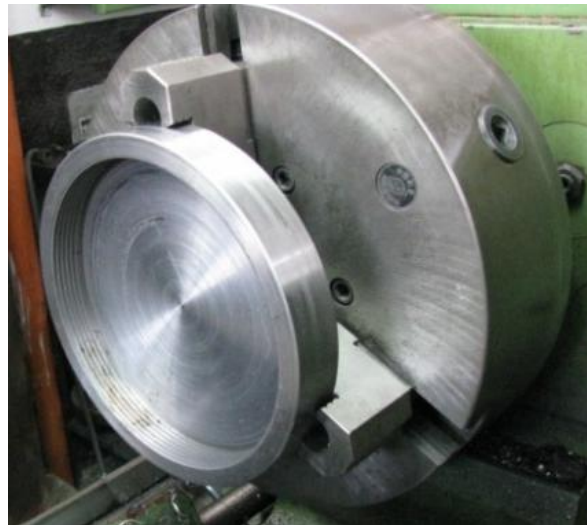


Figura 17. Tuerca hexagonal soldada

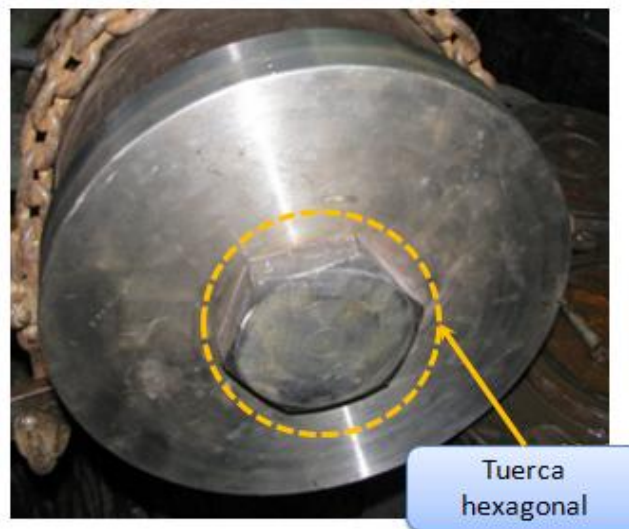
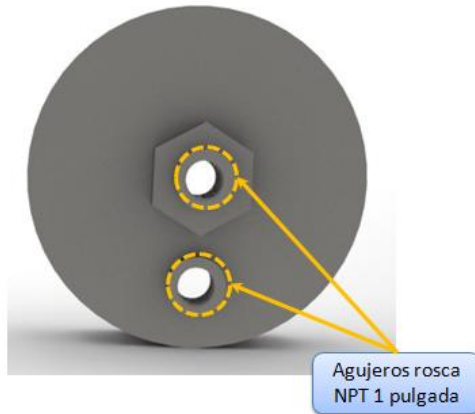


Figura 18. Agujeros y half coupling NPT de una pulgada



3.3 TAPA CAP

La tapa CAP se compró ya fabricada y lo que se realizó fue un proceso de soldadura entre la tapa y el tanque cilíndrico, posteriormente se realizó el pulido de la superficie para lograr un buen acabado del tanque, lo enunciado anteriormente puede verse en la Figura 19.

Figura 19. Tapa CAP y tanque soldados



3.4 PRUEBA HIDROSTÁTICA

Una vez construido el tanque del generador se realizó la prueba hidrostática sometiendo el recipiente a la presión de 300 psi como se muestra en la Figura 20, que es mayor a la presión de prueba que se calculó en el capítulo 1 bajo recomendación de la norma ASME, el resultado de esta prueba confirma la resistencia del recipiente, mostrando la confiabilidad del mismo ante la presión máxima a la que se encontrará sometido.

Figura 20. Prueba hidrostática



3.5 ENVOLTORIO

El envoltorio fue fabricado de una lámina de acero calibre 16 cortada con equipo de plasma para establecer las medidas adecuadas, luego se llevó a cabo un proceso de rolado para darle la forma cilíndrica del tanque, y mediante un cordón de soldadura (sentido longitudinal) se obtuvo el envoltorio cilíndrico que sirve como contenedor del aislante, de la misma forma se construye la tapa en lámina

del mismo calibre y material. Luego se realizó el procedimiento de marcado de puntos para realizar los respectivos taladros por donde pasan las uniones hembra-hembra para las conexiones de todos los accesorios del generador.

El procedimiento siguiente consiste en aislar el tanque con la manta de perlita y fijarla por medio del envoltorio cilíndrico, en este procedimiento debe tenerse especial cuidado puesto debe lograrse total coincidencia entre los agujeros del tanque y los del envoltorio.

3.6 TAPA AISLADA REMOVIBLE

La tapa aislada se construyó en lámina calibre 16 con procesos iguales que los del envoltorio, un rolado para darle forma y soldadura para la tapa. Además posee unas tapas de menor tamaño que tienen la función de ocultar y no dejar expuestos los bornes de las resistencias eléctricas.

Una vez construida esta tapa fue rellena con aislante térmico para finalmente soldar a ella dos platinas con tornillo y mariposa como el de la Figura 21, para el sistema de sujeción con el envoltorio.

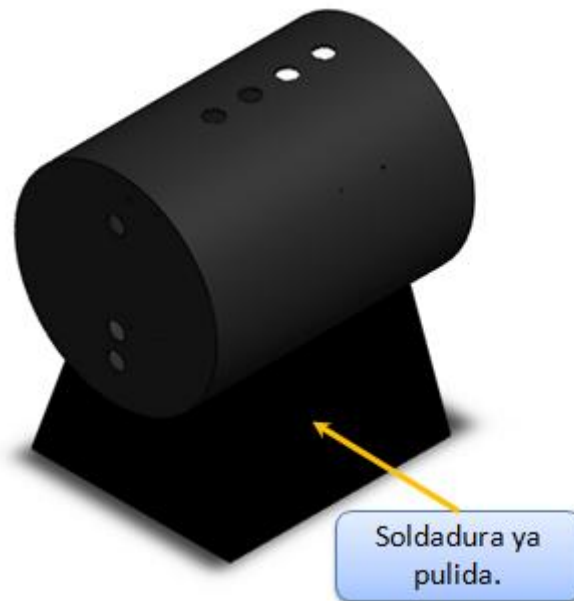
Figura 21. Sistema de sujeción entre la tapa removible y el envoltorio



3.7 BASE DE SOPORTE DEL TANQUE

Para poder soportar todos los componentes del tanque se construyó una base en ángulo soldada al envoltorio, como se muestra en la Figura 22 fabricada en lámina calibre 16 con un proceso de doblado para darle forma y finalmente un proceso de soldadura para unirla al envoltorio.

Figura 22. Base y envoltorio del generador



3.8 PLANOS DEL GENERADOR DE VAPOR

Los planos del generador de vapor se realizaron en Solidworks y se adjuntan al libro como archivos en PDF. Debido a que el tamaño de las hojas utilizadas no permite mostrarlas como figuras. En la Tabla 12, se consigna una breve descripción de lo que se encuentra en los planos y se incluyen los enlaces para su visualización.

Los planos se dividen principalmente en planos de ensamble total del equipo, planos de ensamble por módulos y planos de medidas de las piezas construidas.

Tabla 12. Descripción de los planos de construcción y ensamble del equipo

Nº de hoja	(Nombre hoja) Link de Anexo en PDF	Descripción del plano.
1	Listas de piezas	Contiene las tablas que enuncian cada componente, con su respectivo código de ensamblaje, nombre, referencia comercial, cantidad y material.
2	Generador de vapor	Se muestra el ensamblaje total del equipo con su vista isométrica y vistas principales.
3	Sub-ensamblajes	Muestra el dibujo en explosión del equipo pero en sus sub-ensamblajes.
4	Cuerpo del tanque	Muestra vista isométrica del sub-ensamblaje del tanque y el dibujo explosionado del mismo.
5	G1-01, G1-02	Contiene las vistas isométricas y principales del tanque y aislamiento del tanque.
6	G1-03, G1-04	Contiene las vistas isométricas y principales del envoltorio del tanque y tapa roscada.
7	G1-05, G1-06, G1-07	Contiene las vistas isométricas y principales de la resistencia eléctrica, envoltorio de la tapa y aislante de la tapa.
8	G1-09-base	Contiene las vistas isométricas y principales de la base del generador.
9	G2-01, G2-02, G2-03	Muestra la vista en explosión del sistema de sujeción entre envoltorios, también las vistas isométricas y principales de la platina de sujeción, envoltorio de la tapa, la platina de sujeción del envoltorio y tornillo.
10	Sub-ensamblaje de accesorios	Vista isométrica y en explosión del ensamblaje de los accesorios.
11	G3-07-uniión	Isométrica y vistas principales de la unión de teflón.
12	Sub-ensamblaje del motor	Vista isométrica y en explosión del sub-ensamblaje del motor con la válvula milimétrica.
13	G4-01, G4-02, G4-07, G4-08	Isométrica y vistas principales de la platina, placa, sujetador del motor y el apoyo del motor.
14	G4-10, G4-14, G4-15, G4-16	Isométrica y vistas principales de la corredera deslizante, apoyo de la válvula, tornillo en u y tubería.

Tabla 12. (Continuación)

15	<u>Sub-ensamblaje visor de nivel</u>	Vista isométrica y en explosión del visor de nivel.
16	<u>G5-01, G5-04, G5-17, G5-27</u>	Isométrica y vistas principales de la platina superior del nivel, vidrio nivel, varilla roscada y varilla rosca interna.
17	<u>G5-19, G5-22, G5-27</u>	Isométrica y vistas principales de la platina superior dos del nivel, platina inferior del nivel y platina deslizante.
18	<u>Sub-ensamblaje caja de control</u>	Isométrica, vista explosionada y vistas principales de la caja de control.
19	<u>G6-01, G6-02</u>	Isométrica y vistas principales de la caja de control y la platina de la base para la caja de control.

4. SISTEMAS BÁSICOS Y MÓDULOS DE CONTROL DEL GENERADOR DE VAPOR.

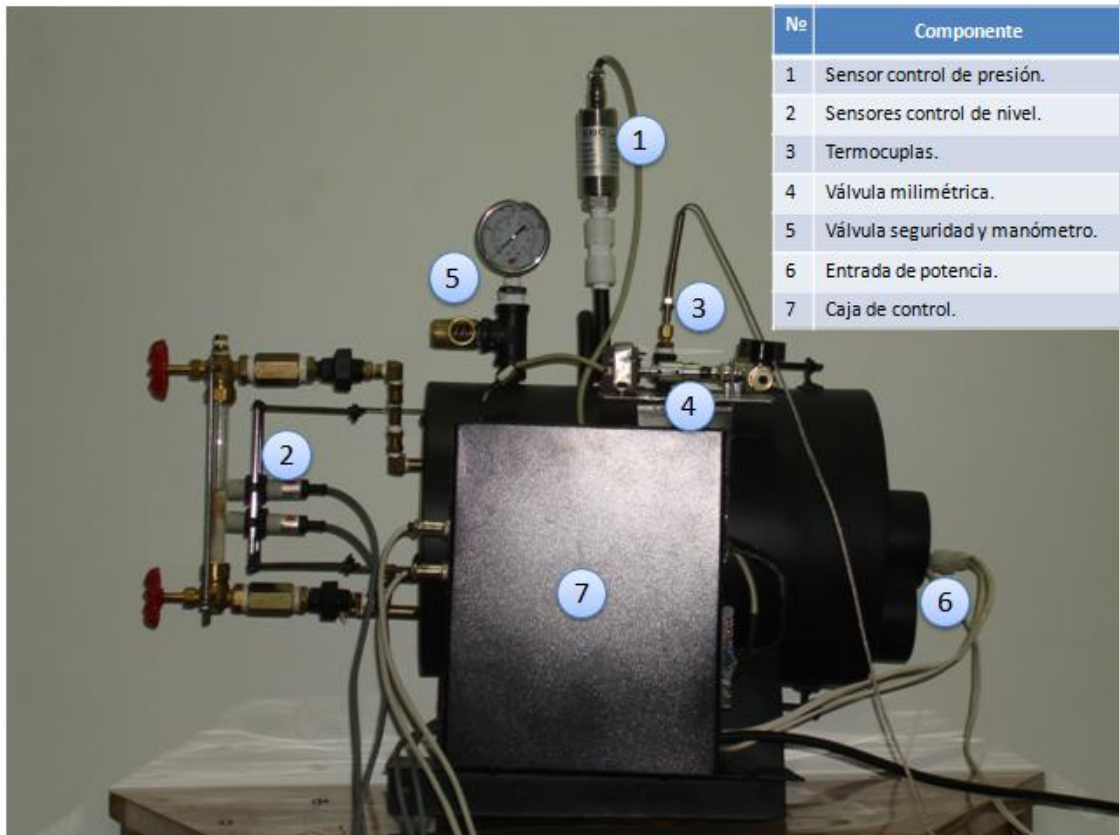
Antes de realizar la descripción de cada uno de los componentes y módulos de control del generador de vapor es necesario realizar una descripción completa del equipo.

El funcionamiento del equipo inicia al ejecutar la aplicación en LabVIEW, que sugerirá al usuario verificar que todas las válvulas del equipo se encuentran cerradas, seguido de esto se inicia el proceso de llenado del tanque con la bomba de desplazamiento positivo, para lo cual se activa una electroválvula que se encuentra en el equipo de desplazamiento radial o de forma manual por el tapón ubicado en la T del manómetro, durante el llenado el software indicará en qué momento se alcanza el nivel mínimo y máximo. Al alcanzarse el nivel máximo el programa indica que se debe cerrar el punto de llenado y pedirá al usuario que se ingresen los datos de operación del equipo, entre los que se encuentra la presión, el flujo, el diferencial de presión del medio poroso y el modo de operación del equipo que corresponde al de utilizar o no bomba de reposición de agua. Una vez se ingresan los datos de operación el programa inicia el proceso de calentamiento enviando una señal de activación al regulador de potencia para suministrar calor al agua por medio de las dos resistencias de 1000 vatios y al tiempo se inicia la adquisición de los datos de presión, temperatura y nivel. En esta etapa el software se encarga de monitorear la presión hasta alcanzar el 90 % de la presión de operación, momento en el que se encuentran las resistencias a máxima potencia, al alcanzarse el 90% de la presión de operación el programa inicia el controlador PID que se encargará de alcanzar la presión evitando que se sobrepase el valor establecido, durante todo este proceso de calentamiento el programa monitorea y muestra en pantalla la temperatura, la presión y el cálculo de flujo de vapor equivalente a el flujo de agua suministrado por el usuario en los datos de operación, es de resaltar que en este proceso el equipo no permite que se realice

apertura de la válvula de salida de vapor hasta no alcanzar el punto de operación deseado. Una vez se llega al punto de operación se habilitan los botones de inicio y parada de inyección que permitirán al usuario abrir la válvula milimétrica que realiza la graduación del caudal y la apertura de la electroválvula de la salida de vapor o poner en modo de espera el equipo. El generador se encarga de mantener la presión de operación por medio del control PID. Para el control de nivel se realiza un monitoreo del máximo y mínimo con los sensores capacitivos indicando en pantalla en qué estado se encuentra el equipo teniendo en cuenta que cuando los dos sensores se encuentran activados el nivel es el óptimo, una vez se apaga el nivel máximo el software indicará que el nivel está disminuyendo hasta alcanzar el nivel mínimo momento en el que se encenderá un indicador de nivel crítico, este indicador procede a realizar dos posibles acciones, la primera corresponde a que se esté utilizando bomba de reposición de agua, en donde se activa la válvula ON/OFF permitiendo el paso de agua hasta alcanzar nuevamente el nivel óptimo de operación, la segunda acción es la de apagar el sistema desactivando tanto la electroválvula de salida de vapor como cerrando la válvula milimétrica. Por seguridad el sistema cuenta con una válvula de alivio tarada a 170 Psi pero también tiene programada una protección por software que realizará el apagado del equipo en los casos en que se presente una falla en el sensor de presión, esta opción se encuentra programada al detectar un voltaje máximo de cinco voltios en la señal medida del sensor puesto que cuando marca este voltajes el sensor estará dañado, para dar una mayor confiabilidad al equipo se cuenta con un manómetro como indicador visual para que el operario compare la medida de presión que se está sensando. Una vez terminada la inyección de vapor y se realice el apagado del equipo, el operario debe realizar el proceso de vaciado del tanque por medio de la válvula manual que se encuentra ubicada en la parte inferior del tanque, este proceso debe realizarse de forma gradual sin llegar a abrir abruptamente la válvula puesto que la alta presión almacenada podría ocasionar daños.

El control del generador de vapor se realizó en labview utilizando una tarjeta de adquisición de datos y un bloque distribuidor de conexiones de National Instruments. Los sensores y actuadores se conectan mediante circuitos electrónicos acopladores de señal que comunican y protegen los puertos de entrada y salida de las respectivas tarjetas; en la Figura 23 se muestra un esquema general de los componentes del sistema. A continuación se explican las características de cada uno de los componentes que integran el equipo, tanto sensores, como actuadores, circuitos de acople, elementos de seguridad y los respectivos lazos de control.

Figura 23. Esquema general de los componentes del equipo



De forma general el equipo está compuesto por dos lazos de control, uno para la presión y el otro para el nivel, un módulo de graduación de flujo de vapor y un módulo de medición de temperatura.

Además de los dispositivos utilizados en los lazos de control el equipo cuenta con:

- ✚ Bomba de desplazamiento positivo.
- ✚ Una válvula de suministro del agua de reposición.
- ✚ Un manómetro, para visualizar la presión interna del tanque.
- ✚ Una válvula de seguridad.
- ✚ Una válvula manual para asegurar el cierre de la salida de vapor.
- ✚ Una válvula manual para el drenaje o vaciado del equipo.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

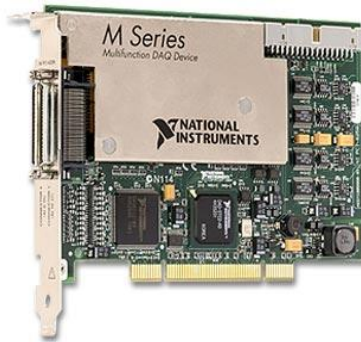
4.1.1 Tarjeta NI PCI 6259. La tarjeta de adquisición de datos de National Instruments de 16 bits, cuenta con una velocidad de muestreo de 1 MS/s, posee 32 entradas analógicas, cuatro salidas analógicas de 16 bits, 48 E/S digitales y contadores de 32 bits. Esta tarjeta tiene un certificado de calibración trazable expedido por el NIST⁷. Debido a la tecnología de calibración NI-Mcal⁸ que tienen integrada proporcionan una mayor precisión, resolución y sensibilidad; pertenecen a la serie M que corresponde a tarjetas de alta precisión. El software controlador

⁷ Instituto Nacional de Normas y Tecnología, fundado en 1901, es un organismo federal no regulador que forma parte de la Administración de Tecnología del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (United States Department of Commerce Technology Administration). La misión del NIST consiste en elaborar y promover patrones de medición, normas y tecnología con el fin de realzar la productividad, facilitar el comercio y mejorar la calidad de vida.

⁸ Es un algoritmo de calibración basado en software que genera un polinomio de tercer orden para corregir las tres fuentes de error de medición de tensión - desplazamiento, la ganancia y no linealidad.

está incluido en los paquetes NI-DAQmx y tanto el procesamiento como el registro de datos se realiza en Labview. En la Figura 24 puede verse la tarjeta utilizada.

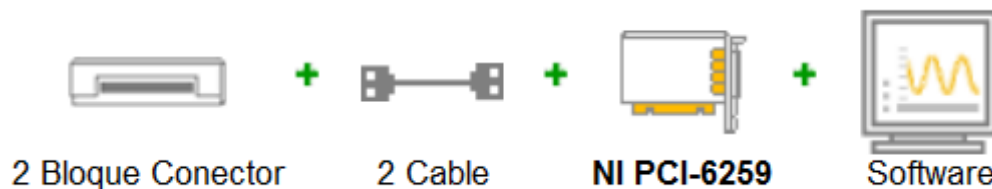
Figura 24. Tarjeta NI PCI 6259 de National Instruments



Fuente: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/14128>

La tarjeta es conectada al puerto PCI del PC y mediante un cable de comunicación se realiza la transferencia de datos con el distribuidor de puertos. En la Figura 25 puede verse el esquema de componentes necesarios para la implementación de la tarjeta.

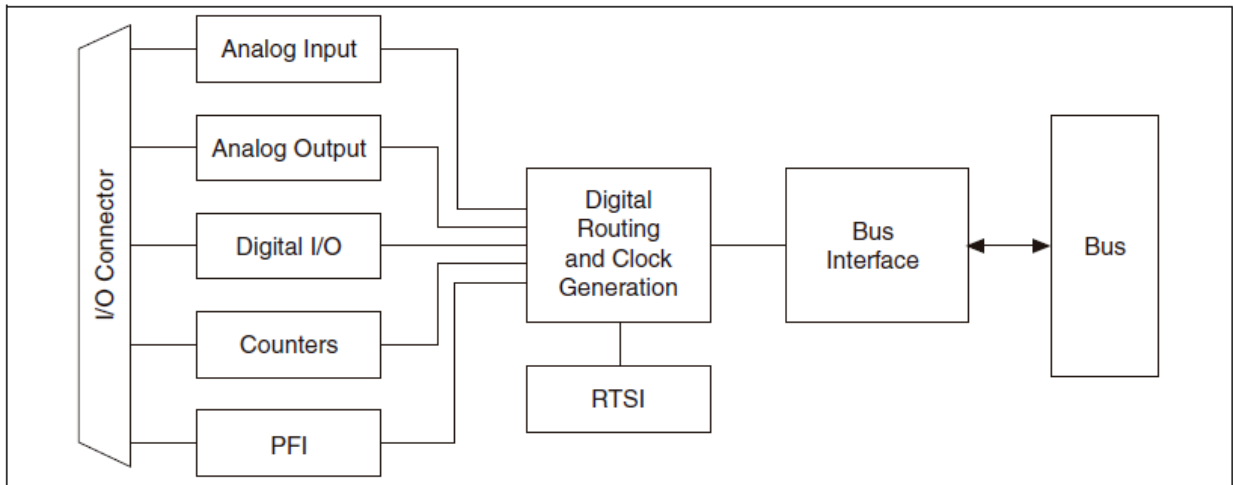
Figura 25. Componentes de instalación tarjetas National Instruments



Fuente: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/14128>

En la Figura 26, se muestra el diagrama de bloques de los diferentes tipos de puertos que posee la tarjeta de adquisición de datos.

Figura 26. Esquema general tarjeta de adquisición de datos



Fuente: Catalogo DAQ M series, capítulo 2 página 2-1.

Las características de cada uno de los tipos de puertos se describen a continuación.

Puertos de entrada analógica: Poseen un rango programable para la medición de las señales como se indica en la Tabla 13, esto permite ajustar la medición en el mejor rango según el nivel que proporcionen los diferentes sensores, para la medición de la señal del sensor de presión se utilizó el rango entre -5 V a 5 V, dando una resolución de 160 μ V, pero en la configuración realizada mediante el software se estableció un rango de operación de 0 a 5 V.

Puerto de salida analógica: Permite generar señales analógicas en dos rangos de operación comprendidos entre ± 5 V y ± 10 V, según sea el requerimiento. Para el control del módulo de potencia el acople se realizó con el rango de ± 5 V, en el que solo se utilizan señales de cero a cinco voltios debido a la restricción del controlador de potencia y porque estos límites fueron los fijados en control PID.

Tabla 13. Voltajes manejados por la tarjeta de adquisición de datos.

Rango de la entrada analógica	Resolución nominal asumiendo un 5% de error en todo el rango
-10 V a 10 V	320 μ V
-5 V a 5 V	160 μV
-2 V a 2 V	64 μ V
-1 V a 1 V	32 μ V
-500 mV a 500 mV	16 μ V
-200 mV a 200 mV	6,4 μ V
-100 mV a 100 mV	3,2 μ V

Fuente: Catalogo DAQ M series, capítulo 4 página 4-3.

Puertos I/O digitales: El nivel de operación de estos puertos es de cero a cinco voltios tanto para su funcionamiento de entrada como el de salida.

4.1.2 Tarjeta NI SCB-68. La tarjeta es básicamente un circuito de distribución de señales de entrada y salida es utilizado con tarjetas DAQ de 68 pines, tiene terminales de tornillo para facilitar las conexiones, posee un sensor de compensación de unión fría interno para el uso de termopares, posee filtros RC pasa bajas y dispositivos de detección de fallo o ruptura de los medidores. En la Figura 27 puede verse el bloque de distribución.

Figura 27. Tarjeta electrónica de distribución de puertos



4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES Y COMPONENTES DEL GENERADOR DE VAPOR.

4.2.1 Sensor de presión. El transductor de presión (EBC PT124B-210) que puede verse en la Figura 28 suministrado para la aplicación es de gama industrial, funciona con voltajes de alimentación en un rango de 10 a 40 voltios DC, siendo el valor recomendado el de 24 Voltios. Este dispositivo tiene las siguientes características técnicas:

- ✚ Salida de corriente de 4 a 20 mA, configurable mediante resistencia de carga a salidas de 0 a 5 voltios ó de 0 a 10 voltios.
- ✚ Ajuste de cero y span, que permiten fijar el voltaje máximo de operación del dispositivo.
- ✚ Temperatura de operación entre -40 °C a 125 °C.
- ✚ Conector eléctrico M12 de cinco pines.
- ✚ Conexión mecánica mediante rosca NPT de ¼ de pulgada.

Para ver más información sobre el sensor de presión ver ANEXO D.

Figura 28. Sensor presión



Fuente:

http://www.sinosensor.com/en/products_text1.asp?ProSysCode=PT1651496647

4.2.2 Sensor de nivel. Para hacer el control de nivel se seleccionaron dos sensores capacitivos referencia CA18CLF08NA, que permiten fijar un nivel máximo y uno mínimo al detectar el líquido en un visor de vidrio o mirilla externa montada al tanque del generador de vapor como se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Visor de nivel y Sensor capacitivo



Los detectores de nivel presentan las siguientes características técnicas:

- ✚ Interruptor de proximidad capacitivo con distancia de proximidad graduable hasta 8 mm.
- ✚ Funcionamiento en estado de reposo normalmente cerrado (NC).
- ✚ Cuerpo del sensor en poliéster con PVC, 2 m de cable y conector M12.
- ✚ Distancia de detección ajustable de 3 a 8 mm.
- ✚ Alta inmunidad a ruido.
- ✚ Voltaje de alimentación de 10 a 40 voltios de DC.
- ✚ Salida de 200mA tipo NPN o PNP.
- ✚ Histéresis del 4% al 20% de la distancia de detección.
- ✚ Frecuencia de operación 30 Hz.
- ✚ Temperatura de operación entre -25 °C a 80 °C.

Para ver más información acerca de los sensores de nivel ver ANEXO E.

4.2.3 Termopares. Para la medición de temperatura se seleccionaron termopares tipo J fabricadas con un alambre de hierro y otro de constantán (aleación de cobre y níquel), para la aplicación el encapsulado de la termocupla es un tubo de acero inoxidable como el mostrado en la Figura 30, su rango de operación se encuentra entre (-180 a 750) °C, pero el rango en el que operan está entre temperatura ambiente y un máximo de 200 °C, el acoplamiento y acondicionamiento de señal es realizado por el bloque conector NI SCB-68.

Figura 30. Termopares



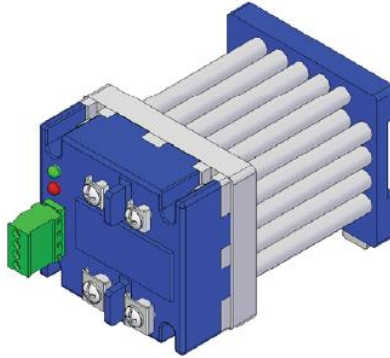
4.2.4 Controlador de ángulo de fase digital. Se seleccionó el controlador de potencia Optec OPI48P40G diseñado por medio de tiristores, etapas de detección de cruce por cero para sincronizar la señal de control con la señal de la red eléctrica de 220 voltios, conversores de control analógico a digital para la comunicación con las tarjetas de adquisición de datos y componentes de protección integrados. El dispositivo permite facilidad en el montaje, estabilidad en el control de potencia, y una adecuada implementación de la aplicación, son especiales para el control de resistencias eléctricas. En la Figura 31 se muestra el controlador de potencia y a continuación se enuncian algunas características técnicas del componente:

✚ Es un controlador de ángulo de fase microcontrolado.

- ✚ Permite señales de control por voltaje de (0-5 voltios ó 0-10 voltios).
- ✚ Maneja corrientes de hasta 40 Amperios y voltajes de línea de hasta 500 voltios de alterna.

Para ver más información acerca del controlador ver ANEXO F.

Figura 31. Controlador de ángulo de fase digital



Fuente: <http://www.optecpower.com/Download/ManualOPTEC.pdf>, pag. 40.

4.2.5 Resistencias eléctricas. Las resistencias eléctricas seleccionadas según el diseño termodinámico corresponden a dos resistencias que suministran cada una potencia de 1000 vatios, estas resistencias son fijadas a la tapa mediante un sistema de rosca NPT de una pulgada, la conexión eléctrica de alimentación es de 220 VAC, este voltaje de alimentación se varía de forma controlada mediante el módulo de potencia. En la Figura 32 se muestra el modelo de las resistencias eléctricas seleccionadas.

Figura 32. Resistencias electricas



4.2.6 Válvula milimétrica. Para la regulación del flujo de vapor Multiservicios Industriales (empresa que fabricó el equipo) proporcionó una válvula milimétrica manual de un cuarto de pulgada (1/4") referencia 1315G4Y de la empresa HOKE como la mostrada en la Figura 33. Esta válvula es utilizada en medición fina en análisis médicos o bioquímicos de gases o vapores. Para poder realizar el control automático sobre la válvula se implementó un acople mecánico deslizante que la une con un motor paso a paso manejado por 5 salidas digitales de la tarjeta NI PCI 6259 y una tarjeta electrónica de potencia.

Las características técnicas de la válvula son:

- ✚ Cuerpo en acero inoxidable 316.
- ✚ Presión de operación 5000 Psi.
- ✚ Temperatura de operación de -54 °C a 232 °C.
- ✚ Vástago de 3°.
- ✚ Vástago con 18 vueltas de desplazamiento.
- ✚ Baja histéresis.
- ✚ Coeficiente Cv del orificio 0,024 con una apertura máxima de 1,19 mm (0,047 pulgadas).
- ✚ Rosca NPT especial.

Para ver más información a cerca de la válvula milimétrica ver ANEXO G.

Figura 33. Válvula milimétrica



Fuente: <http://catalog.hoke.com/viewitems/metering-valves/milli-mite-1300-series?>

4.2.7 Motor paso a paso. El motor paso a paso unipolar utilizado para controlar la apertura de la válvula milimétrica, funciona con un voltaje de alimentación de 12 voltios DC y permite un control de posición de $1,6^\circ$ por paso. El control de potencia se realiza mediante un puente H L293D que para su funcionamiento requiere de cinco puertos digitales de control. En la Figura 34 se muestra el motor utilizado.

Figura 34. Motor paso a paso



4.2.8 Fuente de alimentación de 24 voltios DC. Se seleccionó una fuente switchcada de 24 voltios DC, con conexión de 120 VAC como la mostrada en la Figura 35, esta fuente maneja 10 amperios y un consumo de 250 W, siendo la encargada de proporcionar la alimentación a todos los sensores, módulo de manejo de potencia y motor paso a paso.

Figura 35. Fuente de alimentación



Fuente: Catalogo electrónicas DC.

4.2.9 Bomba de desplazamiento positivo. Este equipo maneja flujos máximos de 10 cc/min de aceite mineral y una presión máxima de operación de 5000 PSI, el flujo de aceite es convertido a flujo de agua por medio de un cilindro pistón como

el mostrado en la Figura 36 que tiene una capacidad de almacenamiento de 3,5 litros.

La bomba sólo es utilizada cuando se requiere que el generador realice pruebas prolongadas de inyección de vapor, puesto que para pruebas cortas de hasta 6 horas este puede operar con el rango permitido por los sensores de nivel. En la Figura 37 se puede ver la bomba disponible.

Figura 36. Cilindro de desplazamiento aceite-agua



Figura 37. Bomba de desplazamiento positivo



4.2.10 Válvula ON/OFF de inyección de agua de reposición y salida de vapor.

Para el control del suministro del agua de reposición y la salida de vapor se implementaron dos electroválvulas servo-accionadas referencia EV215B, estas válvulas poseen las siguientes características:

- ✚ Válvula de accionamiento directo de 2/2 vías.

- ✚ Temperatura de operación máxima de 185 °C.
- ✚ Especial para usos severos y aplicaciones de flujo de vapor.
- ✚ Cuerpo de acero inoxidable AISI 316L.
- ✚ Bobina de accionamiento de 220 VAC.
- ✚ Funcionamiento normalmente cerrado.

Para ver más información a cerca de la válvula ver ANEXO H.

En la Figura 38 se presentan las válvulas ON/OFF utilizadas.

Figura 38. Válvulas servo-accionadas



Fuente: <http://www.importadoraindustrial.com/EV225Bvapor.pdf>

4.2.11 Válvula de seguridad. La válvula de seguridad suministrada para la aplicación se encuentra tarada a 170 PSI, cumple la función de proteger el equipo en los casos críticos que el control límite de presión realizado mediante software falle o en el evento en que se presente una falla en el sensor de presión. En la Figura 39 puede verse la válvula utilizada.

Figura 39. Válvulas de seguridad



4.2.12 Válvula manual de cierre de salida de vapor. Para dar mayor seguridad al equipo se instaló la válvula de cierre manual mostrada en la Figura 40, su diámetro es de ¼ de pulgada y se encuentra conectada entre la válvula milimétrica de graduación de caudal y la válvula ON/OFF que permite el flujo de vapor.

Figura 40. Válvula manual



4.2.13 Válvula de drenaje o vaciado del tanque. La válvula utilizada para el drenaje del agua del tanque es una válvula globo de ¼ de pulgada con ángulo de cierre de 90° como la mostrada en la Figura 41, esta válvula permite descargar el tanque una vez se ha terminado la operación de inyección de vapor.

Figura 41. Válvulas globo para el vaciado del tanque



4.2.14 Manómetro. El manómetro seleccionado tiene un rango de medición de 200 PSI con baño en glicerina, como el mostrado en la Figura 42. El dispositivo cumple la función de visualización para que el operario compare la medida de este

dispositivo con la realizada por el módulo de control y adquisición de datos del equipo.

Figura 42. Manómetro



4.3 LAZOS Y MÓDULOS DE CONTROL

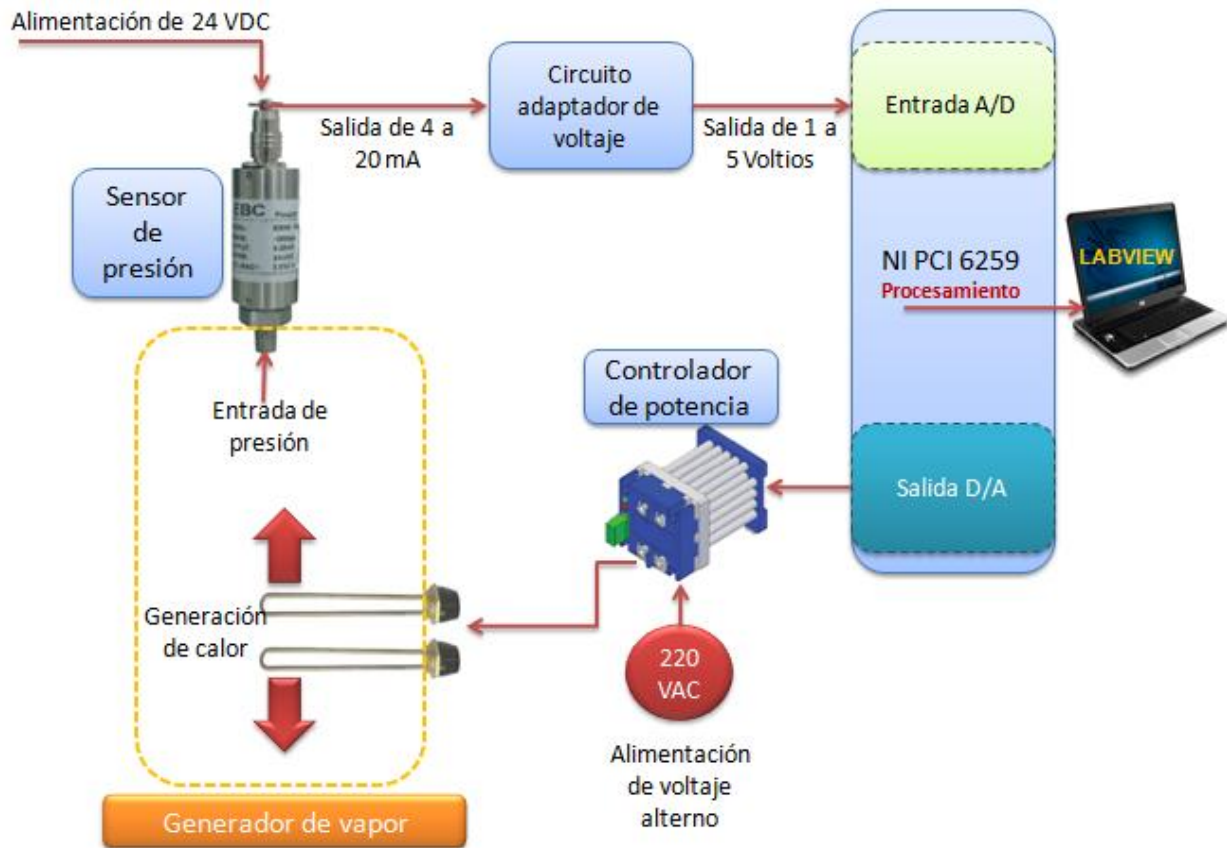
4.3.1 Lazo de control de presión. Es el encargado de mantener la presión del sistema, para realizar esta operación cuenta con:

- ✚ Sensor de presión PT124B-210.
- ✚ Tarjeta de acoplamiento de señal del sensor de presión.
- ✚ Controlador de ángulo de fase digital OPS48P40G de OPTEC.
- ✚ Dos resistencias eléctricas de 1000 vatios.

En la Figura 43 se muestra un esquema general del módulo de control de presión.

Como puede observarse en la Figura 43, la señal de presión sensada es procesada por el PID que se encarga controlar la potencia de las resistencias eléctricas.

Figura 43. Lazo de control de presión



Para lograr el adecuado funcionamiento del sensor de presión se implementó un tubo sifón en R o comúnmente llamado cola de marrano adaptado con un acople fabricado en teflón como se ilustra en la Figura 44 con el objetivo de disminuir la temperatura que llega al sensor y no superar su condición de operación máxima de 125 °C. En segundo lugar se adaptó la señal de corriente del transductor mediante una resistencia electrónica de 240 ohmios produciendo la salida de voltaje de uno a cinco voltios, esta conversión de señales está acompañada de un diodo zener y una resistencia adicional de protección contra posibles sobre voltajes que podrían generar fallas sobre las tarjetas National Instruments. Ver la Figura 45 que ilustra las conexiones realizadas.

Figura 44. Instalación mecánica del sensor de presión

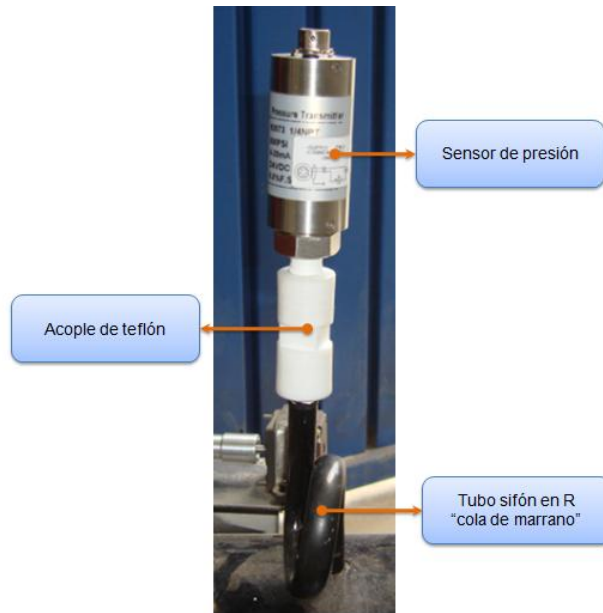
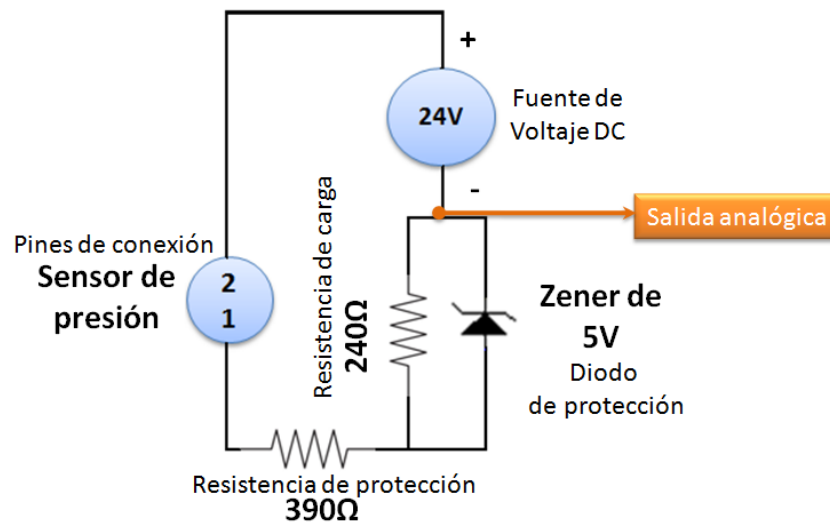
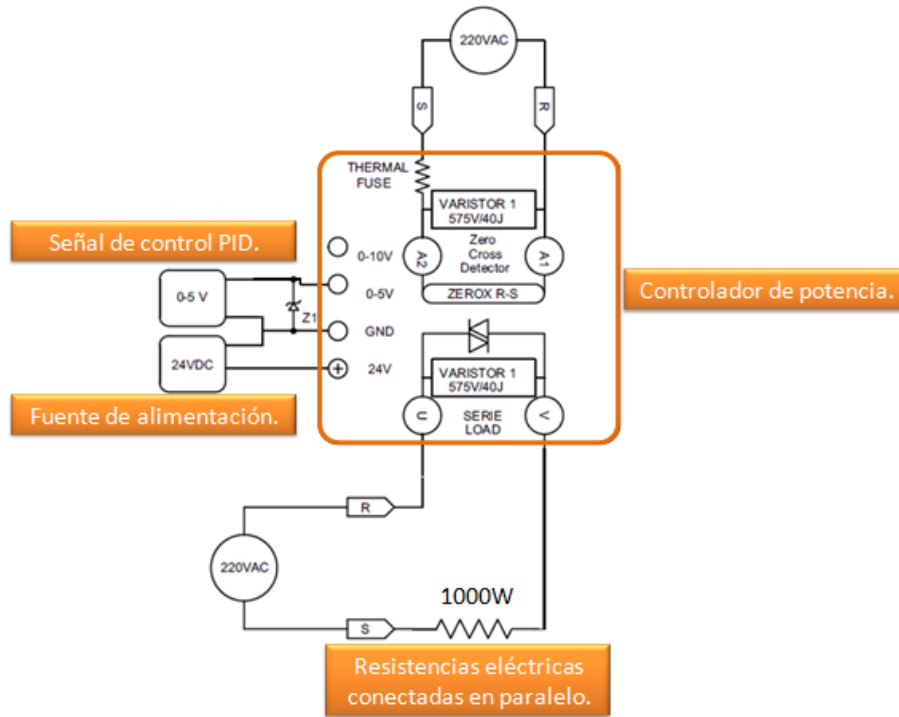


Figura 45. Circuito electrónico de adaptación de voltaje del sensor de presión



Para acoplar la etapa de control descrita anteriormente con la etapa de potencia se realizó la conexión eléctrica mostrada en la Figura 46 donde puede observarse que la señal análoga generada por el PID acciona el controlador que realiza la regulación de voltaje de la línea de 220 VAC.

Figura 46. Diagrama de conexiones eléctricas controlador de potencia



4.3.2 Lazo de control de nivel. Para realizar esta operación se cuenta con:

- ✚ Dos sensores de nivel CA18CLF08NA.
- ✚ Tarjeta electrónica de regulación de voltaje.
- ✚ Dos válvulas solenoide EV215B.

Como puede observarse en la Figura 47, las señales de los sensores de nivel es disminuida por un regulador, este circuito electrónico se muestra en la Figura 48. El circuito de acoplamiento cuenta con dos etapas iguales de reguladores una para cada sensor de nivel y cuya función es la de convertir 24 voltios a 5 voltios. Estas señales son monitoreadas por el software programado en Labview, donde se configuraron dos modos de operación, el primero que al detectar el nivel mínimo activa la válvula de suministro iniciando la inyección de agua por medio de la bomba y el segundo que realiza el apagado del equipo en los casos en que no se cuente con la bomba.

Figura 47. Lazo de control de nivel

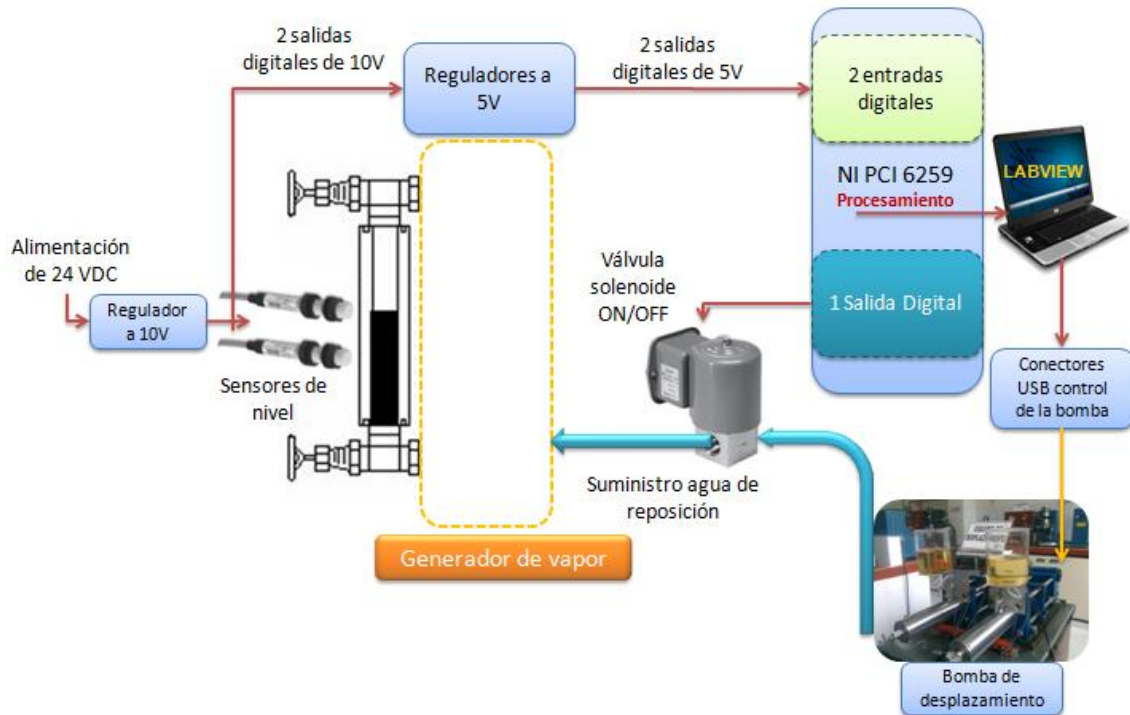
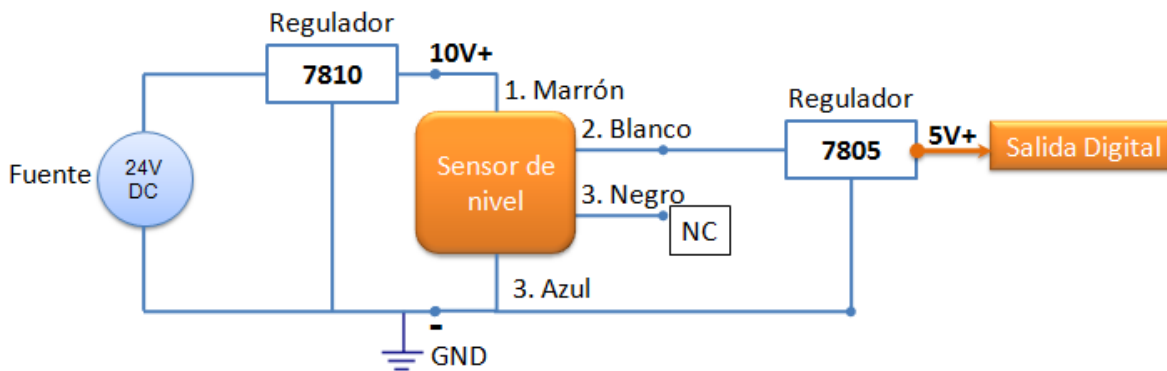
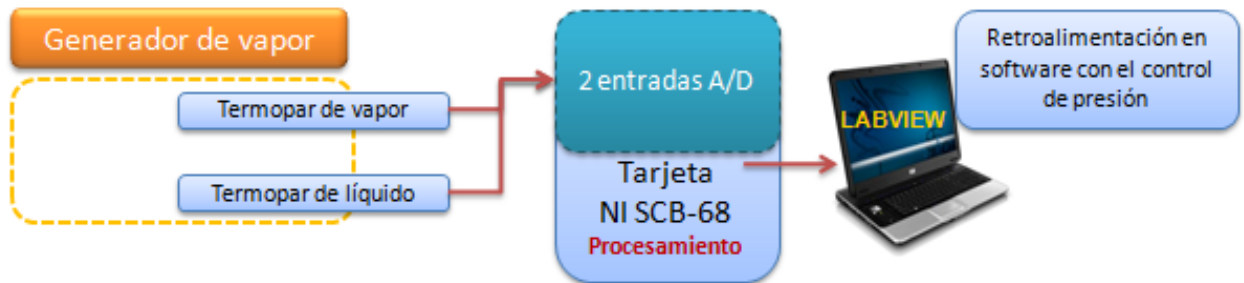


Figura 48. Circuito electrónico de control de nivel



4.3.3 Módulo de medición de temperatura. Este módulo permite adquirir las señales de temperatura tanto del agua como del vapor, la función es visualizar estos valores en la pantalla del equipo. Puede verse en la Figura 49 que los dos termopares son conectados de forma directa a la tarjeta NI SCB-68 por medio de dos puertos de conversión de señal de análogo a digital.

Figura 49. Módulo de medición de temperatura



4.3.4 Módulo de graduación de flujo de vapor. Esta etapa del control es la solución para graduar de forma automática el flujo de vapor. El motor es accionado por cinco puertos digitales que envían la señal de control a la tarjeta de potencia mostrada en la Figura 50 que convierte estas señales a voltajes de 12 voltios. En la Figura 51 puede verse el diagrama del módulo empleado. Debido a que la válvula tiene 18 vueltas y a que la sensibilidad del motor permite un control de 200 posiciones por vuelta se puede lograr una infinidad de flujos. Así mismo el sistema es el encargado de cerrar la salida de vapor mientras el equipo está en etapa de calentamiento, stand by ó en el momento en que se hayan finalizado las pruebas.

Figura 50. Circuito electrónico de control del motor paso a paso

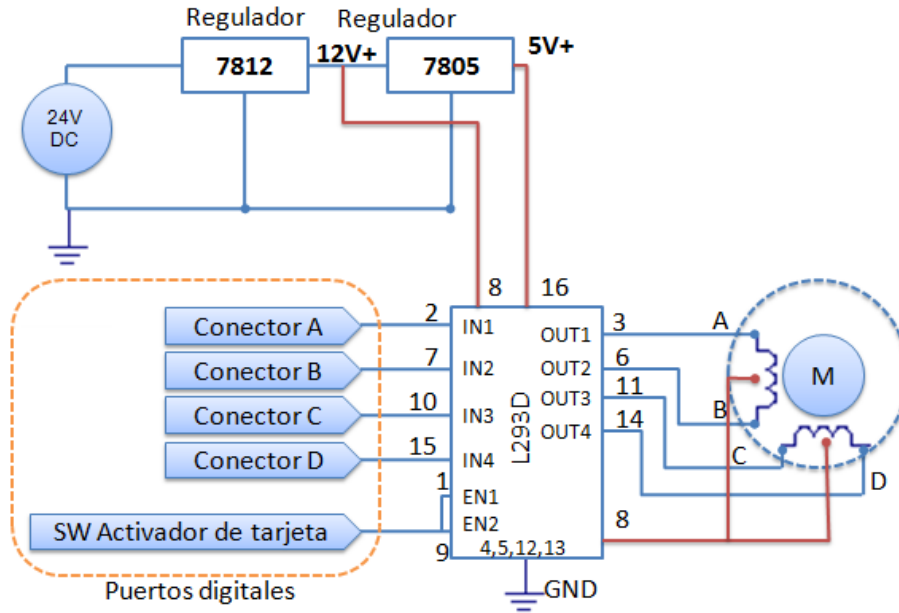
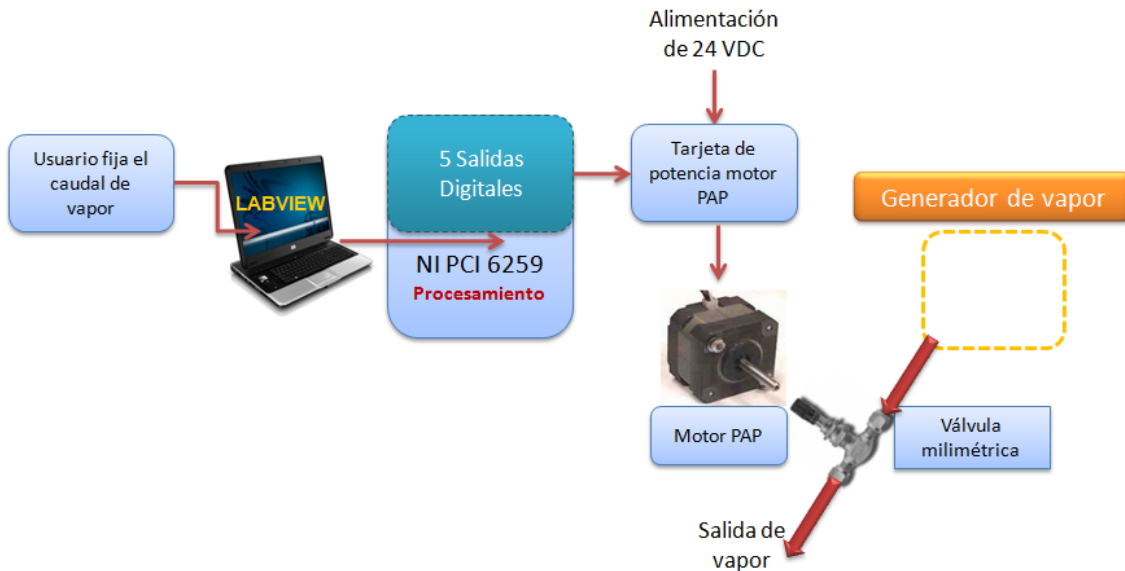


Figura 51. Módulo de graduación de flujo de vapor



En la Figura 52 se muestra el sistema mecánico del módulo de graduación de flujo y en la Tabla 14 se enuncian sus componentes principales.

Figura 52. Componentes del sistema mecánico de variación de flujo

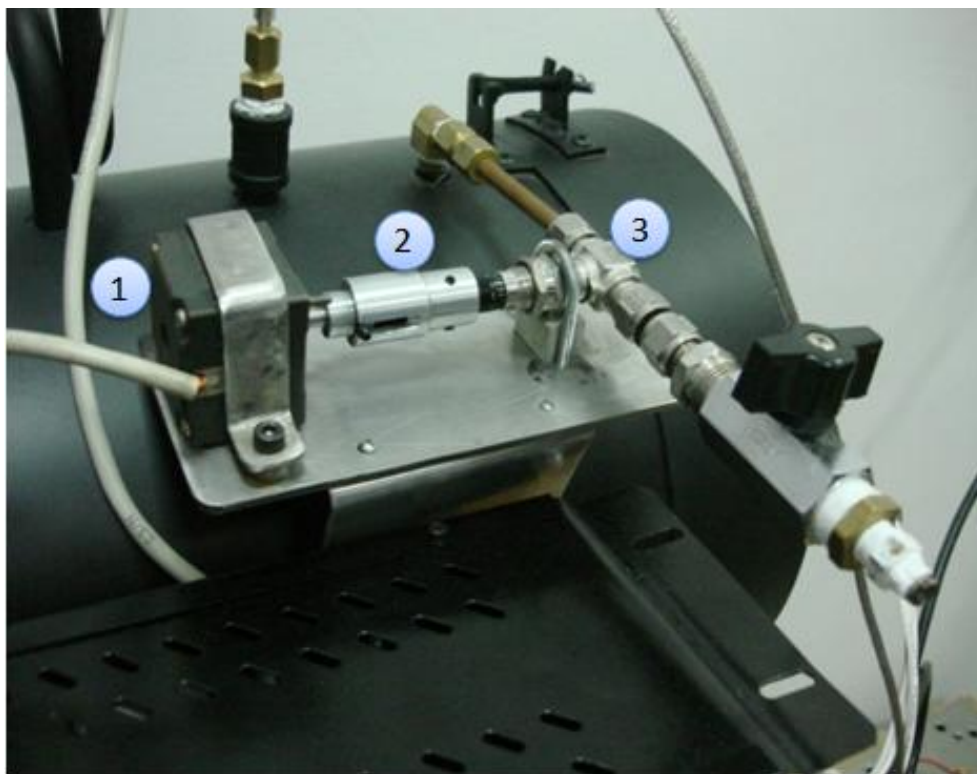


Tabla 14. Componentes del sistema mecánico de variación de flujo.

Nº de componente	Nombre del componente
1	Motor paso a paso
2	Acople deslizante
3	Válvula milimétrica

4.4 CAJA DE CONTROL

Para integrar todos los componentes enunciados en las cuatro etapas del control de generador de vapor se implementó una caja de control como la mostrada en la Figura 53, donde se ubicaron la fuente de alimentación, el actuador de potencia y las tarjetas electrónicas de acople de señales. Los conectores y orificios disponibles en la caja se describen en la Tabla 15.

Figura 53. Vistas frontal y posterior de la caja de control



Vista frontal



Vista Posterior

Tabla 15. Conexiones de la caja de control.

Nº según la Figura 53	Descripción
1	Botón de encendido del equipo.
2	Conector de 8 pines.
3	Conector de 5 pines.
4	Rejilla de ventilación de la caja.
5	Regletas de conexión de 8 pines.
6	Agujeros de salida cables de potencia.

La distribución interna de los componentes en la caja de control puede observarse en la Figura 54 y se detalla en la Tabla 16.

Figura 54. Distribución de componentes en la caja de control

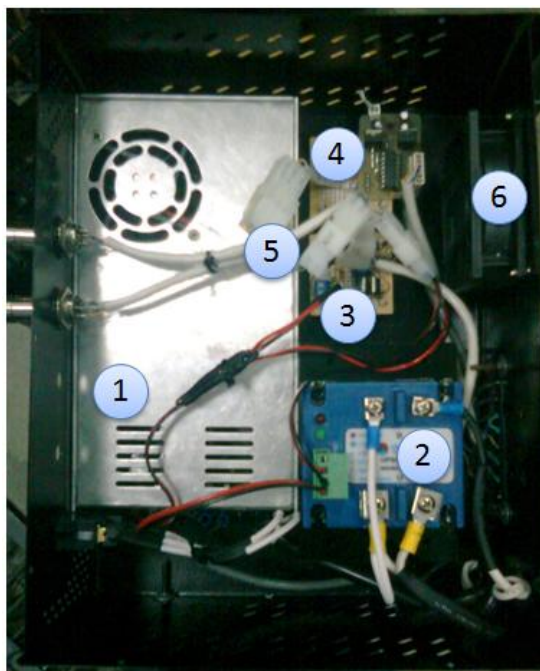


Tabla 16. Componentes internos de la caja de control.

Nº según la Figura 54	Descripción
1	Fuente de alimentación de 24 VDC.
2	Actuador de potencia OPTEC.
3	Circuito electrónico sensores de nivel y presión.
4	Circuito electrónico motor paso a paso.
5	Conectores de distribución de señales.
6	Ventilador de extracción de calor.

5. DISEÑO DEL CONTROL DEL GENERADOR EN LABVIEW

El sistema de control y monitoreo del generador de vapor es el encargado de integrar mediante una interfaz gráfica programada en LabVIEW, todos los componentes y módulos de control que se explicaron en el capítulo anterior, permitiendo que el generador opere durante el tiempo necesario para la realización de las pruebas.

Para el desarrollo de los lazos de control de presión y flujo se obtuvo la ecuación del sensor de presión y la adecuación de la ecuación de caudal de la válvula que viene caracterizada para aire pero se está utilizando para vapor. A continuación se muestran los métodos usados para obtener las ecuaciones del sensor de presión y la válvula milimétrica.

5.1 DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN

La ecuación del sensor del sensor de presión es necesaria para realizar la conversión de voltaje a presión en el programa realizado en LabVIEW.

Debido a la transformación de señal del sensor de presión por medio de la resistencia de 240 ohmios, se tienen dos puntos de operación que permiten calcular la ecuación lineal que caracteriza el sensor y que es la utilizada en el controlador PID. En la Tabla 17 se muestran estos valores.

Tabla 17. Datos de los límites de operación del sensor de presión Voltaje vs Presión

Presión Manométrica (PSI)	Corriente (mA)	Voltaje (V)
0	4	0,95
500	20	5

La ecuación corresponde a una ecuación lineal de la forma $P = a * V + b$ donde los valores de a y b se calcularon así:

$$a = \frac{P_{m\acute{a}xima} - P_{m\acute{i}nima}}{V_{m\acute{a}ximo} - V_{min}}$$

$$a = \frac{500 - 0}{5 - 0,95} = 123,46$$

$$b = P_{m\acute{a}xima} - a * V_{m\acute{a}ximo}$$

$$b = 500 - 123,46 * 5 = -117,3$$

Calculadas las dos constantes anteriores se obtiene la siguiente ecuación:

$$P = 123,46 * V - 117,3$$

5.2 ADECUACIÓN DE LA ECUACIÓN DE LA VÁLVULA MILIMÉTRICA PARA LA GRADUACIÓN DEL FLUJO DE VAPOR

Como ya se explicó en el capítulo 4, la válvula milimétrica es utilizada para la medición fina en análisis médicos o bioquímicos de gases y vapores. Según la hoja de datos del fabricante que se muestra en el ANEXO G, la ecuación para el Cv de la válvula es:

$$C_V = \frac{SCFH}{1360 * \sqrt{\frac{\Delta P * P_1}{(460 + T) * S_G}}}$$

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$$P_1 = \text{Presión de entrada en PSIA}$$

$$P_2 = \text{Presión de salida en PSIA}$$

$$SCFH = \text{Caudal en pies cúbicos estándar por hora}$$

$$S_G = \text{Peso específico del gas}$$

$$T = \text{Temperatura en } F = T[^\circ C] * 1,8 + 32$$

Como puede observarse la ecuación está generalizada para cualquier gas.

Para la determinación del Cv se deben calcular los diferentes parámetros según sean los requerimientos de la prueba en la que se va a realizar inyección de vapor, en donde se conoce la tasa de inyección de agua que debe hacerse equivalente en vapor, la caída de presión que ocurre en el medio poroso y la condición de presión de operación a la que se desea trabajar el equipo.

La presión de operación del equipo está limitada hasta los 150 PSI que corresponden a la presión máxima, la caída de presión del medio poroso se encuentra comprendida entre 0 y 7 PSI, debido a que este es el valor máximo permitido por el diferencial de presión del equipo de pruebas y el flujo es fijado según el corte de agua que se desee inyectar al medio poroso.

Debe calcularse el número de vueltas de la válvula milimétrica para fijar un flujo determinado según los parámetros descritos anteriormente. Se realizó una aplicación adicional en labview que también se encuentra incluida en el módulo de control que permite evaluar posibles valores de flujos y presiones a establecer en el equipo antes de iniciar la operación, el proceso que sigue esta aplicación consiste en calcular por medio de las tablas de vapor la temperatura de saturación, la densidad del vapor y el volumen específico del vapor. Con el valor de la temperatura obtenida y la presión a la que operará el equipo se calcula la densidad del aire por medio de la ecuación de gas ideal de la siguiente forma:

$$Densidad_{aire} = \frac{Presión[Kpa]}{T[K] * R_{aire}}$$

$$T[K] = T[^\circ C] + 273,15$$

$$Presión[Kpa] = 6,89476 * Presión_{absoluta} * [psi]$$

$$Presión_{absoluta} = Presión_{Manométrica} + 14,7$$

Con el dato de caída de presión en el medio poroso ($\Delta P_{medio\ poroso}$) y teniendo en cuenta que la salida del mismo se encuentra a presión atmosférica se calcula la caída de presión de la válvula aplicando el teorema de Bernoulli a la línea y despreciando las pérdidas en las tuberías así:

$$\Delta P_{Válvula} = Presión_{Manométrica} - (\Delta P_{medio\ poroso}) - 14,7$$

Con el dato del flujo de agua en cc/min que se desea inyectar como equivalente en vapor se calcula el flujo de vapor mediante la siguiente relación:

$$Flujo_{vapor} \left[\frac{cc}{min} \right] = \frac{Flujo_{agua} \left[\frac{cc}{min} \right] * \vartheta_{especifico\ del\ vapor}}{\vartheta_{especifico\ del\ agua\ @ (25^{\circ}C, P_{atm})}}$$

$$\vartheta_{especifico\ del\ agua\ @25^{\circ}C} = 0,001003 \frac{m^3}{Kg}$$

$$\vartheta_{especifico\ del\ vapor} = \vartheta_{@ (T, P_{man})}$$

Debido a que la ecuación del Cv requiere que el flujo esté en pies cúbicos estándar por hora se realiza la siguiente conversión:

$$SCFH = \frac{Flujo_{vapor} \left[\frac{cc}{min} \right] * 60}{28316,85}$$

El S_G se calcula con los valores de las densidades de vapor y aire determinadas anteriormente con la siguiente ecuación:

$$S_G = \frac{Densidad\ de\ vapor}{Densidad_{aire}}$$

Los valores de SCFH, ΔP , P_1 , S_G , T[F], son remplazados en la fórmula del Cv, el valor obtenido es interpolado en la Tabla 18 y posteriormente este dato calculado es cargado en el programa para posicionar la válvula mediante el motor paso a paso.

Tabla 18. Relación del Cv Vs el número de vueltas de la válvula milimétrica

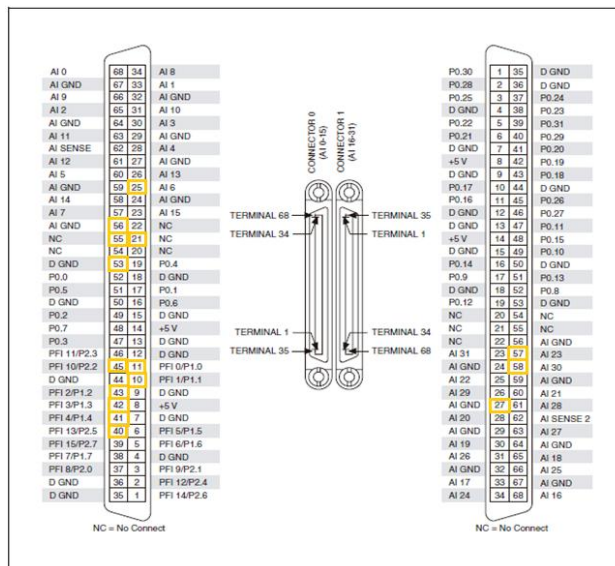
Cv	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	0,02	0,022	0,024
vueltas	0	3	5	6	7,5	8,5	9,6	11	12	13,1	14,5	16	18

5.3 PUERTOS UTILIZADOS PARA EL CONTROL EN LAS TARJETAS NATIONAL INSTRUMENTS

En la Figura 55 se indican los puertos disponibles en los conectores de las tarjetas.

Los puertos disponibles en las tarjetas de National Instruments que fueron implementados para la aplicación de control del generador de vapor se muestran en la Tabla 19.

Figura 55. Conectores de las tarjetas National Instruments



Fuente: Manual de operación tarjeta NI PCI-6259, Página 323 figura A-61.

Tabla 19. Puertos de conexiones tarjetas National Instruments PCI-6259.

Número pin	Conexión tarjeta	Número pin	color	Conector caja de control
(Tarjeta de		Conector de 8 pines		

conectores izquierda)				
56	AIGND	1	Blanco-Azul	GNDain
25	AI6	2	Azul	Señal Sensor de presión
45	PFI10-P2.2	3	Blanco-Naranja	Sensor de nivel 1
10	PFI1-P1.1	4	Naranja	Sensor de nivel 2
53	DGND	5	Blanco-Verde	GNDDin
21	AO1	6	Verde	Salida de potencia
55	AOGND	7	Blanco-Marrón	GNDaout
NC	NC	8	Marrón	NC
(Tarjeta de conectores izquierda)	Conector de 5 pines			
43	P1.2	1	Blanco-Azul	A
42	P1.3	2	Azul	B
40	P2.5	3	Blanco-Naranja	C
41	P1.4	4	Naranja	D
11	P1.0	5	Blanco-Verde	SW
(Tarjeta de conectores derecha)				
Termopares				
58	AI30	1		Termopar 1
24	AIGND	GNDAI30		GND Común
57	AI23	2		Termopar 2
23	AIGND	GNDAI23		GNDtermopar1

5.4 PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica y el software del generador constan principalmente de una etapa de inicio, donde se le indica al usuario mediante mensajes los pasos que debe seguir para realizar el llenado del equipo y alcanzar el nivel de agua requerido para iniciar el proceso de calentamiento. Una vez el programa realiza una serie de preguntas en las que se deben suministrar los datos de operación del generador de vapor, entre los que se encuentran la presión de operación, la presión del medio poroso, el flujo y la condición de operación del equipo con bomba para la reposición de agua o sin bomba, se inician los módulos encargados del proceso de calentamiento del equipo, control PID y aquellos que se encargan de monitorear los niveles de agua, para tomar las diferentes acciones según el

modo de operación seleccionado. Se cuenta con botones para la habilitación del proceso de inyección, parada del equipo, apagado del equipo y cambio de datos de operación. El programa de control permite visualizar tanto las variables de temperatura como la presión en el tiempo, la acción del control PID, la posición en la que se encuentra la válvula milimétrica, indicadores del estado de llenado del tanque e indicador del modo de operación.

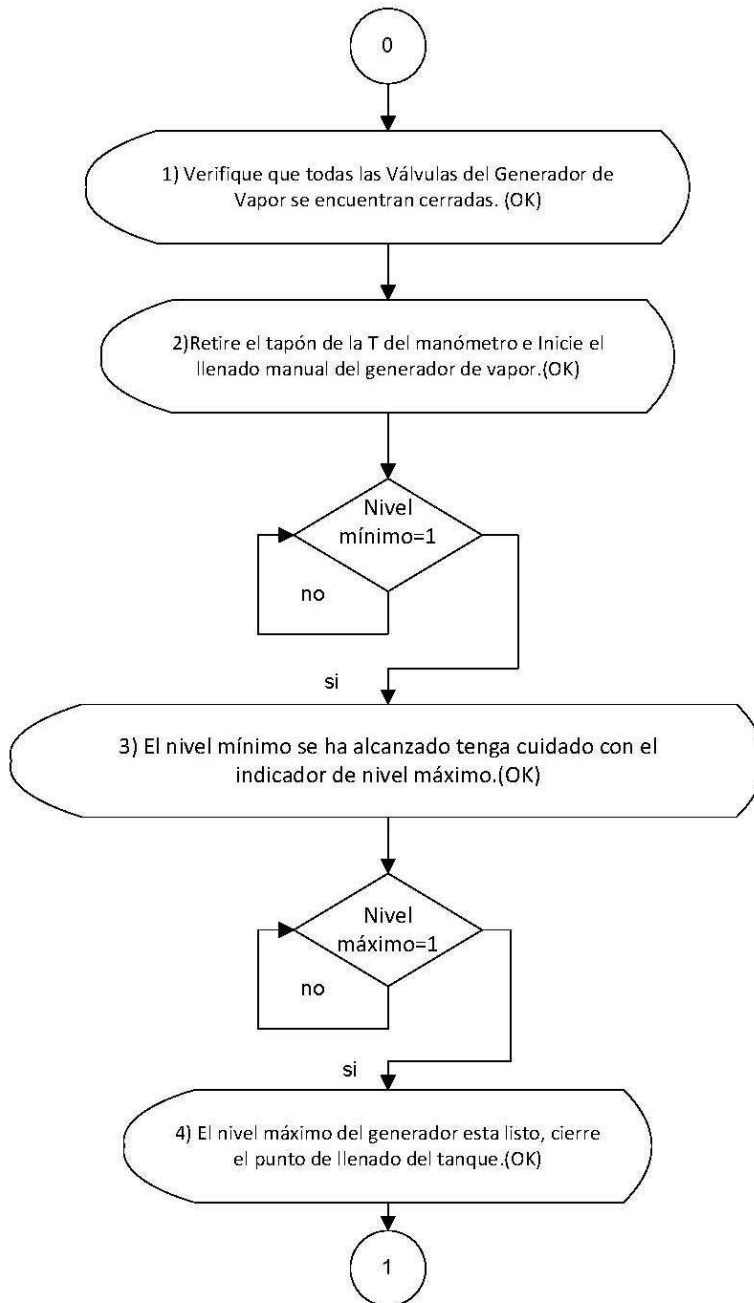
A continuación se presentan los algoritmos implementados para cada uno de los módulos que componen el software de control del generador de vapor y su respectivo programa en Labview.

5.5 MÓDULOS DE CONTROL DEL GENERADOR DE VAPOR

5.5.1 Módulo de inicio del generador de vapor. Al iniciar la aplicación se ejecuta la rutina mostrada en la Figura 56. Esta etapa se encarga de dar las indicaciones al operario para el adecuado llenado del tanque y los diferentes cuidados que deben tenerse para garantizar el correcto funcionamiento del equipo.

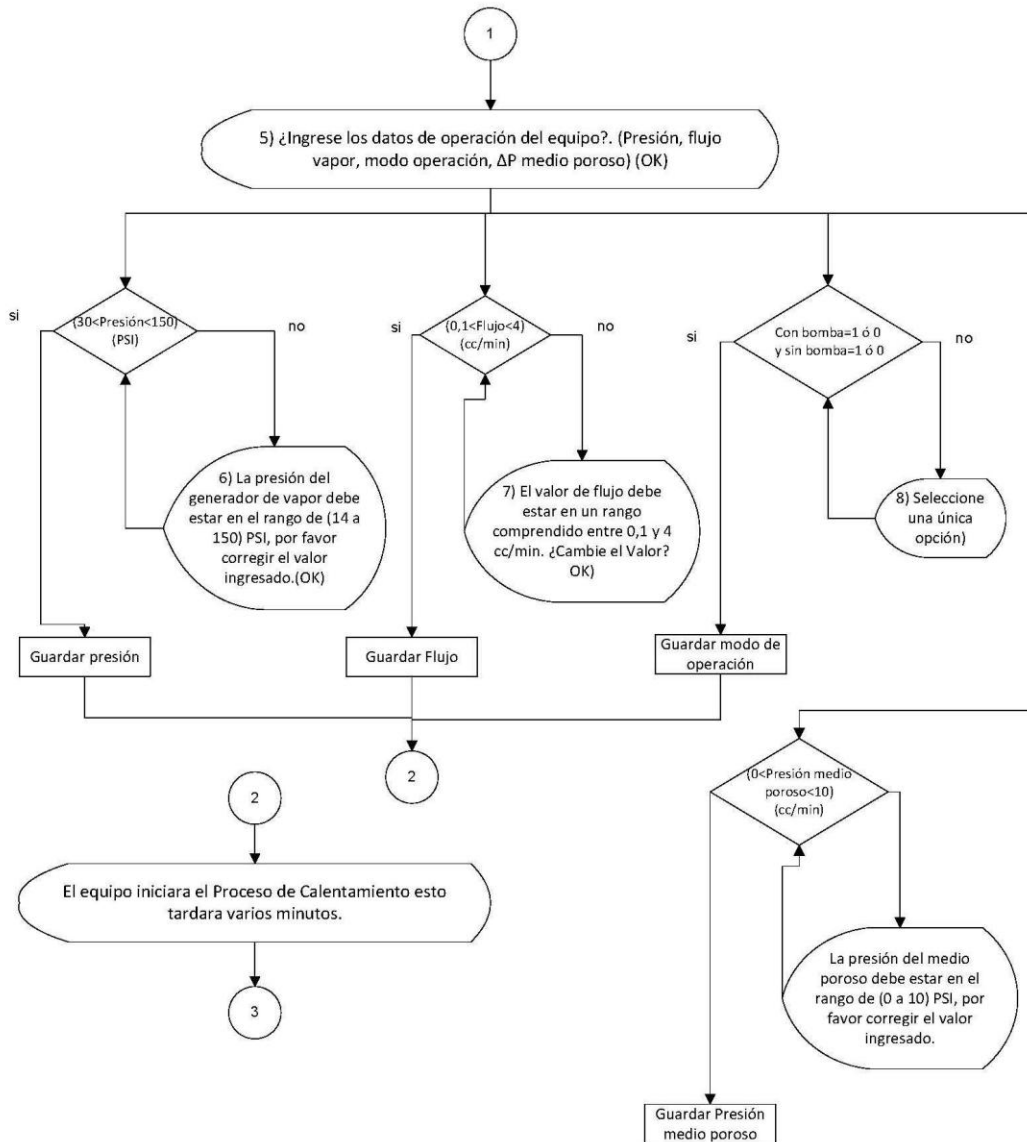
5.5.2 Módulo de obtención de datos de operación. Una vez alcanzado el nivel máximo del equipo, el software inicia su siguiente etapa que consiste en obtener los datos de operación como se muestra en el algoritmo de la Figura 57. Esta rutina además de adquirir los datos de operación del equipo, se encarga de monitorear que los datos suministrados por el usuario correspondan a los rangos de operación, de lo contrario se envían mensajes de error indicando que los datos exceden los valores operacionales y que deben ingresarse valores coherentes para poder iniciar el proceso de calentamiento.

Figura 56. Algoritmo de inicio del software del generador



Culminado el módulo de adquisición de datos se inicia una etapa del software en donde se realiza el calentamiento, control, monitoreo de todas las variables operacionales, adquisición de las ordenes emitidas por el usuario y controles de seguridad que garantizan la integridad en el funcionamiento del equipo.

Figura 57. Algoritmo de obtención de datos de operación



5.5.3 Módulo de cambio de datos de operación. En este módulo se realiza una selección de los parámetros que se desea cambiar y se activan las etapas de cambio individual de datos como se puede ver en las Figura 58, Figura 59, Figura 60, Figura 61 y Figura 62. Cada rutina de cambio se encarga de verificar que el dato suministrado por el usuario se encuentre en el rango permitido, de lo contrario ocasiona pantallas de error pidiendo que se cambien los datos.

Figura 58. Algoritmo de selección de cambio de datos de operación

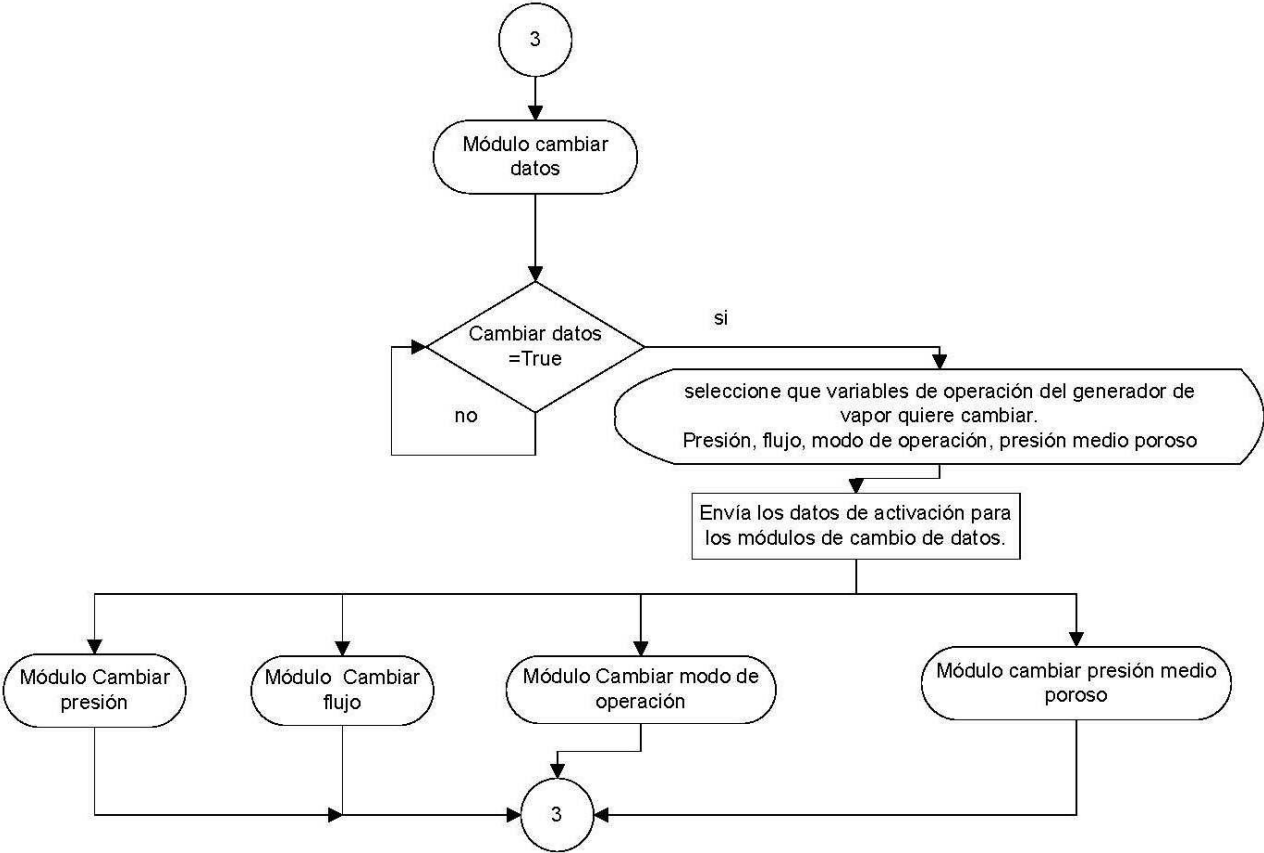


Figura 59. Algoritmo de cambio de presión

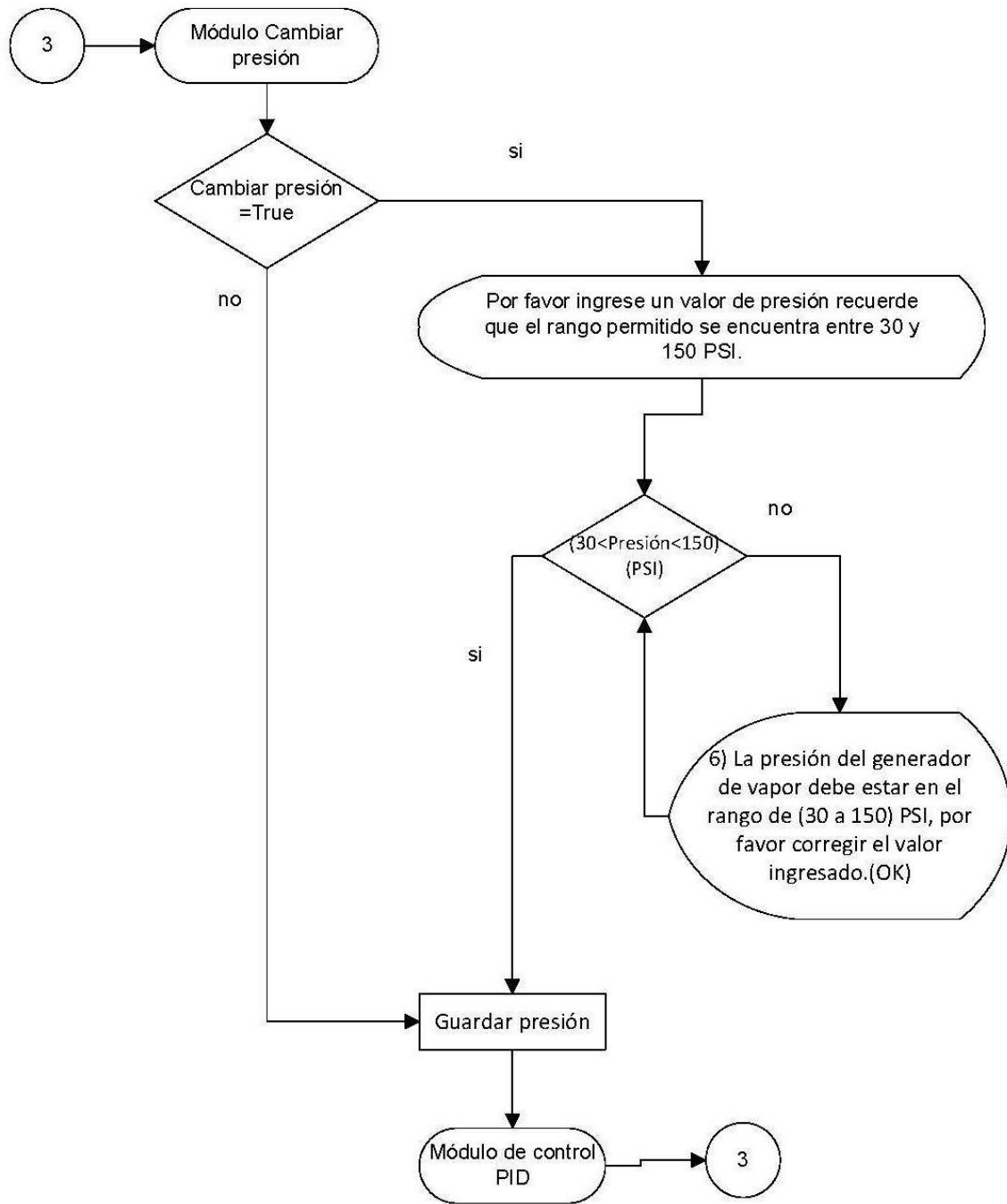


Figura 60. Algoritmo de cambio de flujo

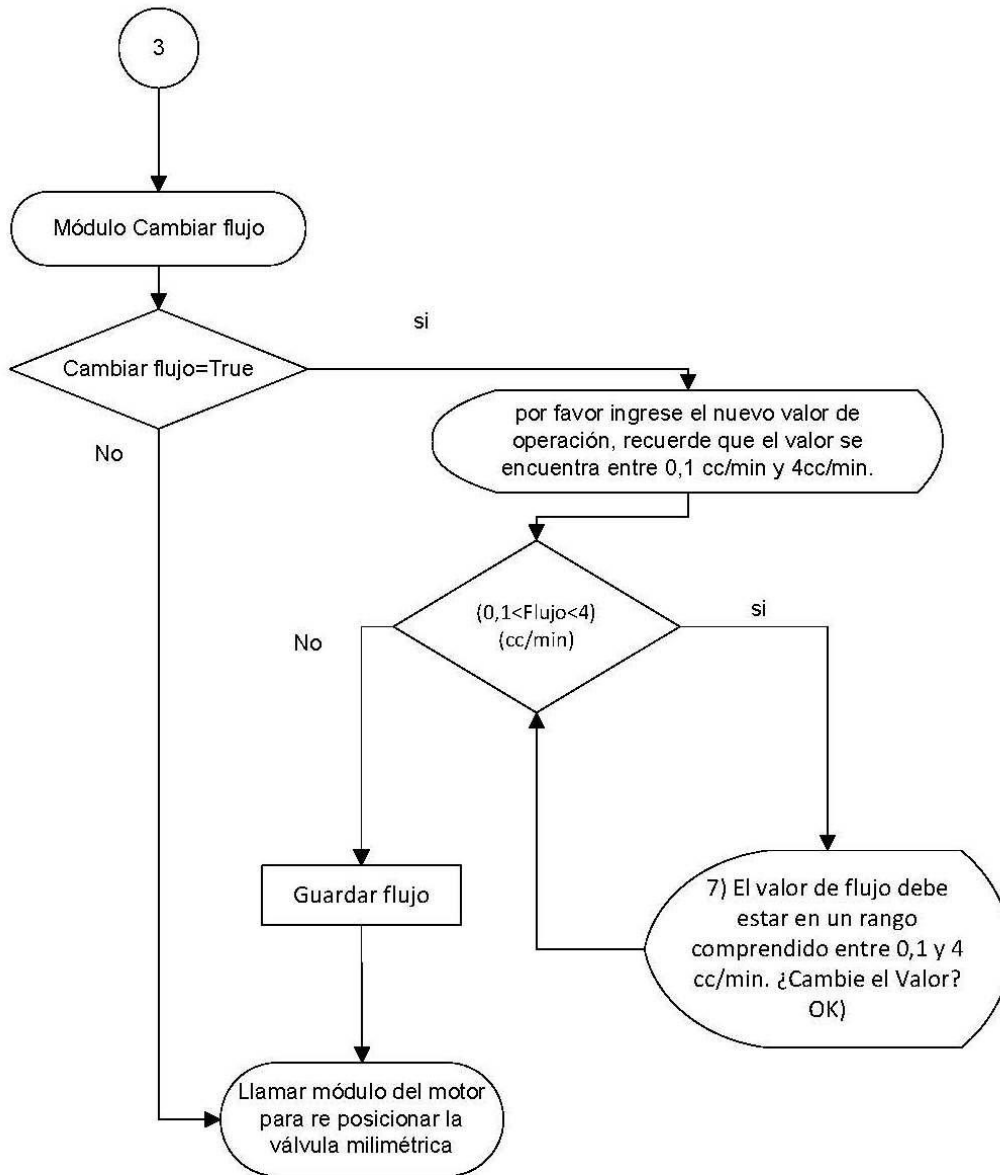


Figura 61. Algoritmo de cambio del modo de operación

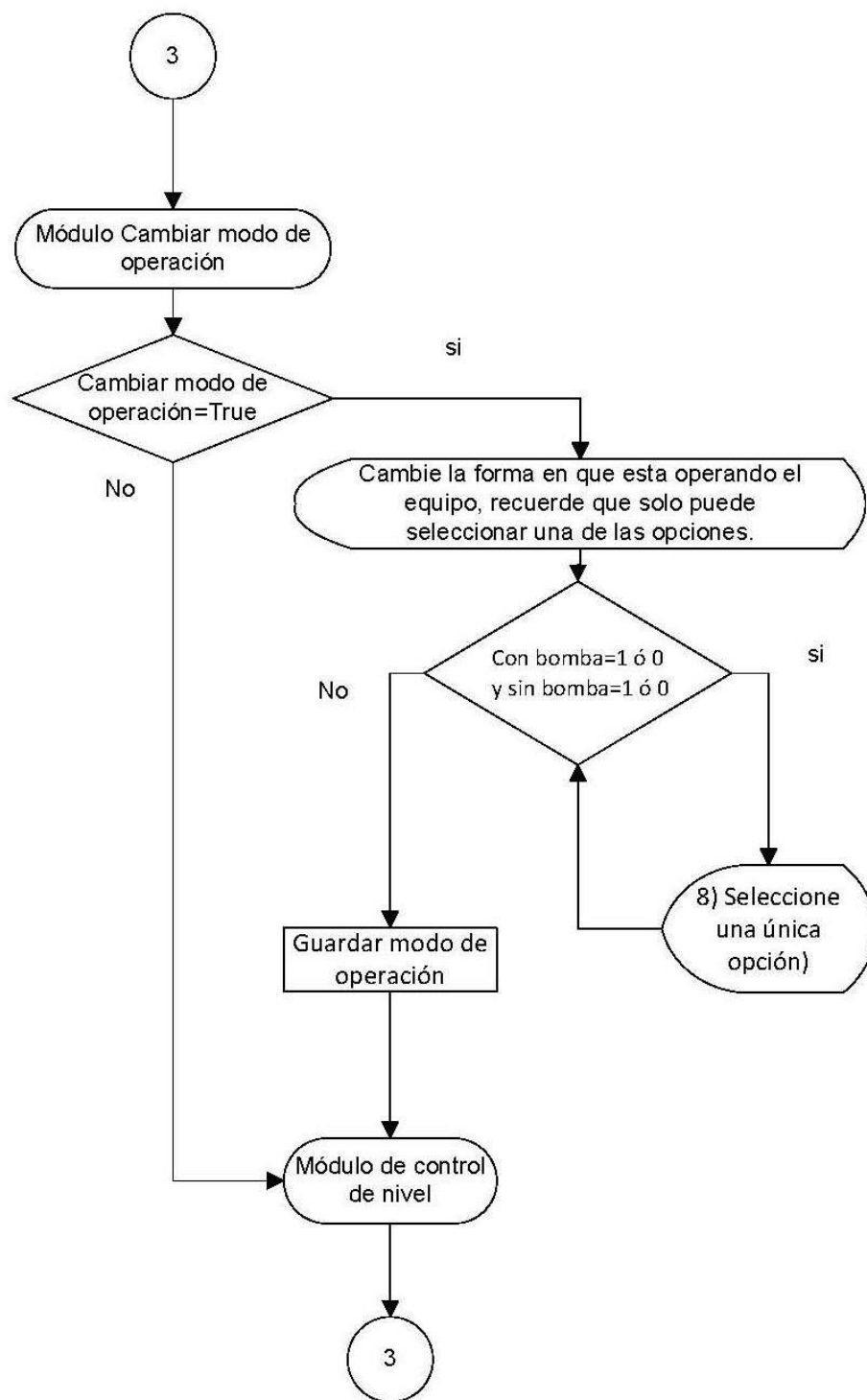
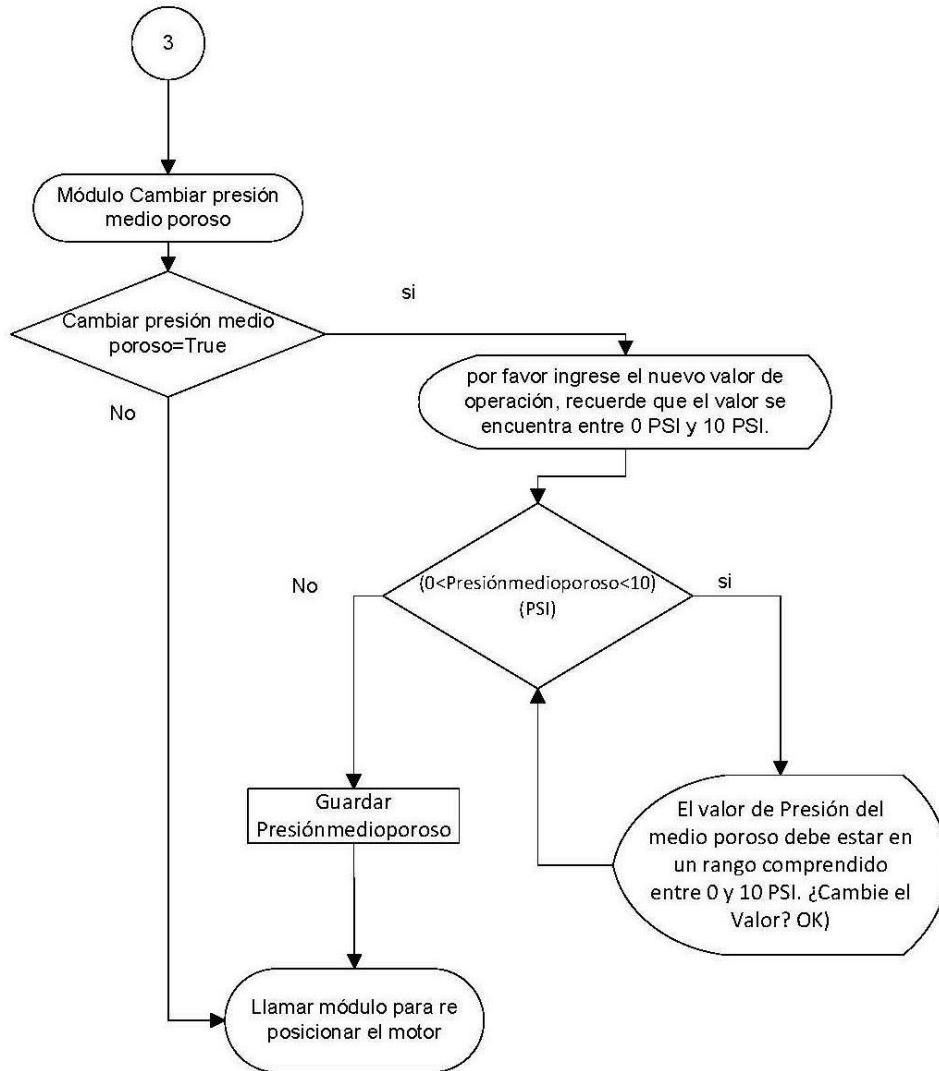
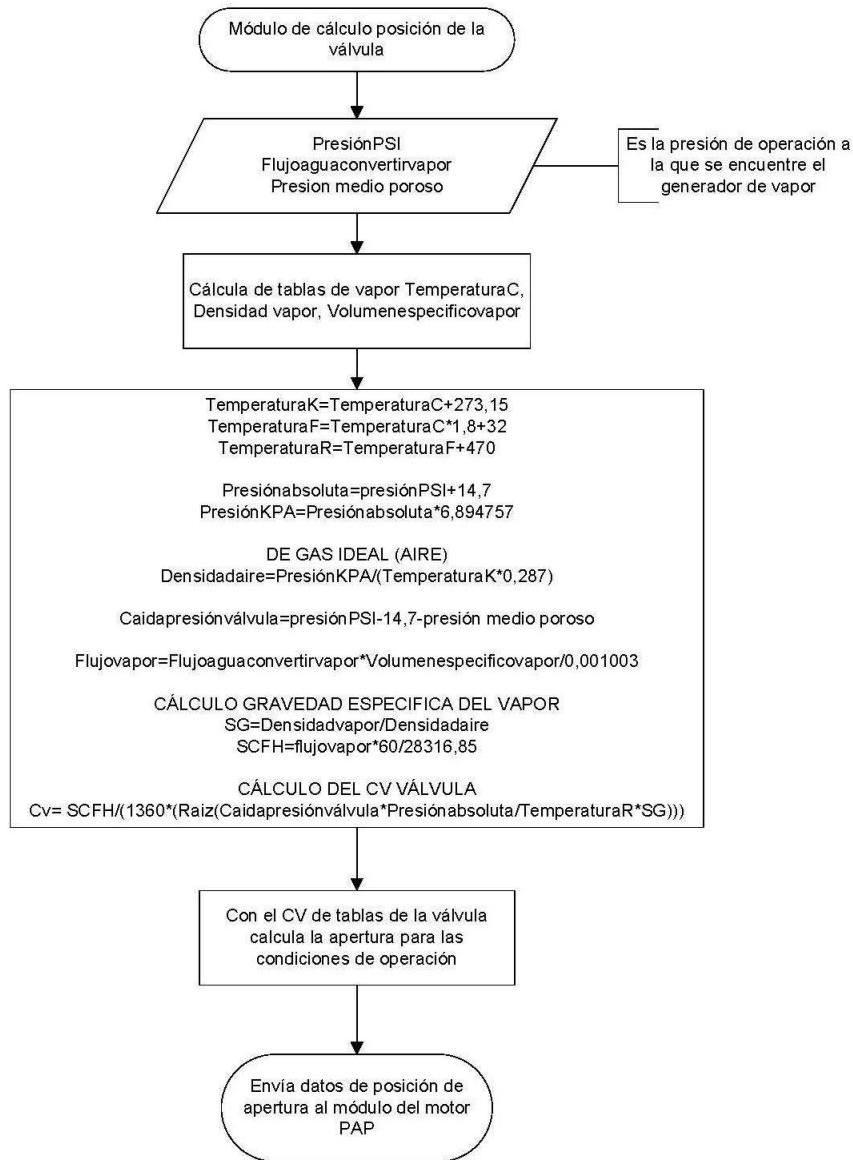


Figura 62. Algoritmo de cambio de la presión del medio poroso



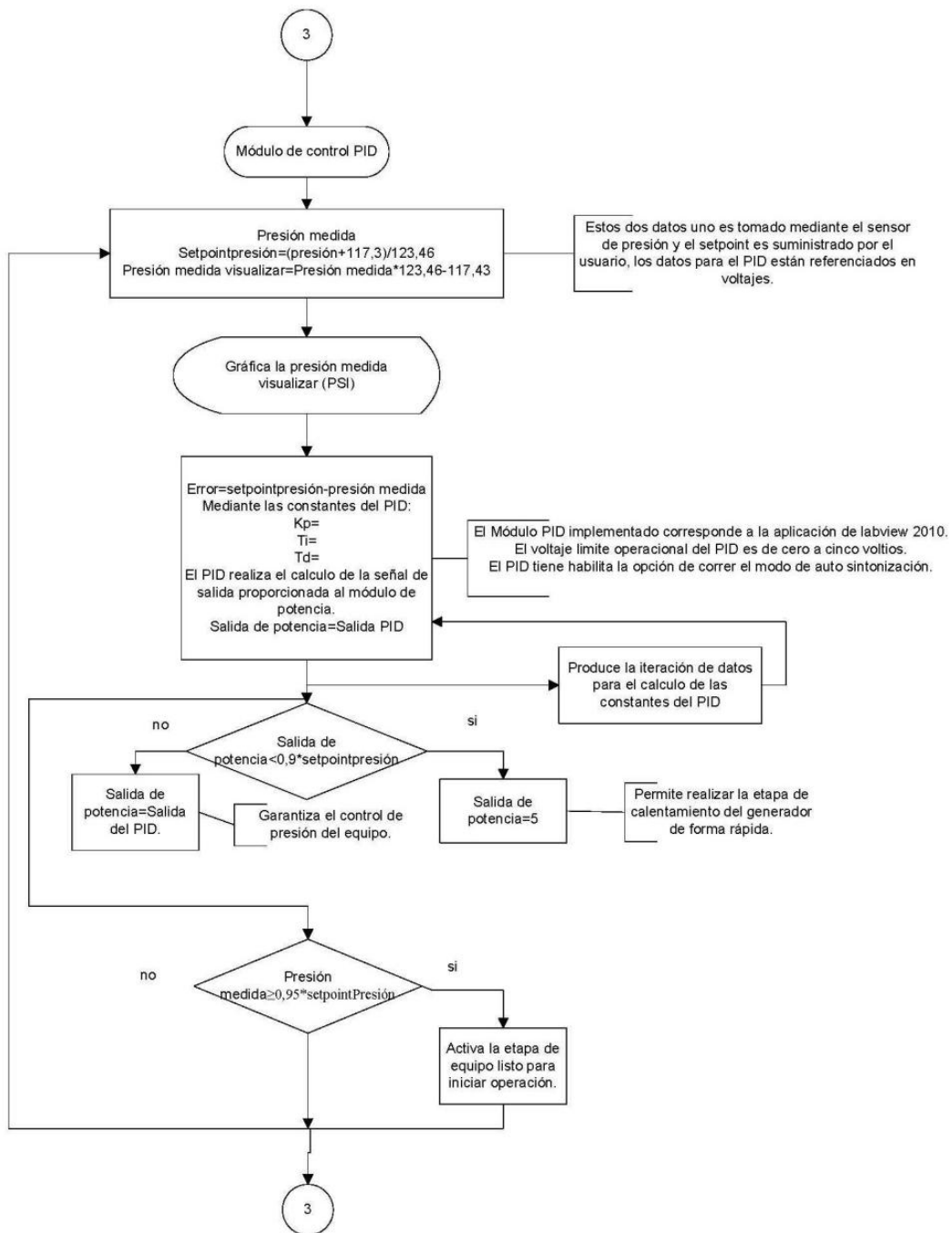
5.5.4 Módulo de cálculo de la posición de la válvula. Según los datos suministrados por el usuario se realizan los respectivos cálculos para la operación del generador de vapor. Para determinar la apertura de la válvula se utiliza el módulo de cálculos siguiente que corresponde al proceso explicado al inicio del capítulo.

Figura 63. Algoritmo de cálculo de la posición de apertura de la válvula milimétrica



5.5.5 Módulo de control PID del generador de vapor. Una vez iniciado el modo de operación del equipo se activa el control PID. Inicialmente se realiza el proceso de calentamiento y el PID entrará en funcionamiento solamente al alcanzarse el 90% de la señal de Setpoint de presión, este proceso puede observarse en la Figura 64. Este módulo también tiene como función mantener bloqueado el inicio de inyección de vapor antes de que se alcance el punto de operación fijado por los datos de usuario.

Figura 64. Algoritmo de control PID

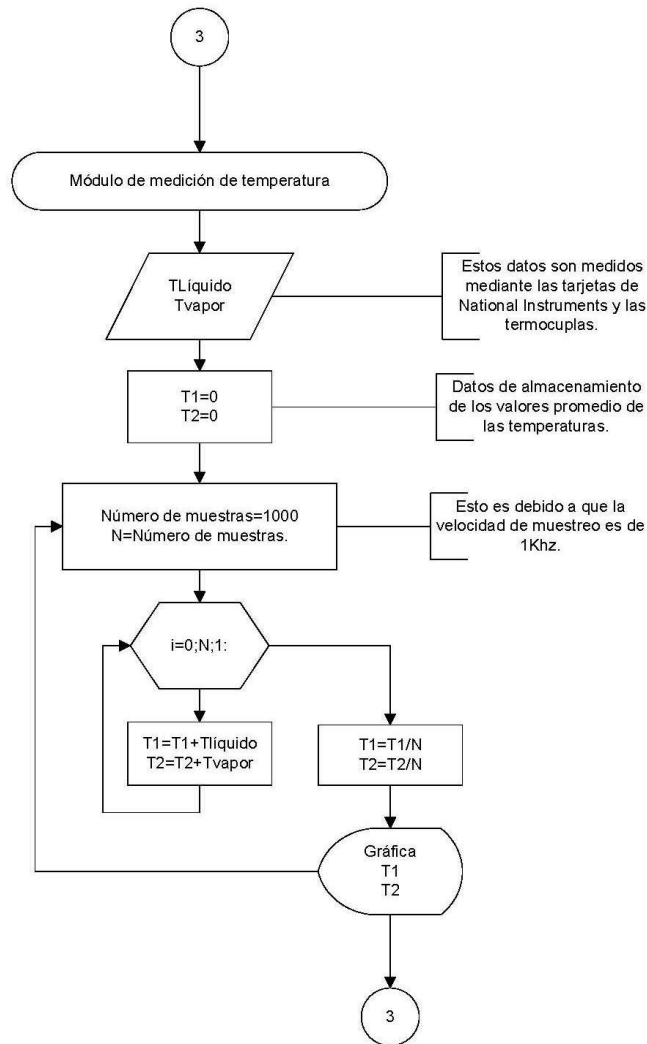


5.5.6 Módulo de medición de temperatura. La adquisición de datos de temperatura es obtenida mediante el promedio de una serie de muestras tomadas

en intervalos de tiempo de 250ms, de manera que se promedian en el tiempo para eliminar fluctuaciones y ruidos en los módulos de muestreo de datos.

La medición de temperatura se realiza durante toda la ejecución del software mediante el algoritmo mostrado en la Figura 65.

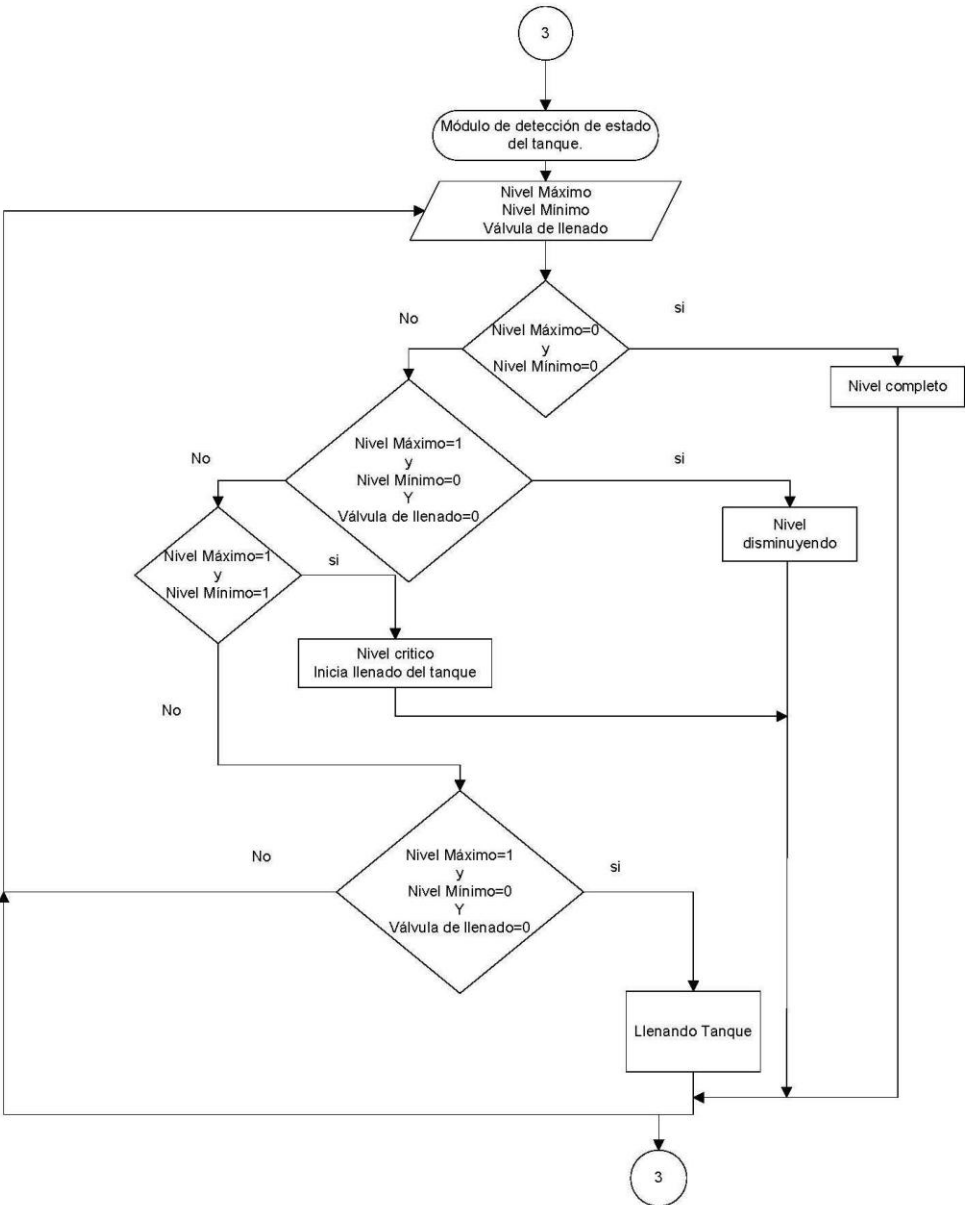
Figura 65. Algoritmo de medición de temperatura



5.5.7 Módulo de detección de estado del tanque. Este módulo se encarga de mostrar el estado actual en el que se encuentra el tanque, entre los estados se

encuentra equipo lleno, equipo descargándose, equipo en estado crítico y equipo en proceso de llenado. La rutina de detección se puede ver en la Figura 66.

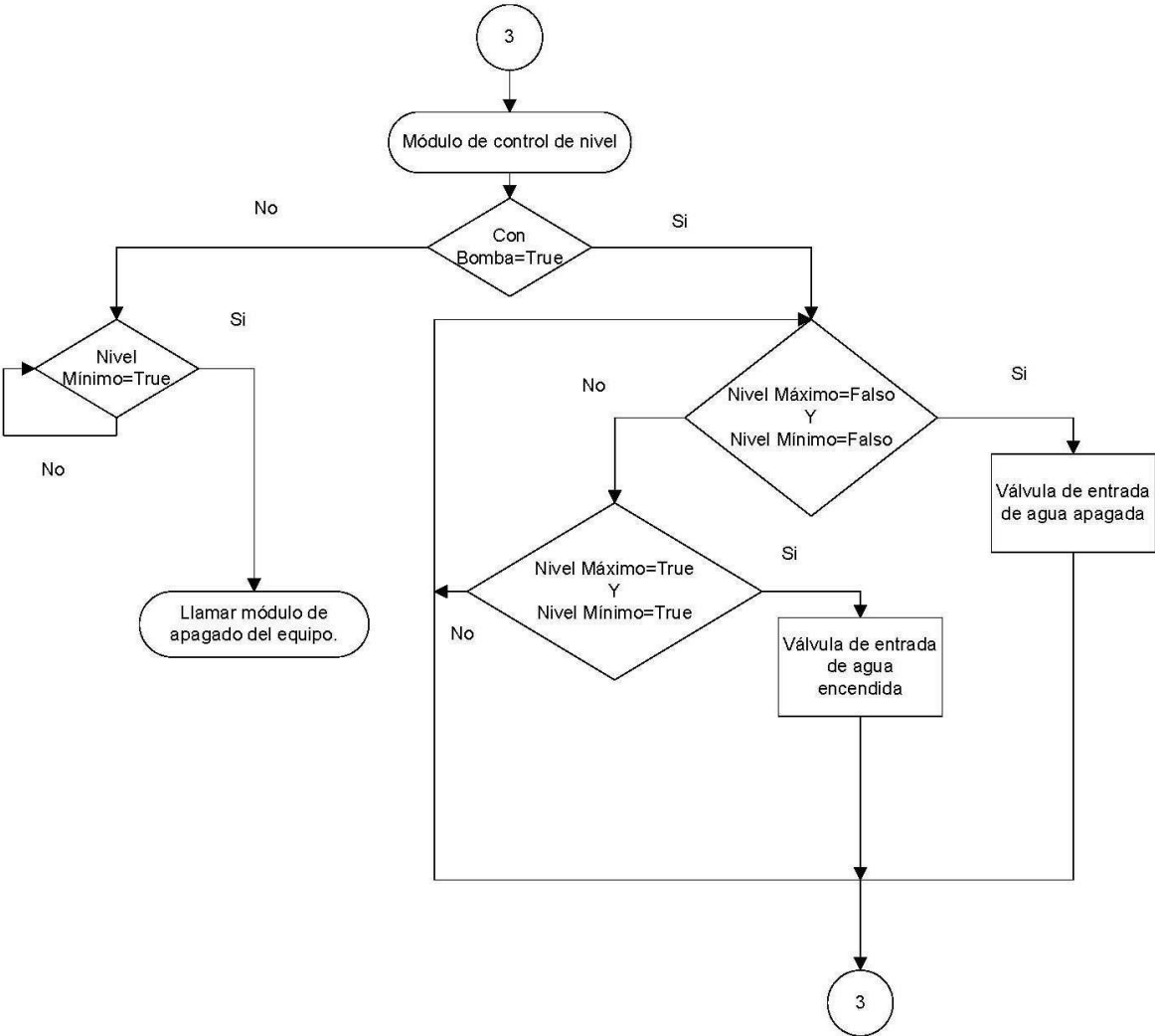
Figura 66. Algoritmo de detección de estado del tanque



5.5.8 Módulo de control de nivel. Este módulo monitorea el estado de nivel del tanque en cualquiera de los dos modos de funcionamiento disponibles, se encarga

de activar la válvula para el suministro de agua de reposición en el modo de operación con bomba o de realizar el apagado en el caso de modo de operación sin bomba como puede observarse en la Figura 67.

Figura 67. Algoritmo de control de nivel



5.5.9 Botones de operación para el inicio de inyección, parada de inyección y apagado del equipo. Estos tres módulos que pueden observarse en la Figura 68, Figura 69 y Figura 70, corresponden a rutinas de accionamiento mediante botones

que se encuentran en la interfaz gráfica del usuario y que están disponibles durante el proceso de funcionamiento del equipo.

Los botones de inicio de inyección y parada de inyección sólo son habilitados en el momento en que se alcanza la presión fijada para las pruebas mediante el módulo de entrada de datos.

Figura 68. Algoritmo de apagado del equipo

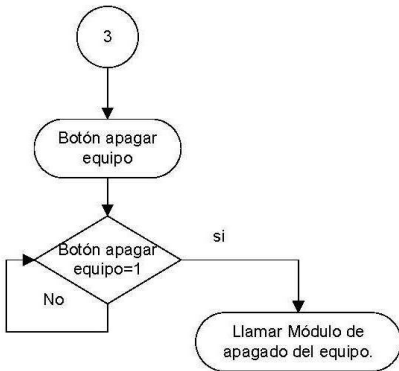


Figura 69. Algoritmo de iniciar inyección

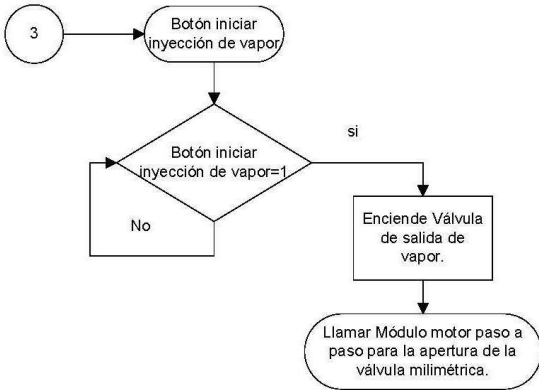
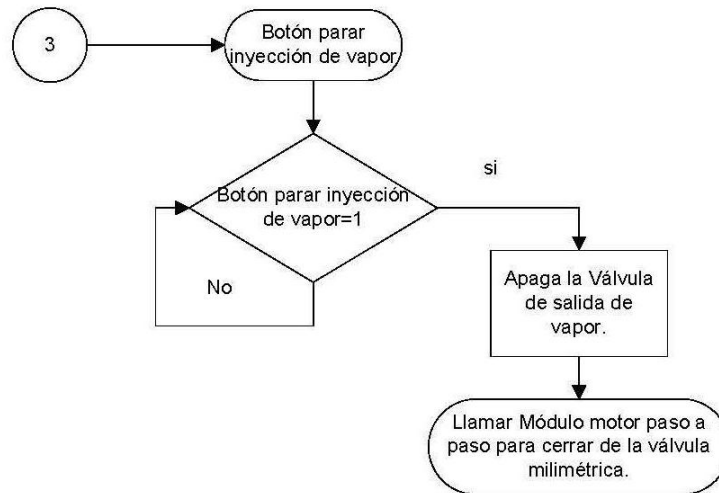


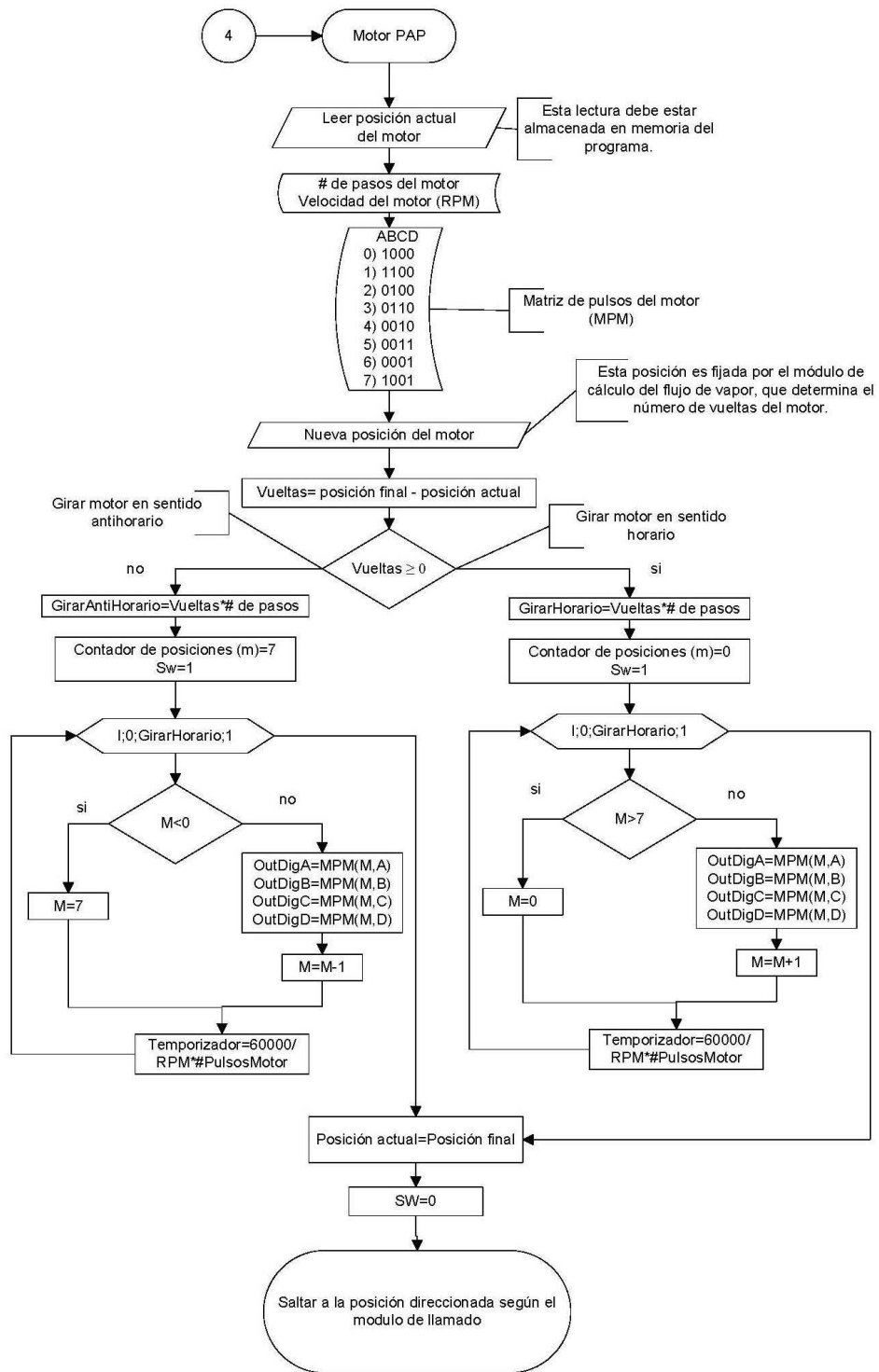
Figura 70. Algoritmo de parada del equipo



5.5.10 Módulo de posicionamiento de la válvula milimétrica mediante el motor paso a paso. Este algoritmo de posicionamiento del motor mostrado en la Figura 71 necesita del cálculo previo del número de vueltas que deben darse para lograr el flujo requerido para la inyección, realizado al inicio del capítulo. Una vez suministrado este dato y alcanzada la presión de operación el usuario puede dar inicio al proceso de inyección dando clic en el botón destinado para esta condición. Este módulo es de gran importancia debido a que es una rutina compartida en varios de los posibles eventos que pueden ocurrir durante el transcurso de una prueba, dentro de estos eventos se encuentran:

- ✚ La puesta del equipo en stand by.
- ✚ Llegar al nivel mínimo en el caso de funcionamiento sin Bomba.
- ✚ Proceso de apagado del equipo.
- ✚ Proceso de iniciación de inyección.

Figura 71. Algoritmo de control de flujo



5.5.11 Módulo de apagado del equipo. Este módulo se encarga de garantizar que la señal de salida de potencia sea cero y que el sistema cierre sus válvulas de salida de vapor, además de indicar mediante mensajes algunos pasos que deben seguirse en el proceso de apagado del equipo y posteriormente algunas de las recomendaciones para el vaciado del tanque. En la Figura 72 puede verse la secuencia de apagado del equipo.

Figura 72. Algoritmo de apagado del equipo



En el ANEXO I se encuentra el manual de operación del software del generador de vapor en el que se describen la secuencia que debe llevarse a cabo durante todo el proceso de manipulación del programa.

6. AJUSTES DEL EQUIPO

6.1 VERIFICACIÓN DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO DEL EQUIPO

Según las pruebas realizadas el tiempo del calentamiento promedio se encuentra alrededor de los 50 minutos que corresponde a un porcentaje de error del 13,92 % respecto al cálculo realizado en el capítulo 2, en donde el tiempo es 43 minutos. Este error se debe principalmente a que en el cálculo no se consideraron las pérdidas de calor y por esta razón el tiempo de calentamiento aumenta un poco.

6.2 MEDICIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE LA SUPERFICIE DEL EQUIPO Y COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL DISEÑO TÉRMICO

Para la medición de las temperaturas superficiales del generador se utilizó un FLUKE thermometers digital serie 51. Los datos obtenidos en la prueba del equipo operando a una presión de 100 PSI se muestran en la Tabla 20 y en el ANEXO J pueden observarse las fotografías de cada una de las medidas.

La recopilación de los datos calculados y los obtenidos en las mediciones para la presión de 100 PSI se pueden observar en la Tabla 21.

Como se observa en la Tabla 21, el porcentaje de error para la temperatura superficial del cilindro es del 11,5 %. La diferencia de la temperatura medida respecto de la calculada puede justificarse porque el aislante utilizado en el ensamble del equipo tenía un espesor de dos pulgadas que se compactaron en el espesor disponible de una pulgada. Otra razón que justifica esta diferencia corresponde a que los cálculos fueron realizados teniendo como base una temperatura en el ambiente de 25 °C y el laboratorio presenta una temperatura inferior debido al aire acondicionado. En términos generales, el cálculo es

aceptable e inicialmente en el diseño se buscaba una temperatura inferior a los 60 °C para evitar que el operario del equipo pueda sufrir quemaduras. Es necesario recordar que el equipo no necesita manipulación manual de ninguno de sus accesorios puesto que todo se controla de forma automática desde el PC.

Tabla 20. Temperaturas superficiales medidas.

Nº de medición	Temperatura exterior del cilindro (°C)	Temperatura exterior tapa CAP (°C)	Temperatura exterior tapa roscada (°C)
1	53	47,6	40
2	53,2	47,8	39,9
3	54,6	47,8	40
4	53,7	51,9	39,5
5	53,9	51,6	38,9
6	53,6	51,2	39,2
7	51,6	50,5	38,9
8	51,3	44,5	40,2
Valor promedio	53,1	49,1	39,6

Tabla 21. Recopilación de cálculos y mediciones de temperaturas superficiales.

Tipo de datos	Temperatura exterior del cilindro (°C)	Temperatura exterior tapa CAP (°C)	Temperatura exterior tapa roscada (°C)
Calculados	59,21	26,82	26,82
Medidos	53,1	49,1	39,2
%Error	11,5%	45,37 %	31,58 %

Los errores de 45,37% y 31,58 % de las tapas pueden estar relacionados con el hecho que el modelo utilizado para calcular el coeficiente de transferencia de calor no es el adecuado dado que se utilizó uno para el cálculo de convección natural en placas verticales y en este problema se tienen discos verticales.

6.3 FLUJO DE VAPOR

El flujo de vapor es graduado por la válvula milimétrica manejada por medio de un motor paso a paso y mediante el módulo programado en LabVIEW. Debido a que no existen equipos para realizar una medición confiable de flujo de vapor en tuberías de 1/8 de pulgada, y dado que esto representaría la creación de un laboratorio completo para estimar el flujo real que suministra la válvula, no se realizaron medidas de comprobación para el flujo, pero teniendo en cuenta que la válvula viene ya calibrada por el fabricante para aplicaciones de medición de gases o vapores hasta temperaturas de 232 °C se toma como una referencia aproximada para la graduación del caudal necesario en las pruebas.

6.4 CÁLCULO DE LAS CONSTANTES DEL PID PARA EL CONTROL DE PRESIÓN

La sintonización de las constantes del PID para el control de presión se realizó mediante la herramienta de auto sintonía incluida en LabVIEW conocida como PID Autotuning, esta herramienta se utilizó desde el punto en que el equipo alcanza una presión del 90% de la presión de operación, debido a que en este 10 % se espera que el equipo llegue al punto de operación sin sobrepasarse, las constantes obtenidas en el proceso están consignadas en la Tabla 22.

Tabla 22. Constantes del PID.

Constantes del PID	valor
Kc	392,3115
Ti (min)	0,0686
Td (min)	0,015722

6.5 LÍMITES MÁXIMOS DE FLUJO DE VAPOR SEGÚN EL CONTROL Y LA POTENCIA DISPONIBLE

Para el cálculo máximo de flujo permitido a una presión de 150 PSI se realizaron los siguientes cálculos:

$$\dot{m} = \frac{\text{Potencia máxima}}{\text{entalpía de salida}} = \frac{Q}{h''_{@150 \text{ psi}}} = \frac{2000 \text{ vatios}}{2,782 * 10^6} = 0,000719 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{v} = \dot{m} * v''_{@150 \text{ PSI}} = 0,000719 * 0,1721 = 123,74 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{v} = 7424,4 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

Este valor corresponde al flujo máximo de vapor posible a la potencia de 2000 vatios que pueden suministrar las resistencias eléctricas, el flujo de agua correspondiente a este valor es de $43,257 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$, que es un valor muy superior al requerido en el diseño del equipo.

6.6 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL PID Y MEDICIÓN DE TEMPERATURAS DE OPERACIÓN

En la prueba realizada para la comprobación del PID se tomaron datos cada cinco minutos manteniendo un flujo de 4 cc/min equivalentes en vapor a 969,189 cc/min durante una hora y media, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 23.

Como puede observarse en la Tabla 23, la presión de operación del equipo se mantuvo con un margen de error inferior al 1% lo que evidencia que las constantes del PID son adecuadas.

Tabla 23. Datos de monitoreo temperatura, presión y porcentaje de error de la presión.

Tiempo transcurrido (min)	Presión (PSI)	Temperatura (°C)	% Error Presión
0	99,73	170,53	0,27
5	100,31	170,1	0,31
10	100,21	166,52	0,21
15	100,45	167,85	0,45
20	100,37	167,28	0,37
25	99,85	169,78	0,15
30	99,87	168,44	0,13
35	100,49	175,99	0,49
40	100,53	174,49	0,53
45	100,35	169,84	0,35
50	100,09	170,42	0,09
55	99,89	172,45	0,89
60	100,07	170,19	0,07
65	100,41	172,39	0,41
70	100,21	173,5	0,21
75	100,23	173,38	0,23
80	100,39	172,27	0,39
85	100,27	170,82	0,27
90	100,53	165,25	0,53
Promedio de los % error			0,33

Para la medición de temperatura es necesario resaltar que, aunque durante la prueba de hora y media realizada el funcionamiento fue adecuado, se presentaron inconvenientes debido a que en algunos momentos las tarjetas dejan de realizar la medición o se saturan arrojando valores erróneos, esto puede estar ocurriendo debido a una inadecuada instalación en el equipo de desplazamiento radial, para corregir este error y poder monitorear de mejor forma la temperatura se ha utilizado para las mediciones un FLUKE thermometers de la serie 51, que por ser un medidor externo brinda un monitoreo confiable. Por lo mencionado anteriormente se recomienda a futuro en las mejoras que se realicen al equipo la

implementación de medidores aislados de temperatura y en lo posible que sean RTD PT100 que se adaptan aun más al rango de medición de 0 a 200 °C y son más estables.

CONCLUSIONES

- ✓ El presente proyecto de grado fortaleció los lazos de colaboración entre la escuela de ingeniería mecánica y la escuela de ingeniería de petróleos a través del grupo de investigación de Recobro Mejorado, contribuyendo a la investigación de procesos de recobro térmico mediante la construcción de un generador de vapor eléctrico necesario para la realización de pruebas de laboratorio.
- ✓ Trabajar con vapor dificulta la selección de transductores puesto que las temperaturas y presiones manejadas limitan los dispositivos, haciendo más difícil su consecución en el mercado, aumentado el tamaño de los mismos y exigiendo la búsqueda de mecanismos de protección tanto para los transductores como para las tarjetas de adquisición de datos.
- ✓ Se pudo evidenciar la dificultad de controlar equipos que manejan vapor debido a las altas inercias térmicas de éste, permitiendo observar que aunque la técnica de control PID es muy utilizada y es de gran aplicabilidad en procesos de control para este caso fue necesario complementarla con una rutina adicional de control ON/OFF que funcione en aquellos momentos que se tiende a sobrepasar el valor de la presión debido también a la inercia del vapor y las resistencias eléctricas.
- ✓ Se presentó una gran dificultad en la regulación del flujo de vapor debido principalmente a que no existen medidores para tuberías tan pequeñas y por ello no es posible verificar la regulación de flujo de vapor, la búsqueda de soluciones permitió aplicar conceptos de mecánica de fluidos y adaptaciones de componentes mecánicos que permitieran hacer una regulación aproximada.

- ✓ La regulación aproximada de caudal de vapor de suministro se logró mediante la adecuación de una válvula milimétrica de aguja, que normalmente es utilizada para medición de caudales de gases o vapores en equipos médicos, de cuya apertura y cierre se encarga un motor paso a paso que se controla mediante una rutina en LabVIEW que calcula, según el flujo de vapor requerido, cuánto debe abrir la válvula en vueltas y que con ese dato el control envía la cantidad de pulsos y el sentido de giro al motor para llegar a dicha posición.
- ✓ Al llevar a cabo el control automático sobre un equipo es importante saber los rangos de funcionamiento de las tarjetas de adquisición datos pues en la mayoría de los casos la señal emitida por los transductores se encuentra fuera de los rangos máximos permitidos de las mismas, lo que implica el diseño y construcción de circuitos electrónicos de adecuación de señal generalmente a niveles de voltaje más bajos.
- ✓ El control PID de presión es un mecanismo de control bastante bueno porque aunque se observó que el sistema oscila, lo hace en baja amplitudes manteniendo en valores muy bajos la desviación del sistema con respecto al set point cumpliendo con el requerimiento de mantener el error en rangos aceptables.
- ✓ Se desarrollaron los planos de construcción y ensamblaje del equipo explicando los procesos de mecanizado llevados a cabo en la fabricación de las piezas y se dieron indicaciones para el adecuado montaje de cada una de las etapas de construcción del generador de vapor.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda a futuro realizar la construcción del generador de vapor en acero inoxidable como se dispuso inicialmente en el diseño del equipo, teniendo en cuenta que en este material no sólo deben construirse el cuerpo del tanque sino también todos los accesorios como los son uniones, componentes y tuberías, esto prolonga la vida del equipo, mejora las condiciones de mantenimiento y hace más confiables las pruebas de inyección de vapor.
- ✓ Se recomienda conseguir sensores de nivel internos puesto que los sensores capacitivos hacen que el equipo ocupe más espacio y se vuelva más vulnerable a presentar fugas por la implementación de un nivel de vidrio que requiere una serie de acoples que necesitan de una mayor precisión en el montaje y ajuste.
- ✓ Se recomienda implementar sensores de temperatura con medidores o indicadores externos aislados en lo posible PT100 puesto que las termocuplas son medidores bastante inestables y que para el caso de la aplicación donde el calentamiento del equipo es realizado por medio de resistencias eléctricas presentan alteraciones debidas al ruido que produce la conexión de corriente alterna sobre el cuerpo del tanque.
- ✓ Se recomienda acoplar el sensor diferencial de presión del equipo de desplazamiento radial (EDR) con el generador de vapor, para que este realice la regulación de caudal de forma automática por medio del módulo que controla la válvula milimétrica, conjuntamente se deben habilitar las válvulas de entrada de agua y salida de vapor que en el software se encuentran como elementos indicadores, pero que en el EDR están implementadas.

BIBLIOGRAFÍA

BOTON GARCIA, Liliana y **PACHECO GOMEZ**, Erika Andrea. “Simulación numérica de la inyección cíclica de vapor previa a procesos de inyección continua”. Tesis de ingeniería de petróleos. Facultad de ingenierías físico-químicas. UIS. 2007. pp. 235.

CENGEL Yunus A. y Boles Michael A., “Termodinámica”, Mc. Graw Hill, México, Segunda edición.1996.

CENGEL Yunus A. y Boles Michael A., “Transferencia de calor”, Mc. Graw Hill, México, Tercera edición. 2007.

CONAE. Ficha técnica de procesos térmicos. comisión nacional para el ahorro de energía.

CRANE, División de Ingeniería. Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. Mc. Graw Hill. 1987.

GREENE; Richard. Válvulas: Selección, Uso y Mantenimiento. Mc. Graw Hill. 1992.

INCROPERA, Frank P. Fundamentos de transferencia de calor. School of Mechanical Engineering Produce University. Cuarta edición,1996.

KATSUHIKO; Ogata. Dinámica de sistemas. Pearson Prentice Hall. Tercera edición. 1987.

KATSUHIKO; Ogata. Ingeniería de control moderna. Pearson Prentice Hall. Tercera edición. 1998.

LAJARA VISCAINO, José y PELEGRÍ SEBASTIÁ, José. "LabVIEW entorno gráfico de programación". Alfa omega Marcombo. 2007.

MEGYESY; Eugene F. manual de recipientes a presión diseño y cálculo. Limusa, grupo Noriega editores. Primera edición. 1989.

MILLS, Anthony F. Transferencia de calor. University of California, Los Ángeles. Primera Edición, 1999.

NORMA ASME. Boiler and PressureVessel Code sección 8 división 1: julio 1, 2007.

QING, GUO WANG, Zhen Ye, Wen Jian Cai y Chang Chieh Hang. "PID control for multivariable procesess". Springer. 2008.

SALAGER, Jean Louis. "recuperación mejorada del petróleo", módulo de enseñanza, Facultad de ingeniería. Escuela de ingeniería química. Universidad de Mérida, Venezuela. 2005, pp. 35.

SMITH, Carlos y CORRIPIO, Armando. Control Automático de Procesos, Aplicaciones y Prácticas. Limusa. Primera edición. 1991.

SPIRAX SARCO, calderas [en línea]: [fecha de consulta: 16 de octubre 2009].
Disponible en: <http://www.spiraxsarco.com/>

THE BADCOCK AND WILCOX COMPANY a McDermott company. "Steam its generation and use". J.B. Kitto and S.C. Stultz. 2005.

ANEXOS

ANEXO A. Propiedades de los materiales acero al carbono y de bajo contenido de elementos de aleación.



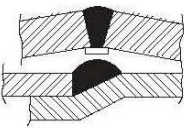

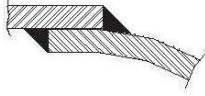
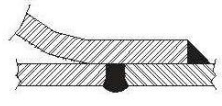
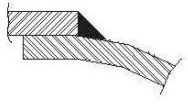
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ACERO AL CARBONO Y DE BAJO CONTENIDO DE ELEMENTOS DE ALEACIÓN*				
Forma	Composición nominal	Especificación		Aplicación
		Número	Grado	
Placa	C	SA-283	C	Calidad estructural. Para recipientes a presión puede usarse con limitaciones; ver nota 1
	C	SA-285	C	Calderas para servicio estacionario y otros recipientes a presión
	C-Si	SA-515	55	Principalmente para servicio a temperatura media y alta
	C-Si	SA-515	60	
	C-Si	SA-515	65	
	C-Si	SA-515	70	
	C-Si	SA-516	55	Para servicio a temperatura moderada y baja
	C-Si	SA-516	60	
	C-Mn-Si	SA-516	65	
	C-Mn-Si	SA-516	70	
Bridas y accesorios	C-Mn-Si	SA-105		Para servicios a alta temperatura
	C-Si	SA-181	I	Para servicio general
	C-Mn	SA-350	LF1	Para servicio a baja temperatura
	C-Mn-Si		LF2	
Tubería	C-Mn	SA-53	B	Para servicio general
	C-Mn	SA-106	B	Para servicios a alta temperatura
Tornillería	1Cr-1/5 Mo.	SA-193	B7	Para servicio a alta temperatura; tornillos pasantes de 2 1/2 pulgada de diámetro o menos
		SA-194	2H	Para tuercas para servicio a alta temperatura
		SA-307	B	Tornillo de máquina para uso general

Fuente:* Datos de los materiales de uso más frecuentes tomados de las normas ASME, secciones II y VIII.

ANEXO B. Propiedades de los materiales: acero al carbono y de bajo contenido de aleación.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES: ACERO AL CARBONO Y DE BAJO CONTENIDO DE ALEACIÓN Valores máximos de esfuerzo permitido a tensión de 1000 lb/pulg²*												
Especificación		Para temperatura del metal no mayor de, grados F										
Número	Grado	-20 a 650	700	750	800	850	900	950	1050	1100	1150	1200
SA-283	C	12,7										
SA-285	C	13,8	13,3	12,1	10,2	8,4	6,5					
SA-515	55	13,8	13,3	12,1	10,2	8,4	6,5	4,5	2,5			
SA-515	60	15,0	14,4	13,0	10,8	8,7	6,5	4,5	2,5			
SA-515	65	16,3	15,5	13,9	11,4	9,0	6,5	4,5	2,5			
SA-515	70	17,5	16,6	14,8	12,0	9,3	6,5	4,5	2,5			
SA-516	55	13,8	13,3	12,1	10,2	8,4	6,5	4,5	2,5			
SA-516	60	15,0	14,4	13,0	10,8	8,7	6,5	4,5	2,5			
SA-516	65	16,3	15,5	13,9	11,4	9,0	6,5	4,5	2,5			
SA-516	70	17,5	16,6	14,8	12,0	9,3	6,5	4,5	2,5			
SA-105		17,5	16,6	14,8	12,0	9,3	6,5	4,5	2,5			
SA-181	I	15,0	14,4	13,0	10,8	8,7	6,5	4,5	2,5			
SA-350	LF1	15,0	14,4	13,0	10,8	7,8	5,0	3,0	1,5			
	LF2	17,5	16,6	14,8	12,0	7,8	5,0	3,0	1,5			
SA-53	B	15,0	14,4	13,0	10,8	8,7	6,5					
SA-106	B	15,0	14,4	13,0	10,8	8,7	6,5	4,5	2,5			
SA-193	B7	25,0	25,0	23,6	21,0	17,0	12,5	8,5	4,5			
SA-194	2H											
SA-307	B											
* Los Valores de esfuerzo de esta tabla pueden interpolarse para determinar los valores para temperaturas intermedias.												
Fuente:* Datos de los materiales de uso más frecuentes tomados de las normas ASME, secciones II y VIII.												

ANEXO C. Eficiencia de soldaduras.

	EFICIENCIA DE SOLDADURAS VALORES DE "E"	NORMAS		
		FIGURA No. 1		
TIPOS DE UNIONES NORMA UW-12		EFICIENCIA DE LA UNION CUANDO LA JUNTA ESTA RADIOGRAFIADA		
		AL 100 %	POR PUNTOS	SIN
	SOLDADURA A TOPE UNIDA CON SOLDADURA POR AMBOS LADOS, O BIEN POR OTRO METODO CON LO CUAL SE OBTENGA LA MISMA CALIDAD DEL METAL DE APORTE EN AMBOS LADOS DE LA SUPERFICIE SOLDADA. SI SE USA LA SOLERA DE RESPALDO, DEBERA QUITARSE DESPUES DE APLICAR LA SOLDADURA Y ANTES DE RADIOGRAFIAR.	1.00	0.85	0.70
	SOLDADURA SIMPLE A TOPE CON SOLERA DE RESPALDO LA CUAL PERMANECERA EN EL INTERIOR DEL RECIPIENTE.	0.90	0.80	0.65
	UNION SIMPLE POR UN SOLO LADO SIN SOLERA DE RESPALDO	---	---	0.60
	UNION TRASLAPADA CON DOBLE FILETE	---	---	0.55
	UNION TRASLAPADA CON FILETE SENCILLO Y TAPON DE SOLDADURA	---	---	0.50
	UNION TRASLAPADA CON FILETE SENCILLO SIN TAPON DE SOLDADURA	---	---	0.45

ANEXO D. Hoja de datos sensor de presión.

Industrial pressure transmitter

REF: 92070
92073
92075
92077
92079
92081
92095

PT124B-210 Series

Features & Benefits

Stainless steel wetted parts
Excellent resistance to corrosive
Small figure design, any position to install
Various signal output
OEM process to fit application of the customers



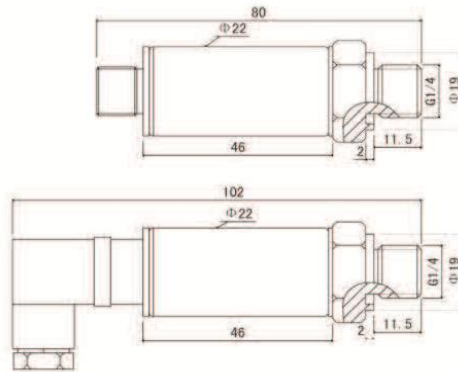
Descriptions

PT124B-210 Series industrial pressure transmitter adopt high performance chips, and deal with the special amplified chip, integrative configuration, and smart profile, they are widely used in the field of hydraulic pressure, medicament and sanitation, constant pressure water supply system and so on.

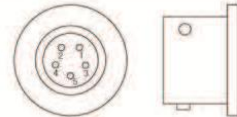
Specifications

Ranges: -100KPa~0KPa~2500bar
Combined error: $\pm 0.25\%FS$; $\pm 0.5\%FS$, $\pm 1.0\%FS$
Output: 4~20mA, 0~20mA, 0~5V, 0~10V
Adjustment Zero and Span
Input voltage: 24Vdc (10~36Vdc)
Operating temperature: $-40^{\circ}C \sim 125^{\circ}C$ ($104^{\circ}F \sim 257^{\circ}F$)
Over pressure: 1.5×FS
Electric connection: M12 connector, five Pin bendix connector, Hirschmann and direct down-lead
Process connection: G1/4, M20×1.5, 1/4NPT (Customized)

Dimensions



Models	Lead	Color	5 PIN
Output: 4-20mA M12 × I	Excitation +/ Signal +	Red	2
PT124B Series	Excitation -/ Signal -	Black	1



ANEXO E. Hoja de datos sensor de nivel.

Proximity Sensors Capacitive Thermoplastic Polyester Housing Type CA, M18, DC

TRIPLESIELD™



- Featuring **TRIPLESIELD™** sensor protection
- Adjustable sensing distance 3-8 mm or 3-12 mm
- Rated operational voltage: 10-40 VDC
- Output: DC 200 mA, NPN or PNP
- Make and break switching function
- LED indication
- High noise immunity
- Flush and non-flush types
- Plug and cable versions

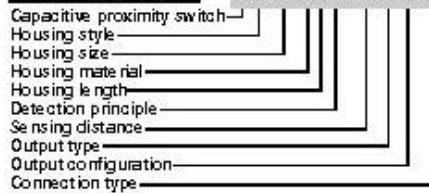
Product Description

Capacitive proximity switches with either sensing distance 8 mm flush mounted in metal or sensing distance 12 mm non-flush mounted. 4-wire DC output with both make (NO) and

break (NC) switching. Grey M18 polyester housing with 2 m PVC cable or M12 plug. Ideal for use in level and plastic machinery applications.

Ordering Key

CA18CLN12NAM1



Type Selection

Housing diameter	Rated operating dist. (S _a) ¹⁾	Mounting	Ordering no. Transistor NPN/cable Make & break switching	Ordering no. Transistor NPN/plug Make & break switching	Ordering no. Transistor PNP/cable Make & break switching	Ordering no. Transistor PNP/plug Make & break switching
M18	8 mm	Flush (p/it in)	CA18CLF08NA	CA18CLF08NAM1	CA18CLF08PA	CA18CLF08PAM1
M18	12 mm	Non-flush	CA18CLN12NA	CA18CLN12NAM1	CA18CLN12PA	CA18CLN12PAM1

¹⁾ Object: Grounded steel plate

Specifications

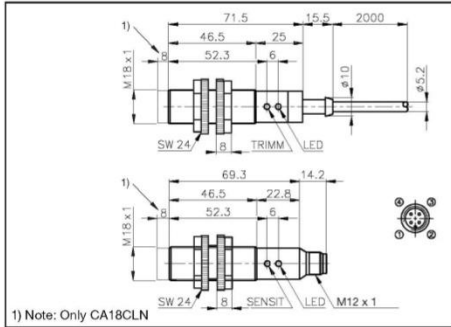
Rated operating dist. (S _a) CA18CLF08	3 to 8 mm factory set at 8 mm	Indication for output ON	LED, yellow
CA18CLN12	3 to 12 mm factory set at 12 mm	Environment	
Sensitivity	Adj. 270° turn pot. meter	Degree of protection	IP 67 (Nema 1, 3, 4, 6, 13)
Effective operation dist. (S _e)	0.9 x S _a ≤ S _e ≤ 1.1 x S _a	Temperature	
Usable operation dist. (S _u)	0.8 x S _a ≤ S _u ≤ 1.2 x S _a	Operating temperature	-25° to +80°C (-13° to +176°F)
Repeat accuracy (R)	± 5%	Storage temperature	-40° to +85°C (-40° to +185°F)
Hysteresis (H)	4 to 20% of sensing distance	Housing material	
Rated operational volt. (U _o)	10 to 40 VDC (ripple included)	Body	Grey, thermoplastic polyester
Ripple	± 10%	Front	Grey, polyester
Rated operational current (I _o) Continuous	≤ 200 mA	Cable end	Polyester
No-load supply current (I _o)	≤ 10 mA	Nuts	Black, reinforced nylon
Voltage drop (U _d)	≤ 2.5 VDC at max. load	Connection	
Protection	Reverse polarity, short-circuit, transients	Cable	Grey, 2 m, 4 x 0.34 mm ² Oil proof PVC
Frequency of operating cycles (†)	30 Hz	Plug (M1)	M12 x 1
		Cable for plug (M1)	CON.1A-series
		Weight	
		Cable version	110 g
		Plug version	30 g
		Approvals	UL, CSA
		CE-marking	Yes

Specifications are subject to change without notice (20.08.01)

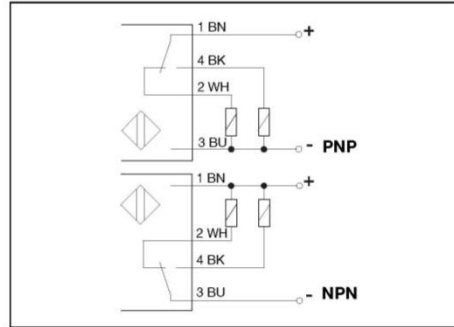
1



Dimensions



Wiring Diagrams

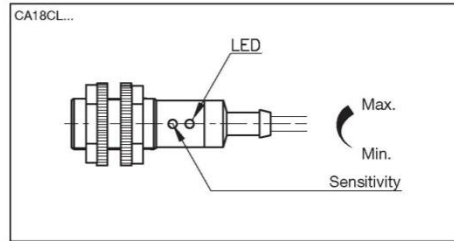


Adjustment Guide

The environments in which capacitive sensors are installed can often be unstable regarding temperature, humidity, object distance and industrial (noise) interference. Because of this, Carlo Gavazzi offers as standard features in all TRIP-LESHIELD™ capacitive sensors a user-friendly sensitivity adjustment instead of having a fixed sensing range, extended sensing range to accom-

modate mechanically demanding areas, temperature stability to ensure minimum need for adjusting sensitivity if temperature varies and high immunity to electromagnetic interference (EMI).

Note: Sensors are factory set (default) to maximum rated sensing range.



Installation Hints

Capacitive sensors have the unique ability to detect almost all materials, either in liquid or solid form. Capacitive sensors can detect metallic as well as non-metallic objects, however, their traditional use is for non-metallic materials such as:

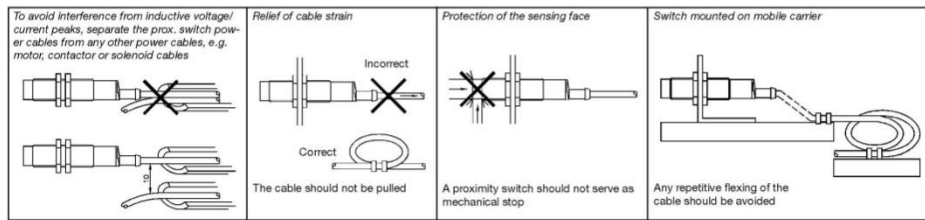
- **Plastic Industry**
Resins, regrinds or moulded products.

- **Chemical Industry**
Cleansers, fertilisers, liquid soaps, corrosives and petrochemicals.
- **Wood Industry**
Saw dust, paper products, door and window frames.
- **Ceramic & Glass Industry**
Raw material, clay or finished products, bottles.

- **Packaging Industry**
Package inspection for level or contents, dry goods, fruits and vegetables, dairy products.

Materials are detected due to their dielectric constant. The bigger the size of an object, the higher the density of material, the better or easier it is to detect the object. Nominal sensing distance for a capaci-

tive sensor is referenced to a grounded metal plate (ST37). For additional information regarding dielectric ratings of materials please refer to Technical Information.



ANEXO F. Controlador de ángulo de fase digital.

VARIADOR DE POTENCIA 1 FASE INTEGRADO
CONTROL POR ANGULO DE FASE MICROCONTROLADO
25-40 Arms 220VAC SALIDA POR ALTERNISTOR



MODELOS DE 50-75-90-110 Arms. **500 VAC** SALIDA SCR

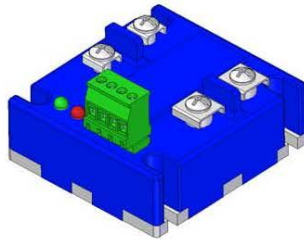
CONTROL:

A- Potenciómetro

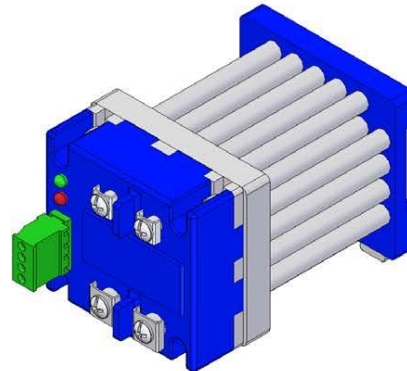
B- 4-20mA.

C-. 5V-10V

D-. 1-2 KHz.



MONTAJE SUGERIDO CON
DISIPADOR HS-OPT-02



CARACTERISTICAS:

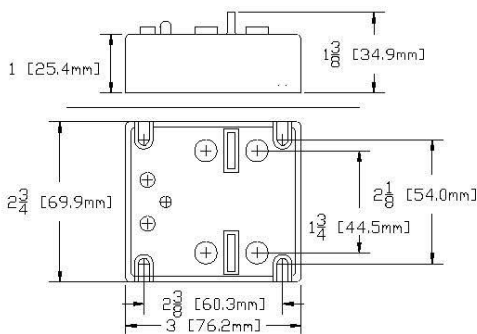
- Dimmer con precisión de 1024 posiciones para modelos OPS y OPV. 818 Posiciones para modelos 4-20mA y 500 posiciones para modelos 1-2KHz.
- Sistema de detección de cruce por cero multivoltaje.
- Corrimiento de fase Totalmente lineal.
- Platina de sujecion en Aluminio fabricada en CNC.
- Conector rápido Phoenix Contact.
- Fabricado con optoacoplador con $dv/dt = 10000v/us$.
- Se recomiendan los disipadores HS-OPT-02 y HS-OPT-03.

DESCRIPCION:

Los variadores de potencia de estado sólido por control de fase microcontrolados son destinados a procesos industriales en donde se requiere alta precisión. La salida en estado sólido, permite ajustar la potencia en un rango lineal de 0 a 100% del voltaje aplicado, posibilitando un ajuste perfecto de la temperatura deseada.

Estos dispositivos proporcionan un aumento de la vida útil de los elementos de calentamiento al funcionar en voltaje reducido constante, sin conmutaciones.

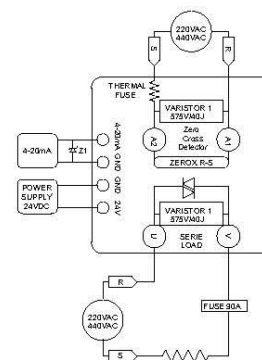
DIMENSIONES



MODELOS DE CONTROL DE FASE MICROCONTROLADO, ENTRADA 4-20mA, SALIDA PROPORCIONAL 110/220/440VAC

MODELO	Corriente De Carga (Arms)	Control	Voltaje de Linea (VACrms)	I2t Para Fusibles (Amp2.sec)
OPI48P25G	25	4-20mA	90-500	340
OPI48P40G	40	4-20mA	90-500	880
OPI48P50G	50	4-20mA	90-500	1680
OPI48P65G	65	4-20mA	90-500	3750
OPI48P75G	75	4-20mA	90-500	5400
OPI48P90G	90	4-20mA	90-500	6000
OPI48P110G	110	4-20mA	90-500	6600

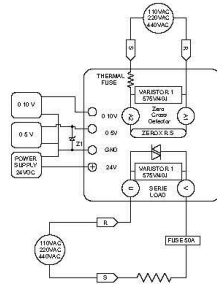
ESQUEMA DE CONTROL POR CORRIENTE 4-20mA



MODELOS DE CONTROL DE FASE MICROCONTROLADO, ENTRADA 0-10VDC, SALIDA PROPORCIONAL 110/220/440VAC

MODELO	Corriente De Carga (Arms)	Control Vdc	Voltaje de Linea (VACrms)	I2t Para Fusibles (Amp2. seg)
OPS48P25G	25	0-10	90-575	340
OPS48P40G	40	0-10	90-575	880
OPS48P50G	50	0-10	90-575	1680
OPS48P65G	65	0-10	90-575	3750
OPS48P75G	75	0-10	90-575	5400
OPS48P90G	90	0-10	90-575	6000
OPS48P110G	110	0-10	90-575	6600

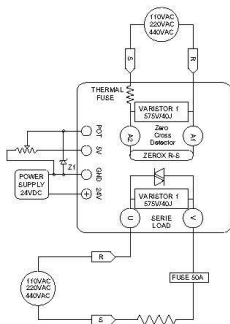
ESQUEMA DE CONTROL VOLTAJE 0-5 y 0-10Vdc



MODELOS DE CONTROL DE FASE MICROCONTROLADO, ENTRADA POTENCIOMETRO, SALIDA PROPORCIONAL 110/220/440VAC

MODELO	Corriente De Carga (Arms)	Potenciometro (Kohm)	Voltaje de Linea (VACrms)	I2t. Para Fusibles (Amp2. seg)
OPV48P25G	25	Pot 10K	90-575	340
OPV48P40G	40	Pot 10K	90-575	880
OPV48P50G	50	Pot 10K	90-575	1680
OPV48P65G	65	Pot 10K	90-575	3750
OPV48P75G	75	Pot 10K	90-575	5400
OPV48P90G	90	Pot 10K	90-575	6000
OPV48P110G	110	Pot 10K	90-575	6600

ESQUEMA DE CONTROL POR POTENCIOMETRO



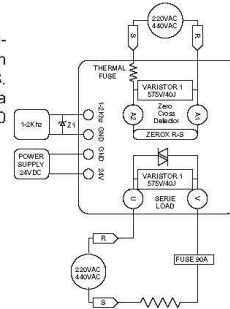
ESQUEMA DE CONTROL POR FRECUENCIA 1-2 KHZ

MODELOS DE CONTROL DE FASE MICROCONTROLADO, ENTRADA 1-2Khz, SALIDA PROPORCIONAL 110/220/440VAC

MODELO	Corriente De Carga (Arms)	Control por frecuencia	Voltaje de Linea (VACrms)	I2t Para Fusibles (Amp2. seg)
OPF48P25G	25	1-2Khz	90-575	340
OPF48P40G	40	1-2Khz	90-575	880
OPF48P50G	50	1-2Khz	90-575	1680
OPF48P65G	65	1-2Khz	90-575	3750
OPF48P75G	75	1-2Khz	90-575	5400
OPF48P90G	90	1-2Khz	90-575	6000
OPF48P110G	110	1-2Khz	90-575	6600

EQUIPOS CON ENTRADA 1-2Khz

Estos equipos son ideales para atenuación de voltaje (110, 220 ó 440vac) con señales de salida de PLC DIGITALES. Ejemplo: una salida de 1500hz dara como resultado un control de fase a 90 grados y una potencia de 50%.



FUNCIONAMIENTO:

La instalación de equipos tiene importantes detalles como se indica a continuación

Haga la conexión con las fuentes desenergizadas.

Efectúe los siguientes pasos:

- 1-. Energice la fuente de 24 V. El led de POWER ON se encenderá.
- 2-. Conecte R y S en A1 y A2 respectivamente. Esta señal será necesaria para la detección de cruce por cero. Observe que internamente se encuentran un varistor (Metal Oxide Varistors MOV's) de 575 Voltios 40 Joules y un fusible térmico para la protección de transientes de voltaje entre A1 y A2.
- 3-. Conecte la carga en serie con un fusible rápido para proteger el semiconductor (triac o SCR) en las terminales U y V. Observe que internamente se encuentra un varistor (Metal Oxide Varistors MOV's) de 575 Voltios 40 Joules para la protección de transientes de voltaje por el lado de potencia.
- 4-. Conecte la señal de entrada 4-20 mA, 0-10Vdc, Pot, 1-2Khz.
- 5-. Conecte una bombilla de Prueba como carga (LOAD). Varíe la señal de entrada 4-20 mA, 0-10Vdc ó Pot. y la bombilla deberá cambiar de intensidad.
- 6-. Conecte la carga definitiva y varíe la señal de entrada 4-20 mA, 0-10Vdc ó Pot. Deberá variar la corriente y el voltaje en la carga LOAD.
- 7-. Los dos varistores (Metal Oxide Varistors MOV's) de 575 Voltios 40 Joules, el 575L40 de HARRIS estan insertados internamente para proteger el equipo de transientes de voltaje.

NOTA DE APLICACION No.500



CONTROL DE FASE TRIFASICO CON 3 EQUIPOS MONOFASICOS.

A- MONTAJE DE UN OPI48P40G Y DOS OPS48P40G PARA CONTROL DE CARGAS TRIFASICAS EN DELTA

FUNCIONAMIENTO

La instalación de los tres equipos de la siguiente figura tiene varias utilidades:

- Un sistema de control de fase trifásico Modular
- Facil intercambio de repuestos.
- Control unico de 4-20mA.

Como puede observarse se tienen tres equipos con sus tres cruces correspondientes R-S, S-T y T-R los cuales conmutan tres resistencias separadas (Delta abierta) instaladas en las respectivas líneas R-S, S-T y T-R.

El primer equipo es un OPI48P40G con entrada 4-20mA. Internamente este posee una resistencia de precisión de 250 ohm. Esto quiere decir que si:

se le suministran 4 mA el equipo marca en el borme de entrada

$$V=250\text{ohm} * 4\text{mA} = 1\text{voltio.}$$

se le suministran 20mA el equipo marca en el borme de entrada

$$V=250\text{ohm} * 20\text{mA} = 5\text{voltios.}$$

Al conectar "en paralelo la entrada 4-20mA y GND con las entradas de los dos equipos OPS48P40G-Esp con entrada 1-5Voltios DC hacemos que los tres equipos reciban el control de 4-20mA y entreguen un control de fase sincronizado a las tres resistencias de potencia.

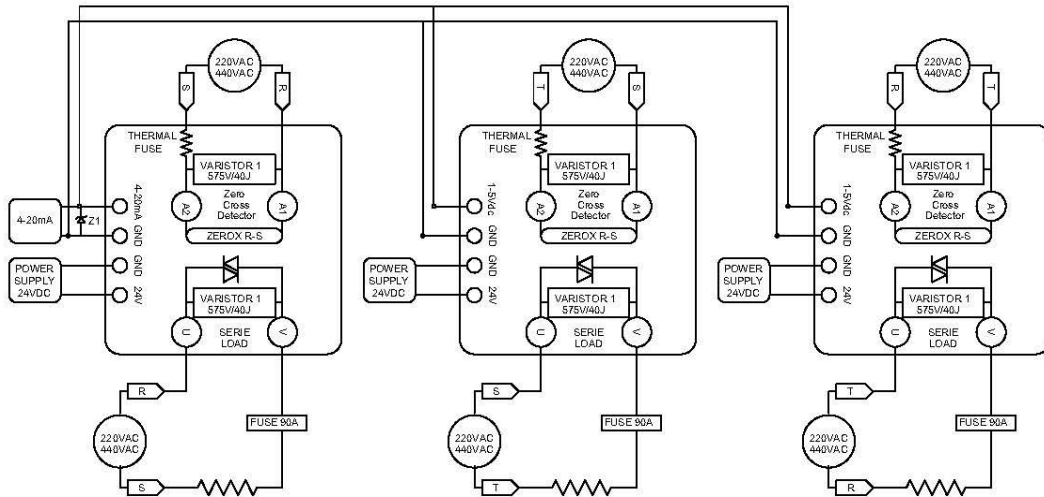
INSTALACION

La instalación de equipos tiene importantes detalles como se indica a continuación

Haga la conexión con las fuentes desenergizadas.

Efectúe los siguientes pasos:

- Energice la fuente de 24 V. El led de POWER ON de los tres equipos se encenderá.
- Conecte R y S en A1 y A2 respectivamente. Esta señal será necesaria para la detección de cruce por cero. Observe que internamente se encuentran un varistor (Metal Oxide Varistors MOV's) de 575 Voltios 40 Joules y un fusible térmico para la protección de transientes de voltaje entre A1 y A2. Conecte S-T Y T-R en los equipos OPS48P40G-Esp
- Conecte la carga en serie con un fusible rápido para proteger el semiconductor (triac o SCR) en las terminales U y V. Observe que internamente se encuentra un varistor (Metal Oxide Varistors MOV's) de 575 Voltios 40 Joules para la protección de transientes de voltaje por el lado de potencia.
- Conecte la señal de entrada 4-20 mA.
- Conecte tres bombillas de Prueba como carga (LOAD). Varie la señal de entrada 4-20 mA y las bombillas deberán cambiar de intensidad.
- Conecte la carga definitiva y varíe la señal de entrada 4-20 mA. Deberá variar la corriente y el voltaje en la carga LOAD.
- Los dos varistores (Metal Oxide Varistors MOV's) de 575 Voltios 40 Joules, el 575L40 de HARRIS estan insertados internamente para proteger el equipo de transientes de voltaje en el cruce por cero y en el TRIAC de cada equipo.

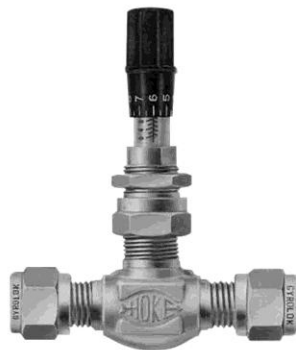


ANEXO G. Válvula milimétrica Hoke.



Milli-Mite® serie 1300

Válvulas de medición forjadas



Aplicaciones típicas

- Medición fina en análisis médicos o bioquímicos de gases o vapores.
- Toma de muestras y análisis de contaminación del aire y del agua.
- Cromatógrafos, espectrómetros de masas y otros instrumentos donde se requiere una medición fina.

Datos técnicos

CUERPO*	Acero inoxidable 316, latón
PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN A 70° F (21° C)	Latón <ul style="list-style-type: none">• 3000 psig (207 bar) Acero inoxidable 316 <ul style="list-style-type: none">• 5000 psig (345 bar)
RANGO DE TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	Latón <ul style="list-style-type: none">-65 a 400° F (-54° a 204° C) Acero inoxidable 316 <ul style="list-style-type: none">-65° a 450° F (-54° a 232° C)
ORIFICIO	0.047" (1.19 mm)
COEFICIENTE CV	Vástago 1", Cv = 0.010 Vástago 3", Cv = 0.024

Consulte en fábrica por otros materiales

Características y beneficios

- Exactitud en la medición gracias a su vástago con 18 vueltas de desplazamiento que brinda un funcionamiento y una repetibilidad inigualables.
- Los vástagos de 1" y 3" proporcionan amplio rango de caudal con un control de medición ultra fino.
- Montaje en panel estándar en todas las válvulas.
- La precisión del orificio y las tolerancias ajustadas de las roscas minimizan la histéresis.
- La manija con vernier micrométrico facilita el control visual y la repetibilidad de los ajustes del vástago.
- La oblea de empaque Dyna-Pak® por debajo de las roscas proporciona un sello hermético.
- Rosca NPT especial, de gran tolerancia.

válvulas de medición

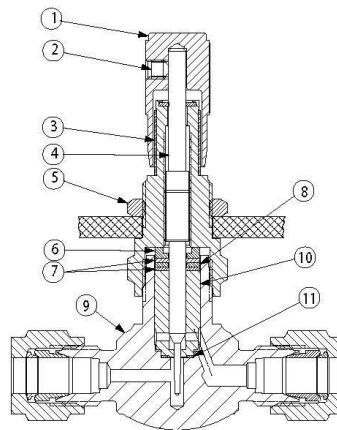
HOKE Incorporated

405 Centura Court • PO Box 4866 • Spartanburg, SC 29303
Teléfono (864) 574-7966 Fax (864) 587-5608
www.hoke.com • sales@hoke.com

Milli-Mite® serie 1300

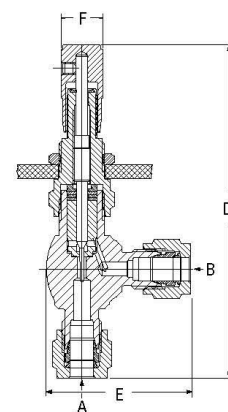
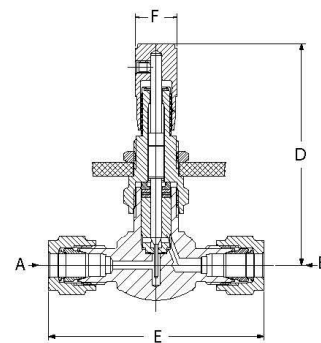
Materiales utilizados

	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	Manija anodizada negra	Aleación de aluminio
2	Prisionero	Aleación de acero
3	Manguito graduado	AISI-302
4	Vástago de medición	AISI-316
5	Tuerca para panel	Latón
6	Espaciador superior	AISI-316
7	Oblea de empaque Dyna-Pak®	Teflon®
8	Espaciador inferior	AISI-316
9	Cuerpo	Acero inoxidable 316 o latón
10	Asiento y espaciador integrados	AISI-316
11	Sello del orificio	Teflon®



Dimensiones

PASO DE CAUDAL	CONEXIONES		DIMENSIONES		
	ENTRADA A	SALIDA B	D	E	F
RECTO	Hembra NPT 1/8"	Hembra NPT 1/8"	2.83"	1.75"	0.50" 13 mm
	Macho NPT 1/8"	Macho NPT 1/8"	72 mm	44 mm	
	Macho NPT 1/8"	Gyrolok® 1/8"	3.25"	1.75"	
	Macho NPT 1/8"	Gyrolok® 1/8"	83 mm	44 mm	
	Macho NPT 1/4"	Macho NPT 1/4"	3.25"	2.13"	
	Macho NPT 1/4"	Macho NPT 1/4"	83 mm	54 mm	
	Gyrolok® 1/8"	Gyrolok® 1/8"	3.25"	1.75"	
	Gyrolok® 1/8"	Gyrolok® 1/8"	83 mm	44 mm	
	Gyrolok® 1/4"	Gyrolok® 1/4"	3.25"	2.38"	
EN ÁNGULO	Gyrolok® 1/4"	Gyrolok® 1/4"	83 mm	60 mm	0.50" 13 mm
	Gyrolok® 3 mm	Gyrolok® 3 mm	3.25"	2.38"	
	Gyrolok® 3 mm	Gyrolok® 3 mm	83 mm	60 mm	
	Gyrolok® 6 mm	Gyrolok® 6 mm	3.25"	2.38"	
	Gyrolok® 6 mm	Gyrolok® 6 mm	83 mm	60 mm	
	Hembra NPT 1/8"	Hembra NPT 1/8"	3.75"	1.28"	
	Macho NPT 1/8"	Gyrolok® 1/8"	95 mm	33 mm	
	Gyrolok® 1/8"	Gyrolok® 1/8"	3.75"	1.28"	
	Gyrolok® 1/8"	Gyrolok® 1/8"	95 mm	33 mm	
EN ÁNGULO	Gyrolok® 1/8"	Gyrolok® 1/8"	4.00"	1.63"	0.50" 13 mm
	Gyrolok® 1/4"	Gyrolok® 1/4"	102 mm	41 mm	
	Gyrolok® 1/4"	Gyrolok® 1/4"	4.00"	1.63"	
	Gyrolok® 1/4"	Gyrolok® 1/4"	102 mm	41 mm	
	Gyrolok® 3 mm	Gyrolok® 3 mm	3.25"	1.38"	
	Gyrolok® 3 mm	Gyrolok® 3 mm	83 mm	41 mm	
Gyrolok® 6 mm	Gyrolok® 6 mm	3.25"	1.38"		
Gyrolok® 6 mm	Gyrolok® 6 mm	83 mm	41 mm		



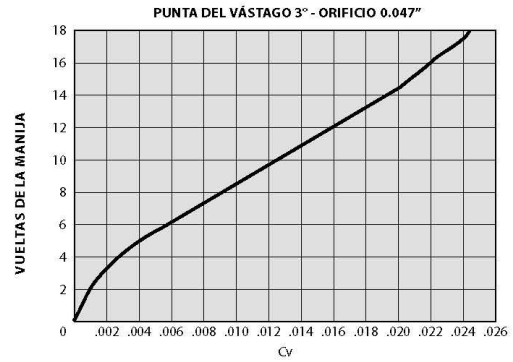
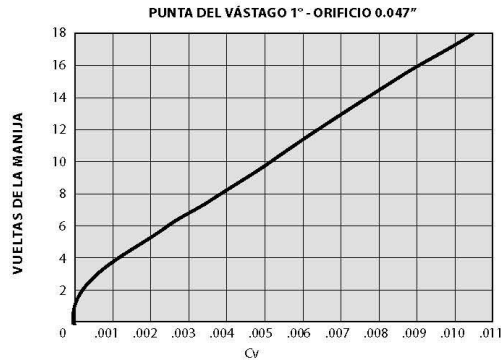
Las dimensiones solo son a título de referencia y están sujetas a cambios.

Montaje en panel

Orificio en el panel = 0.52" (13 mm) de diámetro
Espesor máximo del panel = 0.16" (4 mm)

Milli-Mite® serie 1300

Curvas de flujo indicativas



Códigos para efectuar pedidos

PASO DE CAUDAL	CONEXIONES		PEDIR POR NÚMERO			
	ENTRADA A	SALIDA B	VÁLVULAS DE AISI-316		VÁLVULAS DE LATÓN	
			VÁSTAGO 1° CV = 0.010	VÁSTAGO 3° CV = 0.024	VÁSTAGO 1° CV = 0.010	VÁSTAGO 3° CV = 0.024
RECTO	Hembra NPT 1/8"	Hembra NPT 1/8"	—	1315F2Y	—	—
	Macho NPT 1/8"	Gyrolok® 1/8"	—	—	1335H2B	1315H2B
	Macho NPT 1/8"	Macho NPT 1/8"	—	—	1335M2B	1315M2B
	Macho NPT 1/4"	Macho NPT 1/4"	1335 M4Y	1315M4Y	1335M4B	1315M4B
	Gyrolok® 1/8"	Gyrolok® 1/8"	1335G2Y	1315G2Y	1335G2B	1315G2B
	Gyrolok® 3/4"	Gyrolok® 3/4"	1335G4Y	1315G4Y	1335G4B	1315G4B
	Gyrolok® 3 mm	Gyrolok® 3 mm	1335G3YMM	1315G3YMM	—	—
	Gyrolok® 6 mm	Gyrolok® 6 mm	1335G6YMM	1315G6YMM	—	—
EN ÁNGULO	Hembra NPT 1/8"	Hembra NPT 1/8"	—	—	1345F2B	1325F2B
	Macho NPT 1/8"	Gyrolok® 1/8"	1345H2Y	1325H2Y	1345H2B	1325H2B
	Gyrolok® 1/8"	Gyrolok® 1/8"	1345G2Y	1325G2Y	1345G2B	1325G2B
	Gyrolok® 3/4"	Gyrolok® 3/4"	1345G4Y	1325G4Y	1345G4B	1325G4B
	Gyrolok® 3 mm	Gyrolok® 3 mm	1345G3YMM	1325G3YMM	—	—
	Gyrolok® 6 mm	Gyrolok® 6 mm	1345G6YMM	1325G6YMM	1345G6BMM	1325G6BMM
	Hembra NPT 1/8"	Hembra NPT 1/8"	—	—	1345F2B	—
	Hembra NPT 1/8"	Hembra NPT 1/8"	—	—	1345F2B	—

PARA SU SEGURIDAD

EL DISEÑADOR Y EL USUARIO DEL SISTEMA SON LOS ÚNICOS RESPONSABLES DE SELECCIONAR LOS PRODUCTOS ADECUADOS PARA LOS REQUISITOS DE SU APLICACIÓN ESPECÍFICA Y DE GARANTIZAR LA INSTALACIÓN, UTILIZACIÓN Y MANTENIMIENTO APROPIADOS DE ESOS PRODUCTOS. DURANTE LA SELECCIÓN SE DEBERÁN CONSIDERAR LA COMPATIBILIDAD DE LOS MATERIALES, LA CAPACIDAD DE LOS PRODUCTOS Y LOS DETALLES DE SU APLICACIÓN. UNA SELECCIÓN O USO INADECUADO DE LOS PRODUCTOS DESCRITOS AQUÍ PUEDE OCASIONAR LESIONES PERSONALES Y DAÑOS A LA PROPIEDAD.

Opciones

Piezas de repuesto

Todas las válvulas de aguja disponen de piezas de repuesto y juegos de reparación. Si necesita información específica póngase en contacto con el distribuidor HOKE de su localidad.

Limpeza y pruebas

Al hacer su pedido, por favor especifique si las válvulas requieren limpieza para aplicaciones con oxígeno o pruebas de fuga con helio.

Otras medidas

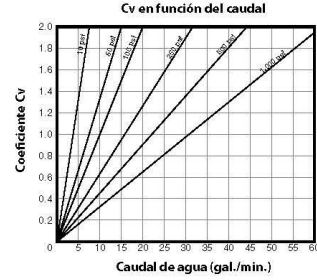
Disponemos de otras medidas y accesorios por pedido especial. Por favor consulte al distribuidor Hoke de su localidad.

Caudal de líquido de las válvulas de medición Hoke

Para determinar el Cv o el caudal de un líquido a 60° F (16° C):

$$Cv = \frac{GPM}{\sqrt{\frac{\Delta p}{S.G.}}} \quad \text{o} \quad GPM = Cv \sqrt{\frac{\Delta p}{S.G.}}$$

donde: $\Delta p = p_1 - p_2$
 p_1 = presión de entrada en psia
 p_2 = presión de salida en psia
 GPM = caudal en galones por minuto
 S.G. = peso específico del líquido, donde el agua es = 1.0 a 60° F (16° C)

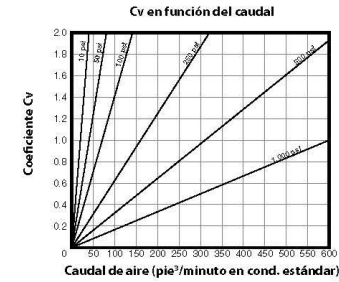


Caudal de gas de las válvulas de medición Hoke

Para determinar el Cv o el caudal de un gas a 70° F (21° C):

$$Cv = \frac{SCFH}{1360 \sqrt{\frac{(\Delta p)(p_1)}{(460 + T)(S.G.)}}} \quad \text{o} \quad SCFH = 1360 Cv \sqrt{\frac{(\Delta p)(p_1)}{(460 + T)(S.G.)}}$$

donde: $\Delta p = p_1 - p_2$
 p_1 = presión de entrada en psia
 p_2 = presión de salida en psia
 SCFH = caudal en pies cúbicos estándar por hora
 S.G. = peso específico del gas, donde el aire es = 1.0 a 70° F (21° C) y 14.7 psia
 T = temperatura en ° F



Para especificar válvulas de medición para instrumentación analítica y aplicaciones que exigen el posicionamiento preciso del vástago, se requiere un conocimiento completo de las condiciones de su proceso.

Antes de empezar, es importante definir los requisitos del flujo en términos de coeficiente de caudal o Cv.

El coeficiente de caudal Cv de una válvula expresa el caudal de agua a 60°F en galones por minuto con una caída de presión de 1 psi a través de la válvula. Mediante el uso correcto de la fórmula para líquidos o gases, usted obtendrá un Cv preciso, necesario para la selección de la válvula.

El Cv debe calcularse para las variaciones presuntas de la presión y para el rango de caudal necesario. El rango de variación del coeficiente Cv de las válvulas de medición Hoke es de aproximadamente 10 a 1. Esto se ilustra en las curvas del Cv en función de las vueltas de la manija que se muestran con cada serie de válvulas. Tenga en cuenta que a mayor cantidad de vueltas de la manija se necesiten para lograr un cambio determinado en el caudal, mayor será la precisión de la válvula.

Los valores del coeficiente Cv que ofrecen el control de mayor exactitud están comprendidos en la parte recta de la curva con el valor nominal en el centro. Por ello, la parte recta de la curva brinda aproximadamente el mismo incremento de flujo para cada vuelta del volante de la válvula.

Una vez que se determinan los requisitos del Cv, los pasos siguientes deberán ser evaluados antes de realizar la selección final de la válvula.

1. Defina los requisitos de presión y temperatura

Las válvulas de medición Hoke están disponibles para aplicaciones desde condiciones moderadas de vacío hasta 5000 psig. Las temperaturas de funcionamiento oscilan entre -65° y 450° F. No hay restricciones en la caída de presión o la presión aguas abajo para las válvulas Hoke.

2. Conozca sus requisitos en cuanto a materiales

La resistencia a la corrosión debe ser su principal consideración al seleccionar los materiales, especialmente en las piezas en contacto con el fluido o sometidas a presión. Hay casos en los que, además del fluido del proceso, también se debe tener en cuenta el medio ambiente.

Las exigencias de presión/ temperatura de los materiales están cubiertas normalmente por las especificaciones del producto del fabricante del material.

Los productos Hoke están diseñados con materiales de similares características de resistencia a la corrosión, siempre que sea posible. Si la selección del material es crítica, por favor comuníquese con el distribuidor Hoke más cercano. Él le puede recomendar opciones para ayudar a resolver su problema.

3. Opciones

El dial indicador y las manijas micrométricas están disponibles para reproducir la posición del vástago. Las válvulas Milli-Mite serie 1300 de Hoke se suministran con una manija micrométrica como equipo estándar. También se dispone de otras opciones de manija o pueden fabricarse por pedido especial.

4. Rendimiento final

La ingeniería del diseño y las normas de fabricación son elementos críticos de las válvulas de medición que usted debe seleccionar y que afectarán su funcionamiento real.

El control total de Hoke sobre estos elementos de calidad, le asegura a usted que sus válvulas contarán con una excelente repetibilidad en el posicionamiento del vástago, histéresis baja y una amplia gama de medición.

ANEXO H. Válvula ON/OFF.



Especificaciones técnicas

Electroválvulas servoaccionadas y de accionamiento directo de 2/2 vías Modelos EV215B y EV225B

Características



EV215B 3 y EV225B 6 - 25

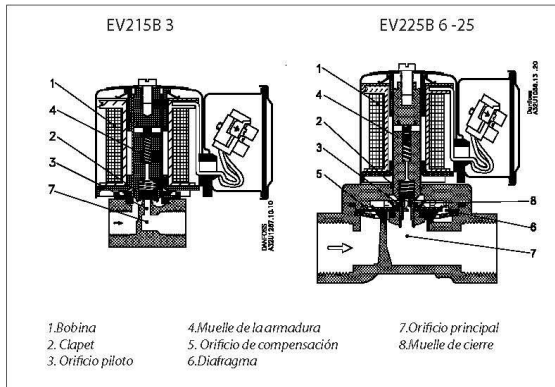
- Para aplicaciones industriales severas.
- Para vapor con temperaturas de hasta 185°C
- Las válvulas EV225B están indicadas especialmente para aplicaciones que requieran válvulas resistentes a la suciedad.
- Presión del vapor: Hasta 10 bar
- Temperatura ambiente: Hasta 40°C
- Protección de la bobina: IP 43
- Conexiones de la rosca: Desde G 1/4 hasta G 1
- En relación con la rosca NPT, póngase en contacto con Danfoss.

Datos técnicos, válvula

Modelo	EV215B	EV225B
Instalación	Se recomienda un sistema de electroválvulas vertical	
Rango de presión	Máx. 10 bar	
Máx. presión de prueba	25 bar	
Tiempo de apertura ¹⁾	Máx. 0.2 s	
Tiempo de cierre ¹⁾	Máx. 2.0 s	
Temperatura ambiente	Máx. 40°C a una temperatura del fluido 185°C	
Temperatura fluido	185°C con bobina ca / 160°C con bobina cc	
Materiales		
Cuerpo de la válvula:	Aceros inoxidable, nº1.4404 / AISI 316L	Latón DZR
Armadura/ tope de la armadura:	Aceros inoxidable, nº1.4105 / AISI 430FR	
Tubo de la armadura:	Aceros inoxidable, nº 1.4306 / AISI 304L	
Muelles:	Aceros inoxidable, nº1.4310 / AISI 301	
Diafragma:		PTFE
Clapet	PTFE	
Asiento de la válvula:		Aceros inoxidable, nº1.4305 / AISI 303
Junta externa:	Junta tórica: AFLAS	

¹⁾ Los tiempos son valores máximos y se aplican para vapor.
Los tiempos exactos dependerán de las condiciones de presión.

Función



Alimentación de la bobina desconectada (cerrada):
Cuando la alimentación está desconectada, el resorte del inducido (4) empuja el plato de válvula (2) contra el orificio piloto (3).

La presión en el diafragma (6) aumenta mediante el orificio de compensación (5).

El diafragma / pistón cierra el orificio principal (7) tan pronto como la presión en el diafragma / pistón es igual a la presión de entrada.

La válvula permanecerá cerrada mientras la alimentación de la bobina esté desconectada.

Alimentación de la bobina conectada (abierta):
Cuando la bobina (1) recibe alimentación, el orificio piloto (3) se abre.

Puesto que el orificio piloto es más grande que el orificio de compensación (5), la presión en el diafragma (6) cae, así que el diafragma se separa del orificio principal, abriéndose la válvula (7).

La válvula se mantendrá abierta mientras exista presión diferencial mínima en la válvula, y mientras la bobina reciba alimentación.

Pedidos

Co-nexión ISO 228/1	Materi-al de junta	Valor k_v [m ³ /h]	Temp. de fluido		Selección de modelo		Código (sin bobina)	Presión difer. admisible (bar)/ Modelo de bobina		
			ca bo-bina Max. [°C]	cc bo-bina Max. [°C]	Modelo prin-cipal	Especificación		Min.	Máx.	
									10 W ca	17 W cc
G 1/4	PTFE	0.3	185	160	EV215B 3 SS	G14TNC000	032U3001	0	10	10
G 1/4	PTFE	0.9	185	160	EV225B 6 BD	G14TNC000	032U3002	0.2	10	10
G 3/8	PTFE	2.2	185	160	EV225B 10 BD	G38TNC000	032U3003	0.2	10	10
G 1/2	PTFE	2.2	185	160	EV225B 10 BD	G12TNC000	032U3004	0.2	10	10
G 1/2	PTFE	3.0	185	160	EV225B 15 BD	G12TNC000	032U3005	0.2	10	10
G 3/4	PTFE	5.0	185	160	EV225B 20 BD	G34TNC000	032U3006	0.2	10	10
G 1	PTFE	6.0	185	160	EV225B 25 BD	G1TNC000	032U3007	0.2	10	10

Tensión bobina	Potencia bobina	Apéndice ¹⁾
220-230 V, 50Hz	10W a.c.	84
220 V, 60Hz	10W a.c.	90

1) Para pedir cuerpo de válvula sin bobina el apéndice **99**.

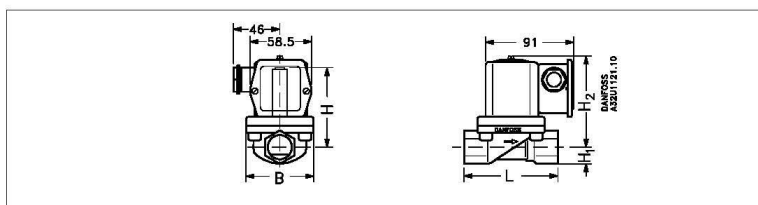
Ejemplo: El código de la válvula EV225B 15BD con bobina 230V 50Hz es **032U3005.84**

Especificaciones técnicas **Electroválvulas servoaccionadas y de accionamiento directo de 2/2 vías**
Modelos EV215B y EV225B

Datos técnicos, bobina

Tolerancias de tensión	Bobinas de 130V ca: +6%, -15%. Otras bobinas: +10%, -15%.
Consumo energético, conexión	Bobina ca: 50 VA
Consumo energético, retención	Bobina ca: 20 VA, 10W ac
Aislamiento del bobinado	Class H según IEC 85
Conexión	Caja de terminales; Pg 13.5
Protección de la bobina, IEC 529	IP 43
Temperatura ambiente	Máx. 40°C
Régimen de trabajo	Continuo.

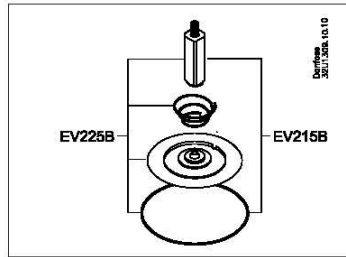
Dimensiones y peso



Modelo de válvula	L [mm]	B [mm]	H [mm]	H1 [mm]	H2 ¹⁾ [mm]	Peso con bobina [kg]
EV215B 3 SS	38	34	65,5	11,5	76,5	0,56
EV225B 6 BD	62	46	75	13	87	0,78
EV225B 10 BD	62	46	75	13	87	0,82
EV225B 15 BD	81	56	77	15	88,5	0,96
EV225B 20 BD	98	72	84	18	95	1,4
EV225B 25 BD	106	72	90	21	103	1,8

1) En caso de bobinas cc, se añaden 5 mm a las medidas H₂.

Kits de repuesto para EV215B y EV225B



Kit de repuesto para EV215B 3

El kit de repuesto incluye una armadura con clapet y muelle, junta de estanqueidad.

Kit de repuesto para EV225B 6-25

El kit de repuesto incluye una armadura con clapet y muelle, muelle de cierre, diafragma, junta tórica y junta de estanqueidad.

Modelo	Código
EV215B 3	032U3 170
EV225B DN 6-10	032U3 171
EV225B DN 15	032U3 172
EV225B DN 20-25	032U3 173

Bobinas de repuesto

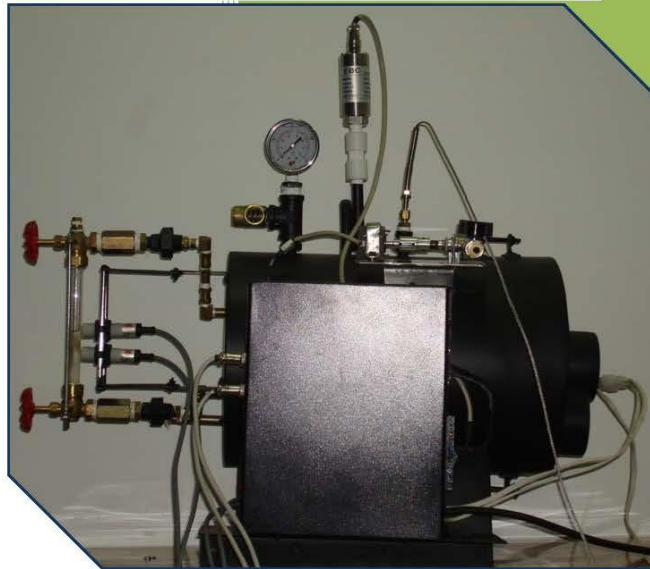


Tensión de bobina	Código
24 V, 50 Hz	032K1436.82
48 V, 50 Hz	032K1436.87
110 V, 50 Hz	032K1436.83
220-230 V, 50 Hz	032K1436.84
240 V, 50 Hz	032K1436.85
110 V, 60 Hz	032K1436.91
220 V, 60 Hz	032K1436.90
24 V cc	032K1409.02

Danfoss no acepta ninguna responsabilidad por posibles errores que pudieran aparecer en sus catálogos, folletos o cualquier otro material impreso, reservándose el derecho de editar sus productos sin previo aviso, incluyéndose los que están bajo pedido, si estas modificaciones no afectan las características convenidas con el cliente. Todas las marcas comerciales de este material son propiedad de las respectivas compañías. Danfoss y el logotipo Danfoss son marcas comerciales de Danfoss A/S. Reservados todos los derechos.

2011

**Manual de operación del
generador de vapor**



AUTORES

**GABRIEL HUMBERTO CASTIBLANCO
DANNY ALEXIS MORANTES DIAZ**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN RECOBRO MEJORADO
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

DIRECTORES

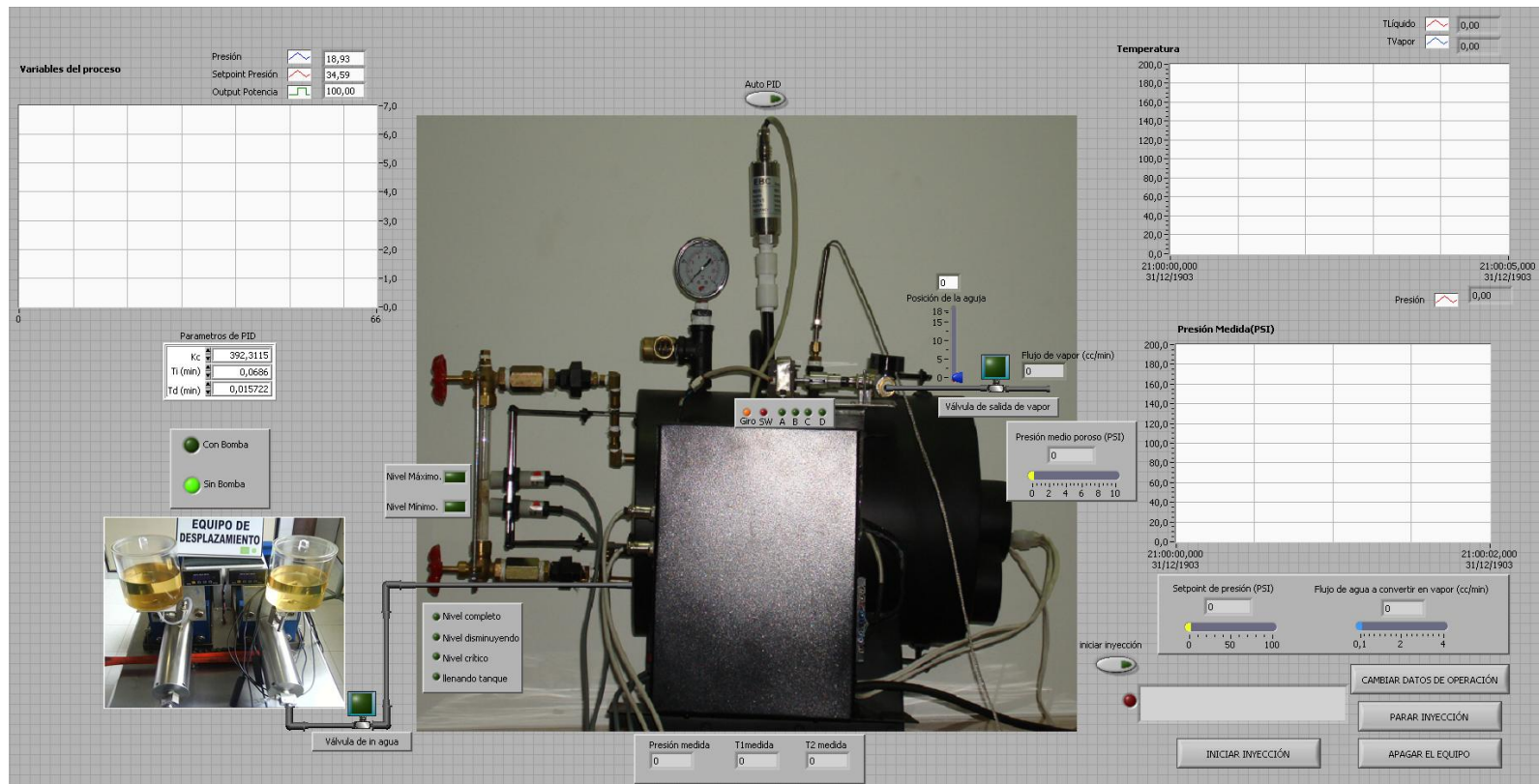
DR. DAVID ALFREDO FUENTES DIAZ

**M.Sc. SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**M.Sc. CARLOS EDUARDO NARANJO SUAREZ
ECOPETROL S. A.**

El software del generador de vapor programado en labview cuenta con la interfase gráfica que se muestra en la Figura 73.

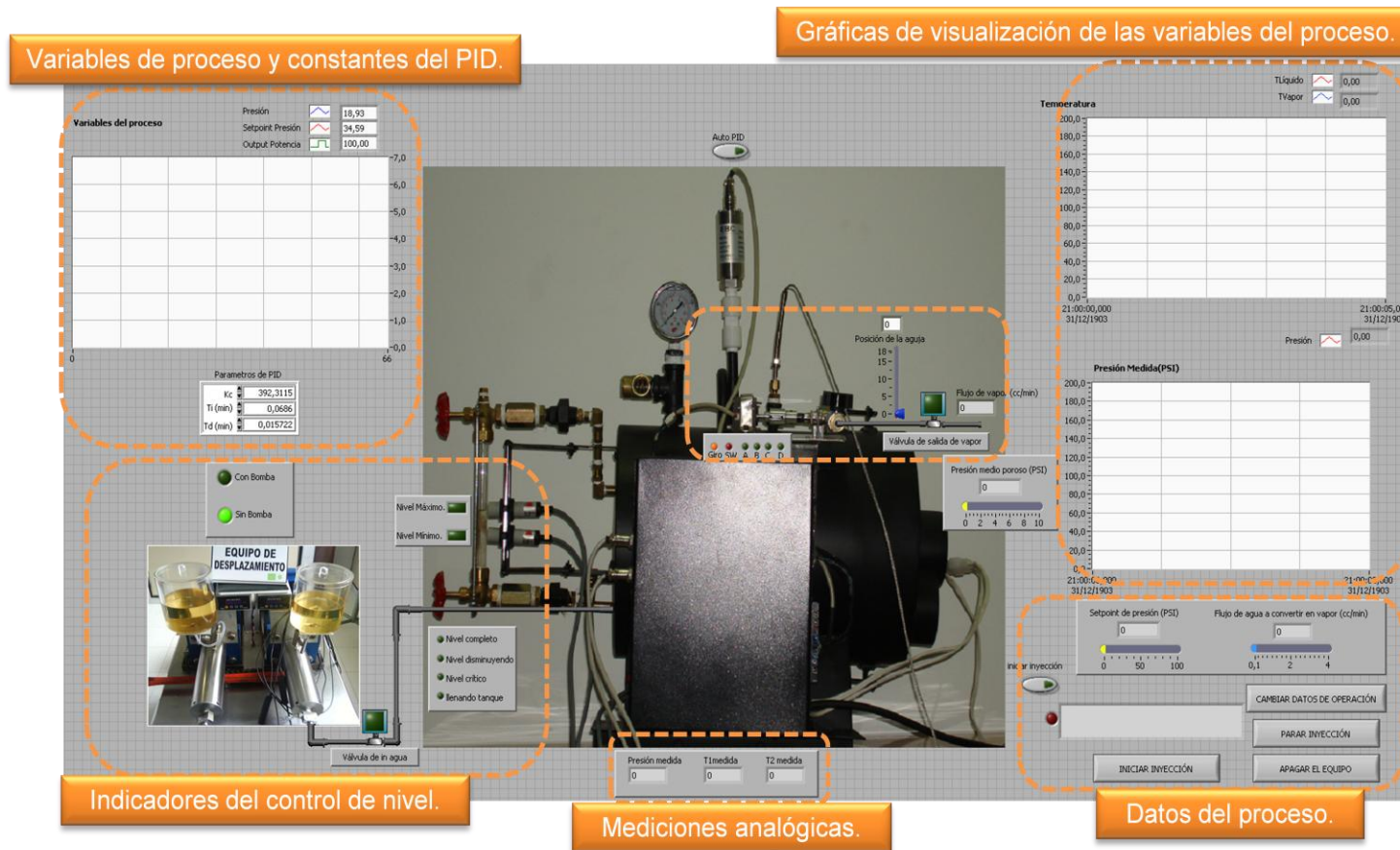
Figura 73. Interfase gráfica software generador de vapor



En la

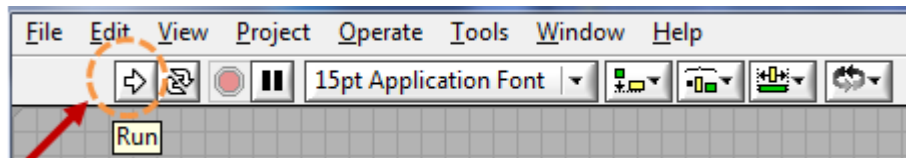
Figura 74 se muestran los diferentes partes que componen la interfase de usuario del generador de vapor.

Figura 74. Descripción de las partes de la interfase de usuario



Una vez se ha iniciado la aplicación se debe dar inicio con el botón de RUN en labview indicado en la Figura 75.

Figura 75. Iniciar programa



El software inicia el proceso de orientación al usuario para preparar el equipo y posteriormente realizar el proceso de calentamiento, los mensajes mostrados en las Figura 76 y Figura 77 recomiendan revisar que las válvulas del generador de vapor se encuentren cerradas y también cual debe ser el procedimiento a seguir para realizar el llenado del tanque, una vez confirmados estos dos mensajes el equipo inicia el sensado de los niveles hasta alcanzar el punto óptimo de llenado.

Figura 76. Mensaje de orientación 1

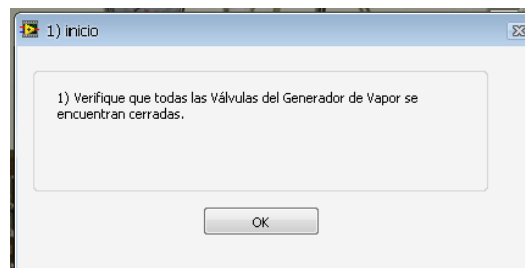
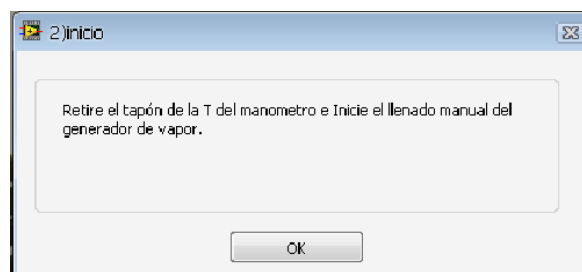


Figura 77. Mensaje de orientación 2



El mensaje de la Figura 78 indica que el equipo ya ha alcanzado el nivel mínimo y que el operario de aquí en adelante debe estar atento al mensaje de la Figura 79 donde se indica que el nivel máximo se ha alcanzado y que se debe poner el tapón en el punto de llenado, una vez se confirme esta operación el equipo enviará el mensaje de la Figura 80 donde se piden los datos de operación del generador de vapor, que corresponden a la presión de operación, al caudal de líquido que quiere convertirse en vapor, al modo de operación del equipo y a la caída de presión que ocurre en el medio poroso.

Cada uno de los parámetros que ingrese el operario son comparados con los rangos máximos y mínimos posibles, si se excede o se ingresa un dato que no se encuentre en dichos rangos se generaran mensajes de error que le indicarán al usuario en que límites se deben encontrar los datos de operación.

Figura 78. Mensaje nivel mínimo alcanzado

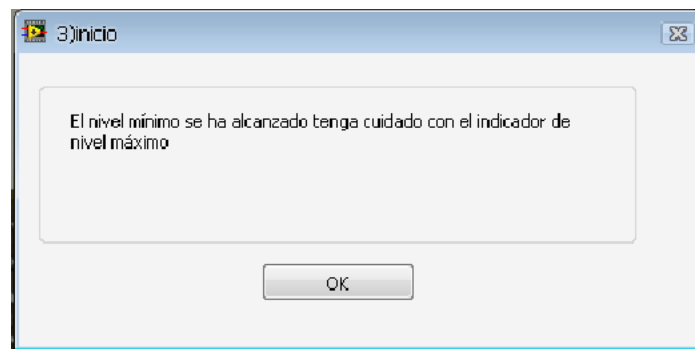


Figura 79. Mensaje nivel máximo alcanzado

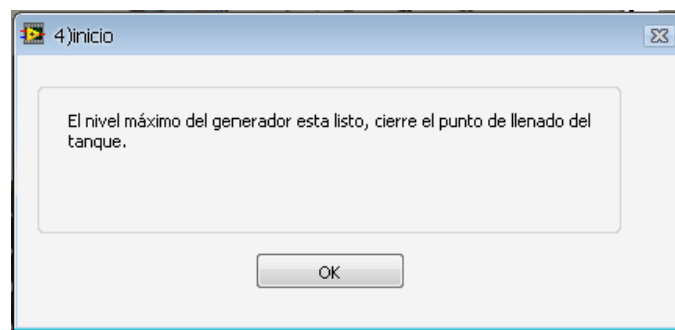
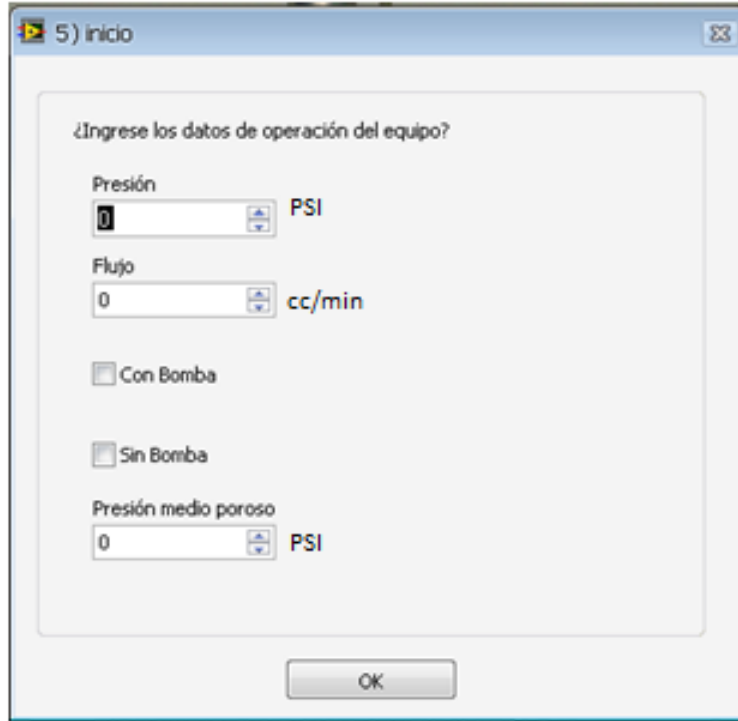
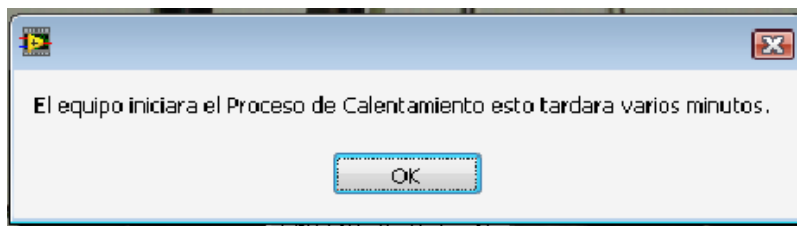


Figura 80. Mensaje ingreso de datos de operación



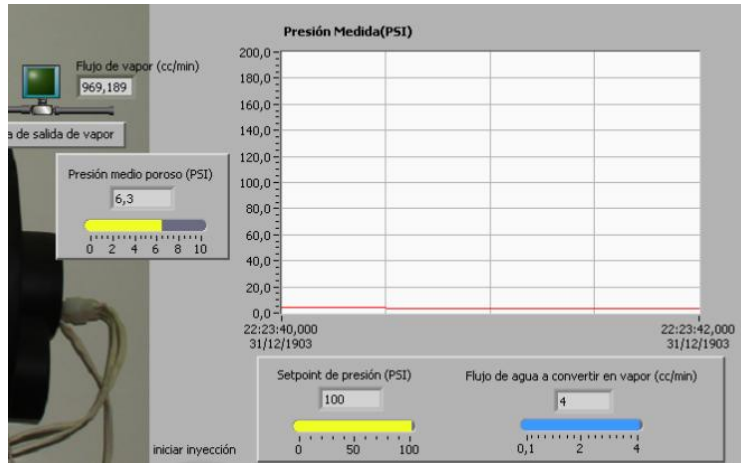
Una vez ingresados los datos de operación el equipo enviará el mensaje de la Figura 81, donde se confirma el inicio de calentamiento del generador que para el caso óptimo de operación a la presión de 100 PSI tardará aproximadamente 50 minutos.

Figura 81. Mensaje iniciación del proceso de calentamiento



Para la condición de operación el software calcula el equivalente en flujo de vapor que se va a inyectar en la prueba e indica en pantalla tanto los datos suministrado por el usuario como el de flujo de vapor, esto puede verse en la Figura 82.

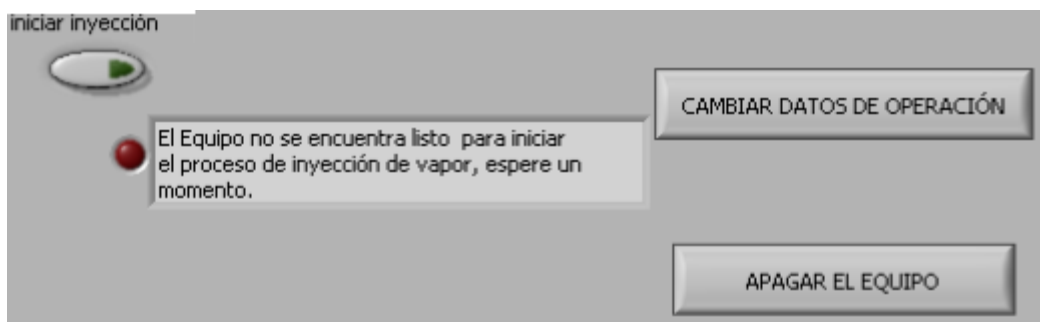
Figura 82. Datos cargados en pantalla



Durante todo el proceso el usuario puede realizar el cambio de datos del equipo o realizar el apagado del mismo mediante los botones mostrados en la Figura 83, en esta misma figura se observa un mensaje que indicará si el equipo esta o no listo para iniciar el proceso de inyección.

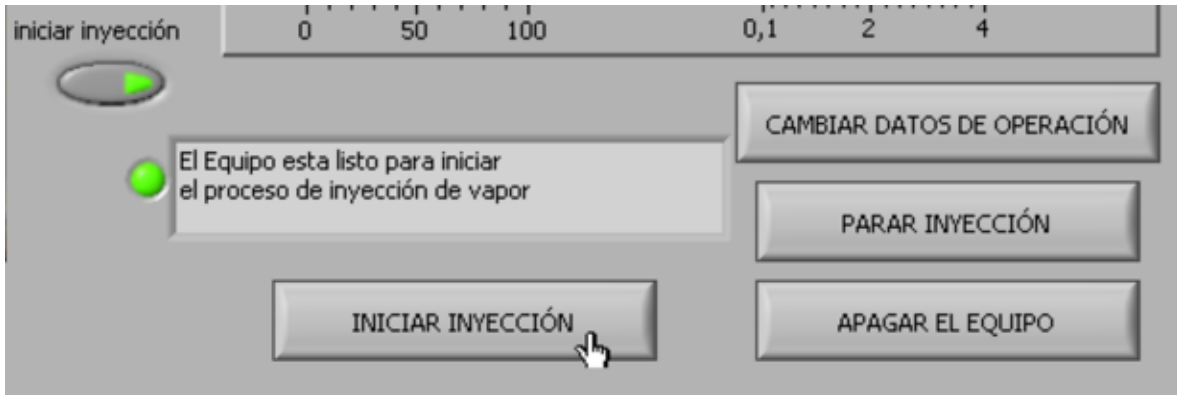
El botón de iniciar inyección permite que el usuario active de forma manual un proceso de inyección en un punto que no es necesariamente el de operación, en este evento el usuario debe tener cuidado debido a que se estará operando el equipo de forma incorrecta pero es un modo que permite hacer verificación del funcionamiento adecuado del motor e incluso de las válvulas de inyección de agua por medio de la bomba y la de salida de vapor.

Figura 83. Botones de cambio de proceso y apagado del equipo



La operación correcta del equipo se logra al culminar el tiempo de calentamiento y visualmente el programa cambia el mensaje de estado de operación por el mostrado en la Figura 84.

Figura 84. Botones activados luego de que el equipo llega a operación.



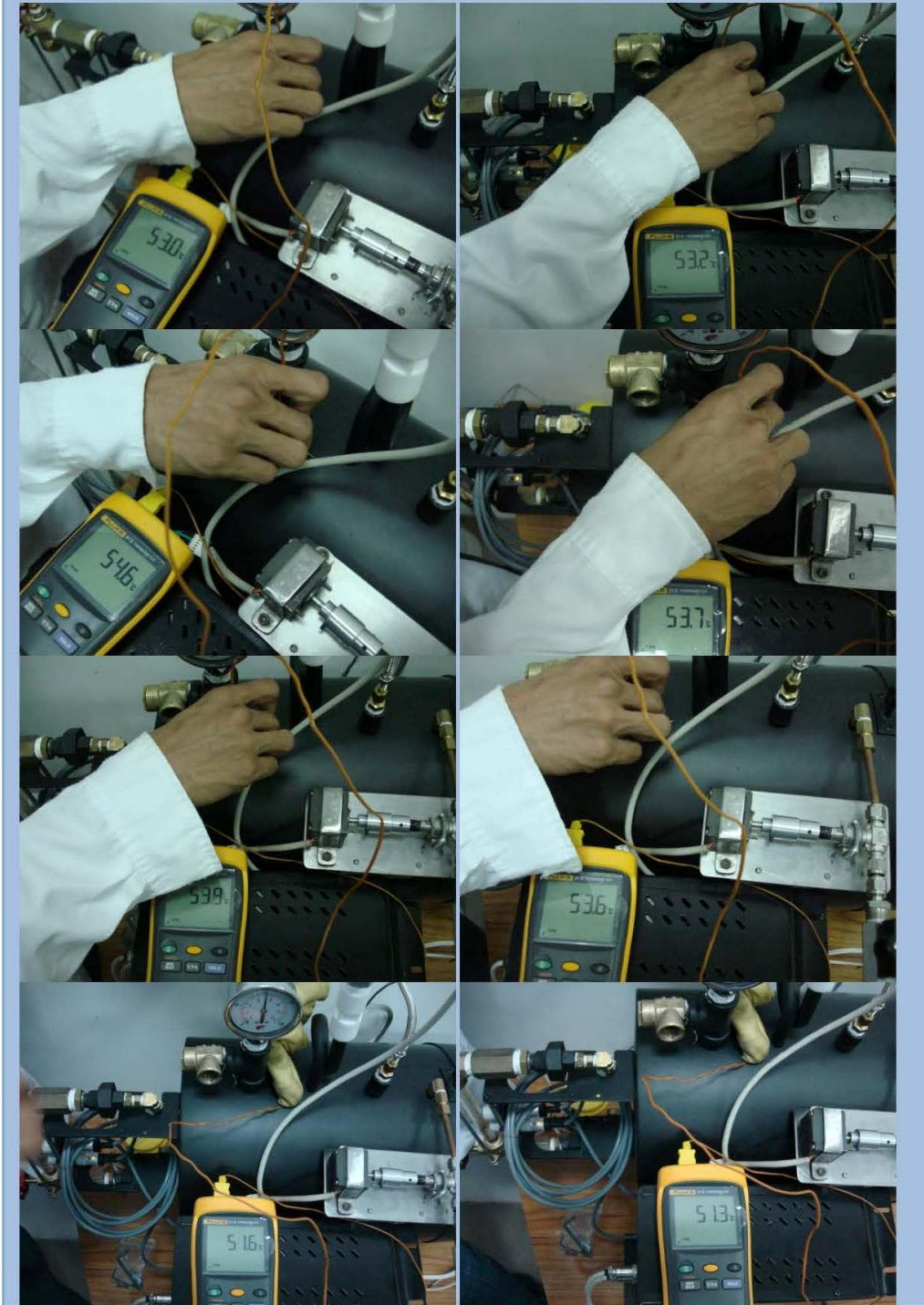
Durante todo el tiempo en que se este operando el equipo el software monitorea constantemente todas las variables del proceso y realizará el apagado del equipo cerrando las válvulas ON/OFF y la válvula milimétrica de control de flujo conjuntamente con la acción de llevar a cero la potencia suministrada por las resistencias eléctricas en los siguientes casos:

- ✚ Cuando se presente una medida errónea de la señal del sensor de presión correspondiente al evento en que el sensor envíe un voltaje superior a los límites de funcionamiento o que el sensor este generando cinco voltios que corresponde a que el sensor se halla dañado.
- ✚ En el modo de operación del equipo sin bomba al llegar al nivel mínimo, no se cuenta con una restitución del fluido.
- ✚ Y en el caso en que el usuario oprima el botón de apagado del equipo.

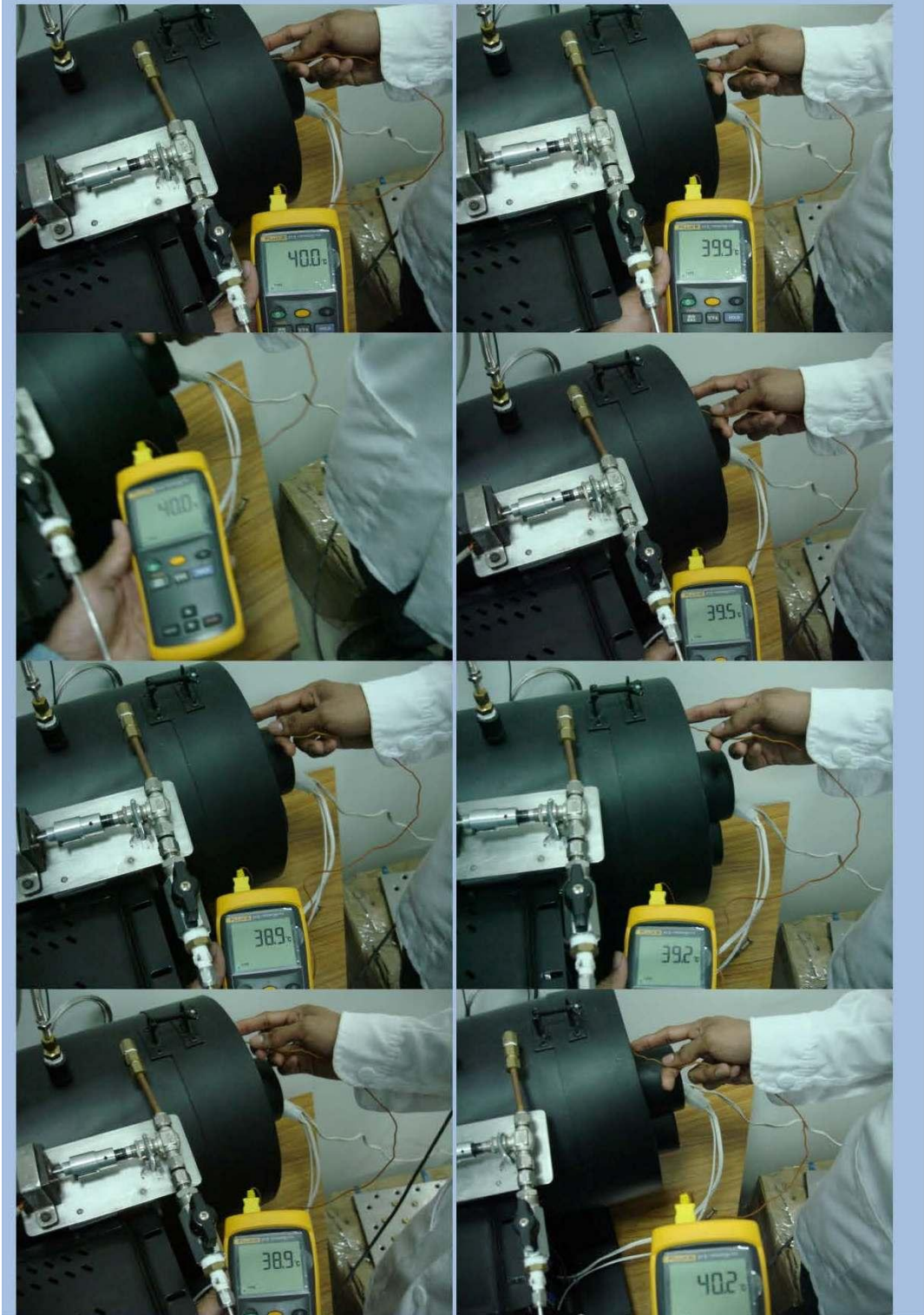
Para terminar la aplicación por completo el usuario debe oprimir el botón de stop de labview y posteriormente cerrar la aplicación.

ANEXO J. Medidas temperaturas superficiales generador de vapor

Medidas temperaturas exteriores tanque cilíndrico



Medidas temperaturas exteriores tapa roscada



Medidas temperaturas exteriores tapa CAP

