

**DISEÑO MECÁNICO DE UN GENERADOR DE VAPOR TIPO ACUOTUBULAR DE  
PRESIÓN SUBCRÍTICA Y BAJA PRODUCCIÓN DE VAPOR**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO POR:**

**ANDRÉS PABLO QUINTERO CARRASCAL**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERIA MECANICA  
BARRANQUILLA, COLOMBIA  
2013**

**DISEÑO MECÁNICO DE UN GENERADOR DE VAPOR TIPO ACUOTUBULAR DE  
PRESIÓN SUBCRÍTICA Y BAJA PRODUCCIÓN DE VAPOR**

**ANDRÉS PABLO QUINTERO CARRASCAL**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**ASESOR DISCIPLINARIO  
ANTONIO SALTARIN  
INGENIERO MECÁNICO**

**ASESOR METODOLÓGICO  
KHRISCIA UTRIA  
MSC. INGENIERO MECÁNICO**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE  
FACULTAD DE INGENIERIA, PROGRAMA DE MECANICA  
BARRANQUILLA, COLOMBIA  
2013**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Barranquilla, Diciembre de 2013

*A mi madre quien con su paciencia y perseverancia*

*me da la fortaleza de seguir adelante.*

*A mi padre, quien con sus grandes esfuerzos,*

*ha sido ejemplo de superación para mí y a*

*quien le debo lo que soy y los valores impregnados.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a todas las personas que directa o indirectamente, colaboraron con el desarrollo de este proyecto.

A todo el personal docente de la Universidad Autónoma del Caribe que fue participe en mi formación profesional como Ingeniero Mecánico.

A mis compañeros quienes me apoyaron y colaboraron en muchas etapas de mi formación, especialmente a mi compañero y amigo el Ingeniero Jorge nikolai Jácome quien muchas veces me guio por el camino del entendimiento.

Al equipo de trabajo del proyecto entre ellos el Ingeniero Antonio Saltarín quien me brindó valiosos aportes en el área de diseño.

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	- 19 -
INTRODUCCIÓN	- 20 -
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	- 62 -
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	- 62 -
1.2. JUSTIFICACION	- 62 -
1.3. OBJETIVOS	- 64 -
1.3.1 Objetivo general	- 144 -
1.3.2 Objetivos específicos	- 145 -
1.4 ESTADO DEL ARTE	- 146 -
2. MARCO TEÓRICO	- 20 -
2.1 DEFINICIÓN DE GENERADOR DE VAPOR	- 62 -
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS GENERADORES DE VAPOR	- 62 -
2.2.1 Generador de vapor pirotubular	- 62 -
2.2.2 Generador de vapor acuotubular	- 64 -
2.2.3 Calderas de fluido térmico (ft) y agua sobrecalentada (asc)	- 144 -
2.3 RENDIMIENTOS DE LA CALDERA	- 145 -
2.3.1 Rendimiento instantáneo y rendimiento nominal	- 146 -
2.3.2 Rendimiento estacional	- 145 -

2.3.3 Balance de materia y energía	- 145
-	
2.3.4 Consideraciones generales de la generación de vapor	- 145
-	
2.3.4.1 Estados de líquido subenfriado y vapor sobrecalentado	- 145
-	
2.3.4.2 Estado de mezcla líquido-vapor. Proceso de Ebullición	- 145
-	
2.3.5 Consideraciones generales acerca de los tubos curvos	- 145 -
145 -	
2.3.5.1 Aplicaciones industriales de las configuraciones de tubos curvos	- 145 -
2.3.5.2 Ventajas de los tubos curvos frente a los tubos rectos en el proceso de Transferencia de calor	- 145
-	
2.3.6 Correlaciones experimentales para el cálculo de la transferencia de calor al interior del serpentín	- 145 -
2.3.6.1 Correlaciones para el cálculo de la transferencia de calor en una sola fase en tubos curvos. correlación de seban y mclaughlin	- 145 -
2.4 TEORIAS DE DISEÑO MECANICO	- 145 -
2.4.1 Teoría de la energía de distorsión de von mises-henky	- 145 -
2.5 RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESION	- 145 -
2.5.1 Tapas para recipientes sometidos a presión	- 145 -
2.5.2 Soldadura en recipientes sometidos a presión	- 145 -
2.5.3 Materiales para recipientes a presión	- 145 -
2.5.3.1 Códigos de diseño aplicables	- 145 -

3. DISEÑO METODOLÓGICO	- 145 -
3.1 METODOLOGÍA	- 145 -
3.2 ESQUEMA DEL MODELO METODOLOGICO	- 145 -
4. DESCRIPCION DEL PROTOTIPO	- 145 -
4.1 GENERADOR DE VAPOR	- 145 -
4.1.1 Recipiente primario	- 145 -
4.1.2 Serpentín primario	- 145 -
4.1.3 Recipiente secundario	- 145 -
4.1.4 Serpentín secundario	- 145 -
4.1.5 Tapa del recipiente secundario	- 145 -
4.1.6 Recipiente principal	- 145 -
4.1.7 Tapa del recipiente principal	- 145 -
4.1.8 Chimenea	- 145 -
4.1.9 Base del generador	- 145 -
4.1.10 Quemador	- 145 -
4.1.1.1 Otros componentes y accesorios	- 145 -
4.2 SISTEMA DE ENTRADA	- 145 -
4.2.1 Tanque contenedor de agua	- 145 -
4.2.2 Bomba alimentadora de agua	- 145 -
4.2.3 Mesa del tanque de agua	- 145 -



4.2.4 Válvulas de entrada	- 145 -
4.2.4.1 Válvula tipo check	- 145 -
4.2.4.2 Válvula de globo	- 145 -
4.2.4.3 Válvula de aguja	- 145 -
4.2.5 Sensor de presión	- 145 -
4.2.6 Base para línea de salida	- 145 -
4.3 Sistema de salida	- 145 -
4.3.1 Domo de condensados	- 145 -
4.3.2 Línea de salida de vapor	- 145 -
4.3.3 Línea de salida de condensados	- 145 -
4.3.4 Estructuras de soporte	- 145 -
4.4 BASE DEL GENERADOR DE VAPOR, SISTEMAS ELÉCTRICO Y DE CONTROL	- 145 -
5. CÁLCULOS DE DISEÑO DEL EQUIPO	- 145 -
5.1 ANÁLISIS DE LA ENERGÍA TRANSFORMADA, CÁLCULO DE LA POTENCIA SUMINISTRADA POR EL FLUIDO	- 145 -
5.1.1 Calentamiento del líquido subenfriado	- 145 -
5.1.2 Proceso de ebullición	- 145 -
5.1.3 Sobrecalentamiento de vapor	- 145 -
5.1.4 Cálculos para la transferencia de calor por convección del agua al interior del serpentín para las condiciones de diseño	- 145 -

5.2. ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA PRESIÓN DEL DOMO	- 145 -
5.2.1 Cálculos del caparazón (cámara interna ): presión interna	- 145 -
5.2.1.1 Tensión circular (aro)	- 145 -
5.2.1.2 Esfuerzos axiales (longitudinales)	- 145 -
5.2.1.3 Esfuerzos en cilindros de pared delgada	- 145 -
5.3. Cálculos por presión interna para las paredes de recipientes cilindros horizontales	- 145 -
5.4. Cálculos de las tapas para recipientes sometidos a presión	- 145 -
6. DISEÑO DE PIEZAS Y COMPONENTES	- 145 -
6.1 DISEÑO DE GENERADOR DE VAPOR	- 145 -
6.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE ENTRADA	- 145 -
6.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE SALIDA	- 145 -
6.4 DISEÑO DE LA BASE DEL GENERADOR DE VAPOR	- 145 -
7. SIMULACIONES COMPUTACIONALES DE RESISTENCIA	- 145 -
7.1 SIMULACIÓN DE ESFUERZOS POR PRESIÓN INTERNA EN LAS PAREDES DEL DOMO	- 145 -
7.2 SIMULACIÓN DE ESFUERZOS POR PRESIÓN INTERNA EN LAS TAPAS DEL DOMO	- 145 -
7.3 SIMULACION DE ESFUERZOS EN LA BASE DEL GENERADOR	- 145 -
8. ENSAMBLE	- 145 -

8.1 ENSAMBLE DEL SISTEMA GENERADOR DE VAPOR	- 145 -
8.2 ENSAMBLE DE LA LINEA DE ENTRADA	- 145 -
8.3 ENSAMBLAJE DE LA LÍNEA DE SALIDA	- 145 -
8.4 ENSAMBLAJE DE LA BASE DEL GENERADOR Y SISTEMAS ELECTRICO Y DE CONTROL	- 145 -
8.5 ENSAMBLE DE SISTEMAS	- 145 -
9. BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRABAJO	- 145 -
10. CONCLUSIONES	- 145 -
11.CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	- 145 -
12. PRESUPUESTO	- 145 -
BIBLIOGRAFIA	- 145 -
ANEXOS	- 145 -

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades termodinámicas	83
Tabla 2. Presiones Admisibles para Tubos de Acero Inoxidable	88
Tabla 3. Valores máximos de tensión admisible “S” para materiales ferrosos	92
Tabla 4. Cronograma de actividades	141
Tabla 5. Presupuesto del Proyecto	142
Tabla 6. Presupuesto de construcción	143

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

- Figura 1. Tipos de generadores de vapor según el tipo de generación **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 2. Esquema de una caldera acuotubular **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 3. Interior de una caldera acuotubular con combustion central **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 4. Diferentes geometrías de tubos curvos **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 5. Esquema metodológico **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 6. Ensamble de los 4 subsistemas **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 7. Esquema del generador de vapor **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 8. Estados del fluido **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 9. Tensiones del recipiente **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 10. Esfuerzos del recipiente cilindrico **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 11. Esquema de tapas únicamente abombadas **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- Figura 12. Sistema generador de vapor **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 13. Dimensiones del recipiente primario e isométrico <b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	<b>¡ERROR!</b>
Figura 14. Dimensiones del recipiente secundario e isometrio <b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	<b>¡ERROR!</b>
Figura 15. Isometrico con orejas de fijacion del recipiente principal <b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	<b>¡ERROR!</b>
Figura 16. Dimensiones del recipiente secundario e isometrico <b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	<b>¡ERROR!</b>
Figura 17. Plano de la tapa del recipiente secundario e isometrico <b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	<b>¡ERROR!</b>
Figura 18. Plano de la tapa del recipiente principal e isometrico <b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	<b>¡ERROR!</b>
Figura 19. Isometricos de serpentines con soportes	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura 20. Plano de la base del generador e isometrico	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura 21. Quemador riello 40	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura 22. Accesorios del sistema generador de vapor	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura 23. Sistema de entrada	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura 24. Tanque plastico contenedor	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura 25. Bomba de agua milton roy®	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura 26. Mesa del tanque de agua,plano e isometrico	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura 27. Base para la linea de entrada	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

Figura 28. Válvulas y sensor del sistema de estrada **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 29. Sistema de salida **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 30. Domo de condensados, plano e isométrico **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 31. Válvula de seguridad de presión **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 32. Componentes de la línea de salida de vapor **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 33. Componentes de la línea de salida de vapor **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 34. Estructura de soporte del domo de condensados **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 35. Estructura de soporte de líneas de salida **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 36. Sistema base del generador de vapor **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 37. Chasis de la base del generador **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 38. Carcasa de la base del generador **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 39. Dimensiones base del generador de vapor **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 40. Mallado del cuerpo del domo de condensados **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 41. Tensión de von mises en cuerpo del domo de condensados **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 42. Desplazamiento estático en cuerpo del domo de condensados **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 43. Distribución del factor de seguridad **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 44. Mallado de las tapas del domo **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 45. Tensión de von mises en las tapas del domo de condensados **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 46. Desplazamiento estático en las tapas del domo de condensados **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 47. Distribución del factor de seguridad de las tapas del domo **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 48. Mallado de la estructura de la base del generador de vapor **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 49. Tensión de von mises en la estructura de la base **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 50. Desplazamiento estático en la estructura de la base **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 51. Distribución del factor de seguridad base del generador **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 52. Ensamble sistema generador con corte **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 53. Ensamble de tanque contenedor y bomba en mesa soporte **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 54. Ensamble línea de entrada en soporte **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 55. Ensamble línea de salida **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**



Figura 56. Ensamble base del generador y sistema eléctrico **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 57. Unión base del generador con base de la caldera **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 58. Acople línea de entrada con la caldera **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 59. Unión línea de salida - base del generador **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 60. Unión serpentín primario – domo de condensados **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura 61. Esquema de proceso del generador **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Eficiencia de las Soldaduras	146
Anexo B. Tipos de Tapas para Recipientes Sometidos a Presión	147
Anexo C. Procedimientos de Soldadura para Placas de Aceros Inoxidables	149
Anexo D. Planos de construcción y ensamble del prototipo	156

## **RESUMEN**

En este documento se presenta el diseño mecánico de un generador de vapor acuatubular de presión subcrítica que servirá como equipo de laboratorio en la Universidad Autónoma del Caribe para la simulación del trabajo de calderas como instrumento para ampliar el conocimiento práctico de este tipo de equipos.

Este proyecto se basa en fundamentos teóricos relacionados al diseño mecánico del equipo y la simulación computacional que permite realizar en detalle el diseño geométrico, el estudio de ensamblaje, el análisis de esfuerzos propios del proceso a los que se encuentra sometido el equipo y finalmente el diseño en detalle de los planos de construcción.

Este trabajo realiza un importante aporte a la universidad en la medida que permite el enriquecimiento de los laboratorios y el estudio de las calderas comúnmente utilizadas para la generación de energía eléctrica en empresas que ofrecen oportunidades de empleo para los ingenieros mecánicos particularmente en el área de mantenimiento.

## **INTRODUCCIÓN**

Existen dispositivos mecánicos que se utilizan comúnmente en nuestro entorno desde la calefacción de un hogar, bombas, máquinas de vapor o incluso para la producción de energía eléctrica para uso común o industrial esencialmente calentando agua para producir vapor, estos dispositivos se conocen como generadores de vapor. Siendo el agua el fluido de trabajo o la materia prima que con simplemente calentarla en un recipiente se produce vapor, luego almacenarlo para darle uso comprende el principio del generador de vapor.

Este proyecto se propone con el fin de enriquecer los laboratorios de la Universidad Autónoma del Caribe en las áreas de Transferencia de Calor, Mecánica de fluidos y Motores de Combustión con el fin de mantenerse a la vanguardia con tecnologías que potencien el conocimiento científico. El objetivo principal es conocer el proceso esencial de la obtención de vapor, siendo este un dispositivo muy similar al encontrado en la industria, y de esta forma permitir a los estudiantes una visión más esclarecida del comportamiento y manutención de los generadores de vapor.

Al final lo que se espera con este trabajo de investigación es generar los planos de construcción del generador de vapor, con sus respectivos subsistemas, demostrando

la viabilidad del proyecto y dejándolo al criterio de la facultad para su construcción o cualquier institución interesada.

## **1. GENERALIDADES DEL PROYECTO**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A pesar de que el principio de evaporación es elemental, el diseño de un evaporador se hace complejo debido a la gran cantidad de requerimientos para que el trabajo sea óptimo.

El problema se presenta principalmente en los laboratorios del programa de Ingeniería Mecánica, donde no se cuenta con un equipo generador de vapor que se asimile a un generador industrial muy utilizado en las termoeléctricas, que son industrias que ofrecen oportunidades de empleo y prácticas empresariales a ingenieros mecánicos, cuyo perfil generalmente va enfocado hacia el mantenimiento en los equipos que componen la planta y hacen parte del ciclo termodinámico para la generación de energía eléctrica como lo son las calderas, que son grandes generadores de vapor pero trabajan bajo el mismo principio del prototipo.

Además de la necesidad de instruir a los estudiantes en el diseño, funcionamiento y mantenibilidad de los evaporadores de calor, el programa de Ingeniería Mecánica, como programa acreditado de la Universidad Autónoma del Caribe, necesita

mantenerse a la vanguardia con tecnologías que lo hagan competitivo frente al entorno en que se desarrolla.

Otra situación que se presenta es que la adquisición de un equipo de estas especificaciones, con una producción de vapor similar a 8kg/h en el mercado oscila entre los 30.000 dólares, sin contar con el envío hasta el país. Por esta razón la construcción de este dispositivo representaría un ahorro significativo en la adquisición de un equipo de este tipo, además su diseño es similar a los generadores industriales y permite realizar un análisis más certero del funcionamiento de estos equipos.

Las barreras que se pueden encontrar en la realización de este proyecto es que la facultad consiga ver viable el proyecto y permita suministrar los rubros necesarios para su construcción, sin embargo hasta este trabajo se enfoca puntualmente en la propuesta. Por esta razón es indispensable enfocarse en el diseño del dispositivo y realizar las simulaciones de resistencia y funcionamiento del equipo. Para esto lo más importante es tener un plan de diseño adecuado, con un orden lógico de pasos para su desarrollo por lo cual la pregunta problema que se genere sería ¿Cuál podrá ser la metodología más adecuada para el diseño de un generador de vapor para un laboratorio? Esta pregunta nos lleva a reflexionar acerca de las herramientas que se van a utilizar para diseñar el generador de vapor, pues si bien sabemos pueden haber un sinnúmero de caminos y trabajos para realizar el diseño, sin embargo hay que tener en cuenta, cual puede ser el camino más sencillo pero que el diseño cumpla con todos los requerimientos necesarios para que el dispositivo sea funcional e incluso tratar de que sea lo más estético posible sin que esto afecte su trabajo.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Existen diversos tipos de generadores de vapor en la industria. Entre los más utilizados se encuentran los pirotubulares y los Acuotubulares. Entre estos, la principal diferencia es la forma de evaporar el fluido de trabajo, utilizando el mismo principio pero diferente proceso.

Para satisfacer la necesidad de instruir a los estudiantes del programa de Ingeniería Mecánica en el diseño, funcionamiento y mantenimiento de los generadores de vapor industriales, de aquí la importancia de la propuesta de construcción de uno de estos dispositivos, que puede ser de manera sencilla y a un costo relativamente más económico si lo comparamos con un equipo de producción similar en el mercado.

Los generadores de vapor Acuotubulares poseen una mayor producción de vapor que los pirotubulares, sin embargo, ambos diseños son distintos. Un generador pirotubular que hace pasar serpentines a altas temperaturas dentro de un fluido de trabajo puede llegar a ser mucho más sencillo de construir, pero un generador que pase fluido de trabajo por el mismo serpentín y que encuentre altas temperaturas al exterior de este generará mucho más vapor, a una mayor presión, como es el caso de los generadores Acuotubulares.

El programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma del Caribe, como programa acreditado, necesita mantenerse a la vanguardia con laboratorios completos que complementen de manera práctica los conocimientos de los estudiantes.

Las termoeléctricas son industrias comunes en la región Caribe colombiana, donde contamos con la mayor planta de generación eléctrica en toda Latinoamérica como lo es la Térmica de barranquilla S.A (TEBSA) que trabaja con la empresa Generadora y comercializadora de energía del caribe S.A ESP (Gecelca), quien también posee una planta en el municipio de Mingueo llamada Termoguajira, que tiene una producción menor pero sigue siendo aún una gran termoeléctrica. Ellas utilizan tipos de ciclos termodinámicos para la generación de energía eléctrica del tipo Rankine y combinado. En estos ciclos, o cualquier ciclo termodinámico, existen intercambiadores de calores, algunos para condensar u otros para convertir el fluido de trabajo en vapor. Estos últimos, los generadores de vapor, son equipos esenciales ya que producen el fluido que lleva la energía cinética que permite mover los alabes de los generadores para producir, por principio de inducción, energía eléctrica para el consumo cotidiano.

Frente a la gran oferta de ingenieros mecánicos en la industria, la baja oferta de empleo, y contando con las termoeléctricas que se tienen en la región Caribe, es necesario que la Universidad Autónoma del Caribe provea al mercado egresados altamente calificados y que tengan la mayor experiencia posible en las diferentes situaciones de este tipo de equipo y con el desarrollo de este proyecto se contribuye a que los egresados del programa cuenten con más herramientas y un plus con respecto a los egresados de otras instituciones en cuanto a estos equipos se refiere.



### **1.3.OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Diseñar los planos de construcción de un Generador de Vapor tipo acuatubular de presión subcrítica y baja producción de vapor como equipo de laboratorio y realizar la simulación de esfuerzos asistida por Software.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- a)** Identificar y seleccionar los parámetros de diseño mecánico de los sistemas del Generador de Vapor.
  
- b)** Diseñar cada sistema del generador y los esfuerzos de cada uno de dichos sistemas.
  
- c)** Elaborar los planos de construcción del Generador de Vapor.

## **1.4 ESTADO DEL ARTE**

Los generadores de vapor son parte fundamental de múltiples procesos de producción como lo son el sector de las termoeléctricas. También en la región caribe se cuenta con importantes termoeléctricas que, obviamente, utilizan este tipo de dispositivos mecánicos. Es por esta razón que el avance en el diseño de estos dispositivos ha sido imprescindible en la industria.

Actualmente Siemens, que trabaja en la construcción del generador solar de turbinas de vapor más grande hasta la fecha para la planta solar Ivanpah de BrightSource, explica la manera por la cual las turbinas facilitan la distribución de energía solar limpia.

Para justificar el costo de la inversión en una planta CSP, que no funciona las 24 horas del día, se requiere que la turbina de vapor que se use en este proceso alcance las altas demandas de eficiencia y produzca ganancias económicas crecientes.

La industria ya ha presenciado el ascenso de las turbinas, que usan la idea del recalentamiento para mejorar la eficiencia y reducir los costos de inversión de la planta.

En cuanto al progreso realizado por la empresa, Siemens, que recibió un contrato para la Nevada Solar One en agosto de 2005 para recalentar de forma directa un set de generador de turbina de vapor SST-PAC-700RH, está construyendo el generador solar de turbina de vapor más grande hasta la fecha para la planta solar Ivanpah de BrightSource.

A nivel regional, he investigado y los avances se realizan en la implementación de nuevas filosofías de mantenimiento en estos equipos. La parte del diseño se encuentra a cargo de las grandes empresas generadoras de estos equipos, sin embargo se cuenta con el estudio y la innovación en este campo en:

**Autor:** John Mauricio chica mazabel, David Fernando guerrero Figueroa.

**Fecha:** Febrero 2011

**Lugar:** Santiago de Cali

**Universidad:** Autónoma de occidente

**Localización:** John Mauricio chica mazabel, David Fernando guerrero Figueroa.

**Tomado de:** <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/1290/1/TMK00426>

“Diseño del control automático de gases de combustión en la caldera de ingenio maría luisa S.A”.

El proyecto muestra un proceso de diseño en automatización para el sistema de alimentación con bagazo como combustible en la caldera del ingenio María luisa S.A.; que inicialmente operaba sin tener un control de la cantidad Necesaria de este material a la entrada de los alimentadores de bagazo. Para este inconveniente, se diseñó una estrategia de control que vincula por medio de I/O control como software, la interfaz entre el usuario con el funcionamiento de los motores que regulan la cantidad de combustible que necesita la caldera.

Se puede encontrar un análisis de la eficiencia presente en la actualidad la cual la Realizó personal del centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia Quienes aportaron conocimientos a la consecución de este trabajo como opción de grado; se presenta además un estudio de eficiencia teórica que podría alcanzar la caldera con las mejoras propuestas en este diseño de control que en futuro se Representan en beneficios económicos para el ingenio y como ayuda para el Medio ambiente, aprovechando al máximo de los recursos que tiene la empresa a Su disposición.

**Autor:** Ruíz Lara, Ricardo José.

**Fecha:** Septiembre de 2012

**Lugar:** Sangolqui, Ecuador.

**Universidad:** Escuela politécnica del ejército.

**Tomado de:** <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5866>

“Diseño de una caldera con recuperación de calor HRSG (Heat Recovery Steam Generator) en un ciclo combinado para la Refinería de EP. Petroecuador”.

El proyecto tiene la finalidad definir parámetros y conceptos fundamentales para realizar el diseño de intercambiadores de calor utilizando la energía de desperdicio almacenada en los gases de escape de una turbina de gas y la energía de una fuente convencional de calor como lo es un quemador de fuel oil (bunker) para la producción de vapor saturado en la refinería estatal de EP. PETROECUADOR ubicada en La Libertad. El vapor saturado dentro de la refinería tiene múltiples propósitos como son: Ayudar a la separación de las diferentes fracciones de petróleo mediante la inyección de vapor a las torres de fraccionamiento. Atomizar el combustible de los hornos para el calentamiento del crudo. Precalentar el agua de alimentación para el caldero. Colaborar en las labores de limpieza de tanques, tuberías, pisos, etc. Ayudar al sistema contra incendios ante una eventual emergencia. El diseño de calderos con recuperación de calor, se fundamenta en el aprovechamiento de una energía de desecho la cual es generada durante un proceso

de combustión para el precalentamiento del agua consiguiendo así un aumento en la eficiencia del sistema de generación de vapor, lo que se traduce en un ahorro muy significativo de combustible para la empresa, que en este caso particular es la refinería La Libertad.

**Autor:** Mayra de la c. Troncoso-Fleitas, Héctor R. Acosta-palmer

**Fecha:** marzo de 2011

**Lugar:** La Habana, cuba

**Universidad:** Instituto superior politécnico José Antonio Echeverría.

**Tomado de:**

<http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/viewFile/15>

“El mantenimiento en la confiabilidad y disponibilidad de un sistema de generación de vapor”. ISSN 1815-5944.

El proyecto agrupa los principales hallazgos de seguridad detectados en Sistemas de Generación de Vapor, SGV, que influyen en su confiabilidad y disponibilidad y son causados por debilidades en la función mantenimiento. Los hallazgos han sido identificados mediante la aplicación de Técnicas de Identificación de Peligros, TIP, como Revisiones de Seguridad, Análisis HAZOP y Análisis Qué pasa si?, entre otras metodologías y técnicas disponibles, a más de unas treintena instalaciones donde los SGV han cumplido funciones tanto de apoyo a la producción como a los servicios. Agrupar y analizar estos hallazgos, problemas o desviaciones de seguridad han revelado que, independientemente del grado de cultura de seguridad que presente la instalación objeto de estudio, tienen un mismo origen y requieren de acciones similares para su gestión.

**Autor:** Troncoso Fleitas, M. y Acosta Palmer

**Fecha:** 28 de abril 2011

**Lugar:** La Habana cuba.

**Universidad:** Instituto superior politécnico José Antonio Echeverría. Tomado de:

**Tomado de:**

<http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/viewFile/15>

“Influencia del mantenimiento en la confiabilidad y disponibilidad de un sistema de generador de vapor”. ISSN 1815-5944.

El presente trabajo tiene como objetivo revelar y los principales hallazgos de seguridad detectados en Sistemas de Generación de Vapor, SGV, que influyen en su confiabilidad y Disponibilidad y son causados por debilidades en la función mantenimiento. Los hallazgos han sido identificados mediante la aplicación de Técnicas de Identificación de Peligros, TIP, como Revisiones de Seguridad, Análisis HAZOP y Análisis Qué pasa si?, entre otras metodologías y técnicas disponibles, a más de una treintena de instalaciones donde los SGV han cumplido funciones tanto de apoyo a la producción como a los servicios. Agrupar y analizar estos hallazgos, problemas o desviaciones de seguridad han revelado que, independientemente del grado de cultura de seguridad que presente la instalación objeto de estudio, tienen un mismo origen y requieren de acciones similares para su gestión.

**Autor:** Paredes Terán, Rosa Elena

**Fecha:** junio 2012

**Lugar:** Sangolqui, ecuador.

**Universidad:** Sangolqui, ecuador.

**Tomado de:** <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5659>

“Ingeniería Básica y de detalle de una Caldera Piro-tubular para Calentamiento de 5 galones de agua por minuto con quemador para combustible a diesel para la Empresa Servicios Industriales Integrales”.

Este proyecto de grado se basa en la Ingeniería Básica y de Detalle de una Caldera Piro-tubular para calentamiento de 5 galones de agua por minuto quemador para Combustible a Diesel, para obtener un estudio completo del desempeño del equipo, su rendimiento y seguridad; lo que se desea implementar es un nuevo modelo de fácil instalación y sea viable para los hogares, con lo de deja a un lado los sistemas comunes que como calefones o calentadores eléctricos. Además en nuestro país, existe un alto déficit de recursos energéticos, con el fin de dar una solución más rentable este sistema para calentamiento de agua se utilizado mucho en la industria, hospitales, etc. La energía, es considerada como el eje principal de todas las actividades que realizan los seres vivos, y por tanto su incorrecta utilización es un aspecto muy preocupante en la actualidad.

**Autor:** Guillermo Jarquin López, Georgiy Polupan, Juan Antonio Jiménez García, Yevgen Pysmenny.

**Fecha:** Abril-junio 2011

**Lugar:** México.

**Revista:** Científica, vol. 15, núm. 2.

**Tomado de:** <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61420351005>

“Metodología de cálculo de NO<sub>x</sub> en generadores de vapor que queman gas natural”

El trabajo presenta la metodología para el cálculo de emisiones de NO<sub>x</sub> en un generador de vapor de 350 ton/h quemando gas natural y se investigan los métodos de control de NO<sub>x</sub> durante la combustión. Hoy en día es uno de los principales problemas de las plantas termoeléctricas puesto que genera un alto nivel de emisiones de óxidos de nitrógeno a la atmósfera. Esta metodología

consiste en la determinación de los cuatro parámetros fundamentales que intervienen en la formación de NOx y son los siguientes: coeficiente de exceso de aire en la zona de combustión activa (ZCA)  $\alpha$ ZCA, la temperatura promedio de la ZCA TZCA, el flujo de calor reflejado en ZCA y el tiempo de residencia de los gases en ZCA Para poder determinar estos parámetros se tiene que considerar la composición del gas natural, la transferencia de calor en el horno, las condiciones de funcionamiento y las dimensiones del generador de vapor, entre otros factores. Los cuatro parámetros principales se sustituyen en el polinomio experimental para el combustible en cuestión y, de esta forma, se puede determinar la emisión de NOx para los métodos de combustión que se analizarán en el presente artículo: recirculación de gases, diferentes lugares de introducción de gases de recirculación, combustión a dos etapas e inyección de agua.

**Autor:** SEN SANZ, Alberto. GALVÁN, Marcos. SALVADOR, Lino José.

**Fecha:** Noviembre de 2000

**Lugar:** Hotel melia avenida de américa, Madrid.

**Revista:** 3 Edición, Grupo Editorial CEAC.

**Tomado de:**

<http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/CALDERAS/Curso%20ISA%20CONTROL%20CALDERAS%20DE%20VAPOR>  
“Control y seguridad de calderas”

La edición del libro control de una caldera es un tema extenso que incluye tanto los procedimientos de arranque y parada como los enclavamientos de seguridad y la operación en continuo de la caldera. Tradicionalmente al desarrollar el control de una caldera, las acciones de modulación de la misma se desarrollaban con equipos analógicos (continuos). Las secuencias de arranque y parada, así como los enclavamientos, son acciones digitales (todo/nada) que implicaban equipos digitales. Actualmente, debido a los avances en los sistemas basados en microprocesador es posible integrar estos dos sistemas en uno solo, aunque se siguen manteniendo



algunos condicionantes en lo que se refiere a los equipos dedicados a la seguridad de la caldera.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. DEFINICIÓN DE GENERADOR DE VAPOR

A la combinación de una caldera y un sobrecalentador se le conoce como generador de vapor. Una caldera es un aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.

El estudio de los generadores se tiene que debe considerar los siguientes componentes:

**2.1.1 El hogar** que es la cámara donde se realiza la combustión. La cámara confina los productos de la combustión y puede resistir altas temperaturas y las presiones

---

<sup>1</sup>MILES, DEGLER J. La producción de energía mediante vapor de agua. Primera Edición. 1978. Ed. Reverté.

que se utilizan. Sus dimensiones y geometría se deben adaptar a la velocidad con que se libera el calor, al tipo de combustible y al método de combustión completa.

**2.1.2** Los **quemadores** son los dispositivos que permiten realizar la mezcla entre el combustible y el carburante de manera controlada para lograr una buena combustión, de esta manera asegurando la potencia calorífica requerida, por medio de una flama.

**2.1.3** Los **combustibles** que permiten reaccionar químicamente con otras sustancias y producir calor.

**2.1.4** La **caldera** propiamente dicha, compuesta de un cuerpo cilíndrico de lámina de acero herméticamente cerrado y expuesto a la acción de las llamas y de los gases calientes.

**2.1.5** El **conducto de humos**, que conducen a los productos de la combustión desde el hogar hasta la chimenea.

El proceso para la generación de vapor en cada componente del generador es el siguiente. En el hogar, se produce la combustión de un combustible. La caldera es un intercambiador de calor en el que los gases de la combustión calientan la fase líquida hasta su transformación en vapor. El sobrecalentador calienta el vapor saturado por encima de su temperatura de saturación y, opcionalmente, el economizador precalienta el agua de alimentación de la caldera. En ciertas instalaciones de vapor, algunos calentadores se encargan de recalentar el vapor de extracción de las turbinas. Finalmente, el calentador de aire calienta el aire necesario para la combustión.

## **2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS GENERADORES DE VAPOR**

Las calderas o generadores de vapor se clasifican en piro-tubulares y acuotubulares. Las piro-tubulares son aquellas en las que los humos de la combustión circulan por el

interior de los tubos y el agua, por el exterior. En general, se trata de calderas pequeñas con presiones inferiores a 20 bares. Las acuotubulares son aquellas en las que el agua circula por el interior de los tubos, son las más comunes.

Aparte de estos criterios de clasificación, existen otros que hacen innumerables los tipos de calderas actualmente existentes. Por ejemplo:

Según el combustible utilizado: calderas de gas, de gasóleo o de carbón. Según el medio de transporte de calor: calderas de fluido térmico (FT), de agua caliente, de agua sobrecalentada (ASC), de vapor saturado o de vapor sobrecalentado. Según la presión de trabajo: pueden ser: Subcríticas: de baja presión ( $p \leq 20$  bar), de media presión ( $20 \leq p \leq 64$  bar); de alta presión ( $p \geq 64$  bar) o Supercríticas:  $p > 221$  bar. Según su posición, pueden ser de pie o murales. Según la recuperación entálpica de los humos, existen calderas con o sin recuperación entálpica.

### **2.2.1. Generador de Vapor Pirotubular.**

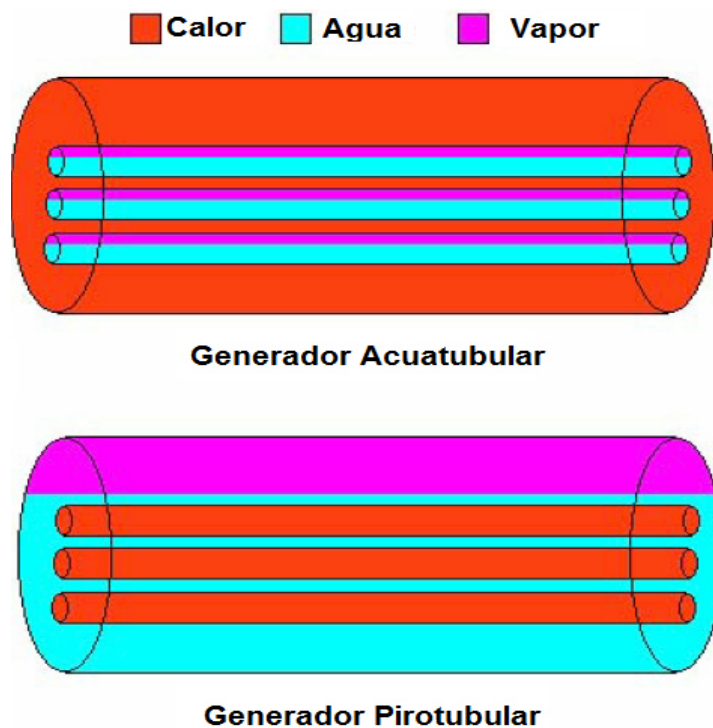
Los gases pasan por el interior de tubos sumergidos en el interior de una masa de agua, todo ello rodeado por un cuerpo o carcasa exterior. Los gases al atravesar los tubos ceden su calor sensible al agua que los rodea produciéndose la vaporización en las proximidades de los tubos. Los gases puede recorrer varias veces la longitud de la caldera. El diseño está limitado por la presión del vapor, ya que las presiones superiores a 25 bares obligarían a usar fuertes espesores de virola. La producción de vapor alcanza como máximo 35 t/h.

### **2.2.2. Generador de Vapor Acuotubular**

El agua líquida entra al economizador, donde se calienta hasta una temperatura próxima a la de saturación, se introduce en el calderín y desciende por los tubos de riego hasta el colector inferior, distribuyéndose hacia los tubos vaporizadores, donde se forman las burbujas de vapor que a su vez se separan en el calderín. El vapor

saturado puede calentarse por encima de su temperatura de saturación en el sobrecalentador. La circulación del agua por los tubos de bajada (riegos) y de subida (vaporizadores) puede ser por convección natural, debido a la diferencia de densidades o forzada mediante una bomba.

**Figura 1. Tipos de generadores de Vapor según el tipo de generación.**

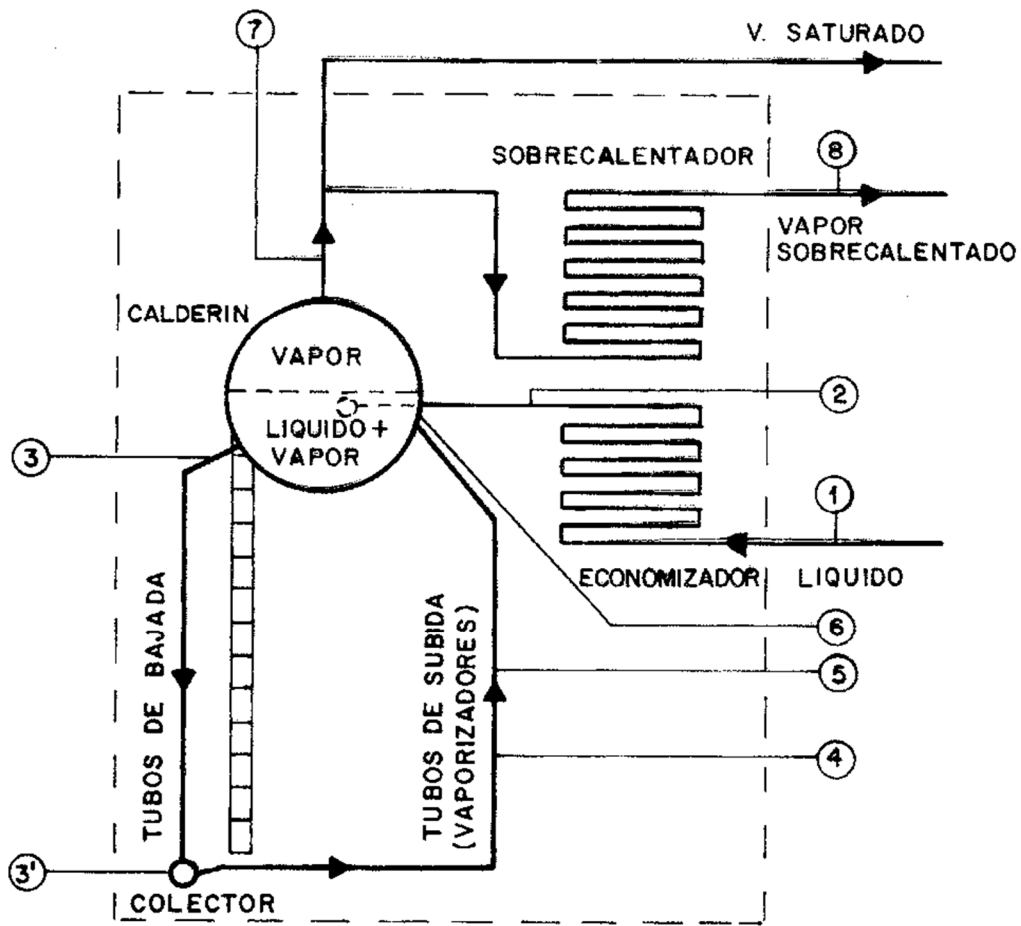


*Fuente. Manual SELMEC de generadores de vapor.*

En los generadores Acuotubulares Gracias a que tienen el hogar en el interior del cuerpo cilíndrico de la caldera, todo el calor atraviesa las paredes del hogar, sin duda debe pasar por el agua, así la formación del vapor se distribuye de una manera mucho más uniforme dentro de la masa de agua. Se usan para obtener elevadas presiones. Algunas de las ventajas de la construcción de este tipo de generadores es el costo reducido, forma simple de los tubos, accesibilidad, buena transferencia de calor, buena circulación y elevada producción de vapor.

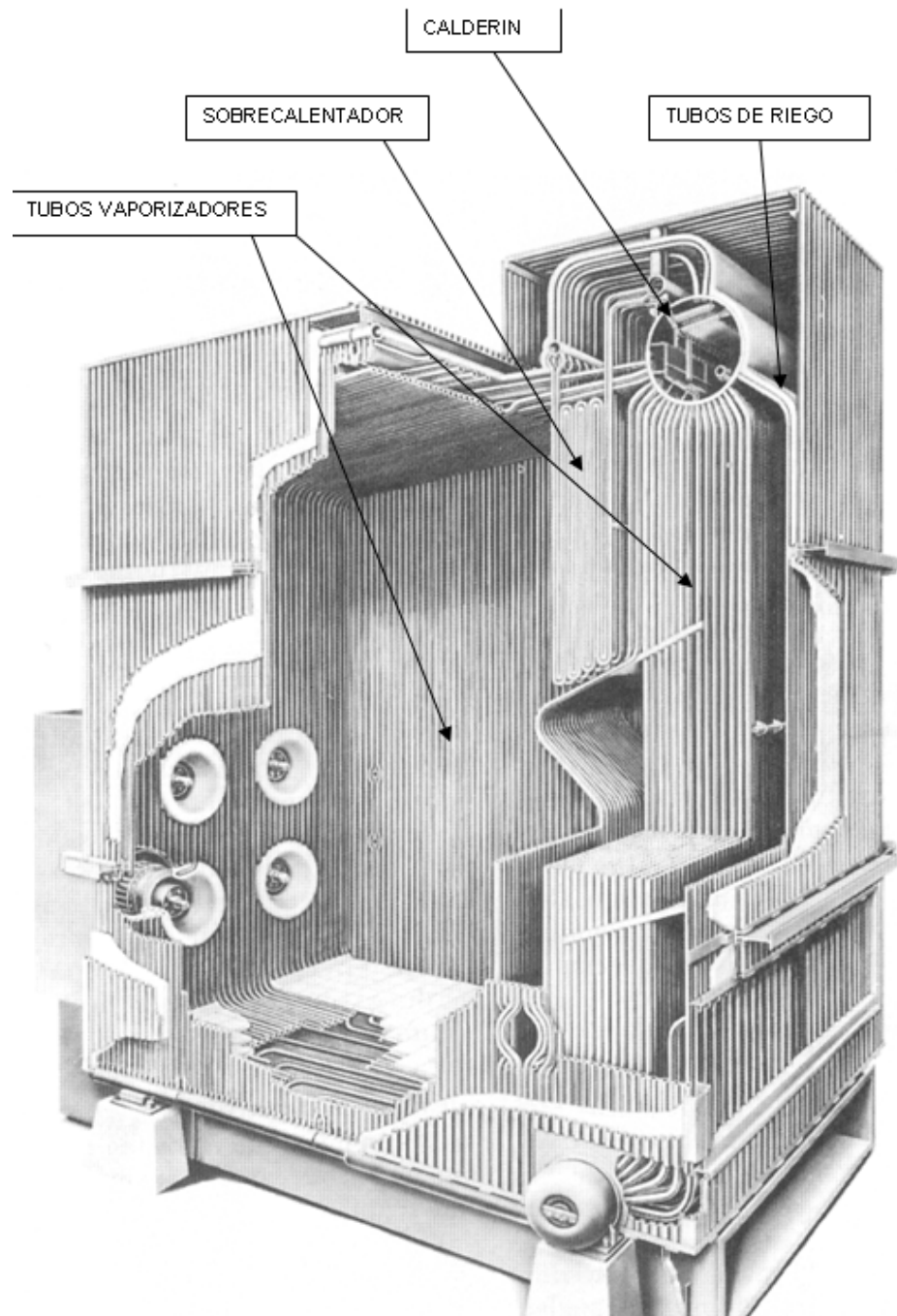
Otros tipos de generadores de vapor son los de tubos rector inclinados, los propios de las centrales térmicas, los de circulación forzada y los que trabajan con calor perdido.

***Figura 2. Esquema de una caldera Acuotubular de vapor saturado y sobrecalentado mostrando sus diferentes secciones.***



Fuente. Babcock y Wilcox. Catálogo general de generadores de vapor.

**Figura 3. Interior de una caldera acuatubular con combustión central**



*Fuente. L.A. Molina y J.M Alonso: Calderas de Vapor en la Industria*

### **2.2.3. Calderas de fluido térmico (FT) y agua sobrecalentada (ASC).**

Este tipo de calderas básicamente consisten en un circuito en forma de serpentín o haz de tubos por donde circula el fluido. La llama se produce en la zona intermedia y la mayor cantidad de calor se cede al fluido por radiación. Las calderas de FT permiten trabajar a baja presión y temperaturas hasta 350°C; utilizan aceites orgánicos que se descomponen a alta temperatura, desprendiendo sustancias volátiles, por lo que deben evitarse recalentamientos locales en las superficies de intercambio. Las calderas de ASC suelen trabajar entre 140 y 170°C, lo que supone presiones de operación superiores a 4 y 8 bar, respectivamente.<sup>2</sup>

## 2.3. RENDIMIENTOS DE LA CALDERA

### 2.3.1. Rendimiento instantáneo y rendimiento nominal.

En un generador de vapor, la *potencia calorífica útil*  $\dot{Q}_u$  es la energía por unidad de tiempo empleada en transformar el agua líquida de alimentación en vapor. Se expresa como sigue:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_v (h_v - h_w) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Siendo  $\dot{m}_v$ , el caudal másico de vapor;  $h_v$ , la entalpía del vapor a la salida y  $h_w$ , la entalpía del agua líquida de alimentación.

En general, el caudal de vapor, o vapor producido, no es constante. Depende de las necesidades de la planta o central de vapor, aunque no es probable que esté sometido a fluctuaciones notables. La mayoría de los generadores de vapor tienen un punto de funcionamiento óptimo en el cual el rendimiento es máximo. La potencia calorífica útil, referida a estas condiciones óptimas de funcionamiento, es la *potencia nominal*  $\dot{Q}_n$ .

---

<sup>2</sup> L.A. MOLINA y J.M ALONSO: *Calderas de Vapor en la Industria.*, Ed. Cadem-Eve, Bilbao.



La *potencia aportada* por el combustible  $\dot{Q}_c$ , es:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot PCI \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Siendo  $\dot{m}_c$ , el caudal másico de combustible y  $PCI$ , su poder calorífico inferior.

El rendimiento instantáneo  $\eta_i$  establece la relación entre la potencia calorífica útil instantánea y la potencia calorífica aportada por el combustible. Así pues:

$$\eta_i = \left( \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_c} \right)_i \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde el subíndice  $i$  hace referencia a valores instantáneos.

El rendimiento nominal tiene una definición análoga, pero utilizando la potencia calorífica nominal de la caldera:

$$\eta_n = \frac{\dot{Q}_n}{\dot{Q}_c} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Aplicando las definiciones de la potencia útil y de la potencia aportada, el rendimiento de la caldera puede expresarse:

$$\eta_n = \frac{\dot{m}_v (h_v - h_w)}{\dot{m}_c PCI} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

En esta ecuación no hemos indicado con un subíndice si se trata de valores instantáneos o nominales. Deberá entenderse en el contexto.

### 2.3.2. Rendimiento Estacional

Cuando se desea determinar el consumo de combustible durante un período de tiempo determinado, no puede utilizarse el rendimiento instantáneo ni el nominal, porque ninguno de los dos expresa el rendimiento medio de la caldera durante un período de tiempo. Para ello, se define el rendimiento estacional  $\eta_e$ :

$$\eta_e = \frac{Q_u}{\dot{Q}_c n_a} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde  $Q_u$  es la energía útil de la caldera, generalmente en kWh, durante el período de tiempo considerado y  $n_a$ , el número de horas de funcionamiento de la caldera durante el mismo período de tiempo. En el apartado 6 se amplía este concepto de rendimiento estacional.

La energía útil de una caldera  $Q_u$ , se puede expresar en función de sus pérdidas. Consideremos un período de un año y que la caldera suministra energía a una instalación de calefacción:

$$Q_u = \dot{Q}_c n_a - \dot{P}_1 n_a - \dot{P}_f n \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Siendo  $n$  las horas anuales de funcionamiento de la instalación y  $n_a$  las de funcionamiento de la caldera. Obsérvese que la potencia de pérdidas fijas se ha multiplicado por las horas de funcionamiento de la instalación, puesto que prosiguen, al menos en parte, con el quemador de la caldera parado.

Si sustituimos  $Q_u$  de se obtiene:

$$\eta_e = 1 - \frac{\dot{P}_1}{\dot{Q}_c} - \left( \frac{\dot{P}_f}{\dot{Q}_c} \right) \frac{n}{n_a} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde el subíndice  $a$  del paréntesis hace referencia a un período anual.

Designando por  $p_{fm}$  la pérdida unitaria fija correspondiente al período considerado:

$$p_{fm} = \left( \frac{\dot{P}_f}{\dot{Q}_c} \right)_a \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Y por  $p_f$ , la pérdida unitaria correspondiente a los humos, podemos escribir:

$$\eta_e = 1 - p_1 - p_{fm} \frac{n}{n_a} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Designando por  $p_f$  la pérdida unitaria fija en condiciones de funcionamiento nominal:

$$p_f = \frac{\dot{P}_f}{\dot{Q}_c} \quad \text{(Ecuación 11)}$$

La relación entre  $p_f$  y  $p_{fm}$  depende del número de paradas que efectúa la caldera durante el período de funcionamiento de la instalación. De forma orientativa, suele tomarse  $p_{fm} = 0,75 p_f$ , con lo cual (20) quedaría:

$$\eta_e = 1 - p_1 - 0,75 p_f \frac{n}{n_a} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Una manera alternativa de calcular el consumo de combustible, también de forma aproximada, consiste en utilizar directamente la definición del rendimiento estacional y calcular el calor útil a partir del concepto de grados-día.<sup>3</sup>

### 2.3.3 Balance de materia y energía.

La figura 3 representa un esquema de un generador de vapor con indicación de las entradas y salidas de materia y energía. El balance de masas es:

<sup>3</sup> L.A. MOLINA y J.M ALONSO: *Calderas de Vapor en la Industria.*, Ed. Cadem-Eve, Bilbao, 1996.

$$\text{Circuito de gases : } \dot{m}_a + \dot{m}_c = \dot{m}_g \quad \text{(Ecuación 13)}$$

$$\text{Circuito de agua : } \dot{m}_w = \dot{m}_v \quad \text{(Ecuación 14)}$$

Donde  $\dot{m}_a$  es el caudal másico de aire de la combustión;  $\dot{m}_c$ , el de combustible;  $\dot{m}_g$ , el de gases de combustión;  $\dot{m}_w$ , el de agua líquida de alimentación y  $\dot{m}_v$ , el de vapor.

Si se producen pérdidas de agua y purgas para rebajar el contenido de sales en la caldera, habría que añadir estos términos al balance en el circuito de agua.<sup>4</sup>

Por su parte, el balance energético es:

$$\dot{m}_c PCI + \dot{m}_a h_a + \dot{m}_w h_w = \dot{m}_g h_g + \dot{m}_v h_v + \dot{P}_2 + \dot{P}_3 \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Donde  $h_a$  es la entalpía del aire a la entrada;  $h_w$  la del agua de alimentación a la entrada;  $h_g$ , la de los gases de combustión a la salida;  $h_v$ , la del vapor a la salida;  $\dot{P}_2$  es la potencia calorífica perdida por convección y radiación a través de las paredes y  $\dot{P}_3$ , es una pérdida de potencia calorífica que tiene en cuenta combustiones incompletas y la producción de cenizas resultante de la combustión de líquidos y sólidos. La suma  $\dot{P}_2 + \dot{P}_3$ , recibe el nombre de pérdidas fijas y se representa por  $\dot{P}_f$ .

Ordenando términos y dividiendo por  $\dot{m}_c PCI$  se obtiene:

---

<sup>4</sup> MOLINA, L. A. y MOLINA, G.: *Manual de Eficiencia Energética Térmica en la Industria*, CADEM, Bilbao, 1993.

$$1 - \frac{\dot{m}_g h_g - \dot{m}_a h_a}{\dot{m}_c PCI} - \frac{\dot{P}_2}{\dot{m}_c PCI} - \frac{\dot{P}_3}{\dot{m}_c PCI} = \frac{\dot{m}_v h_v - \dot{m}_w h_w}{\dot{m}_c PCI} \quad \text{(Ecuación 16)}$$

Cada uno de los sustraendos del primer miembro, es una pérdida unitaria (kW de pérdidas por kW de potencia aportada por el combustible que se conviene en representar como sigue:

$$p_1 = \frac{\dot{m}_g h_g - \dot{m}_a h_a}{\dot{m}_c PCI} \quad \text{(Ecuación 17)}$$

$$p_2 = \frac{\dot{P}_2}{\dot{m}_c PCI} \quad \text{(Ecuación 18)}$$

$$p_3 = \frac{\dot{P}_3}{\dot{m}_c PCI} \quad \text{(Ecuación 19)}$$

$p_1$  es la pérdida unitaria debida a los gases de la combustión, que en ocasiones se denomina pérdida por chimenea. El segundo miembro de (9) es el rendimiento instantáneo. Así pues:

$$\eta_i = 1 - p_1 - p_2 - p_3 = 1 - p_1 - p_f \quad \text{(Ecuación 20)}$$

Las pérdidas fijas son valores generalmente comprendidos entre 2,5 y 7,5 %. Las pérdidas debidas a los gases de la combustión admiten una cierta simplificación si aceptamos que:  $\dot{m}_g \cong \dot{m}_a$

Con lo cual:

$$p_1 \cong \frac{\dot{m}_g (h_g - h_a)}{\dot{m}_c PCI} = \frac{\dot{m}_g c_{p,g} (t_g - t_a)}{\dot{m}_c PCI} = \frac{r_g c_{p,g} (t_g - t_a)}{PCI}$$

### (Ecuación 21)

Donde  $r_g$  es la relación gases-combustible y  $c_{p,g}$ , el calor específico medio de los gases de combustión entre  $t_g$  y  $t_a$ .

#### **2.3.4 Consideraciones generales de la generación de vapor**

Como fluido térmico, el vapor de agua es extremadamente valioso porque puede ser producido en cualquier lugar haciendo uso del calor proveniente de un combustible que esté disponible. El vapor también tiene propiedades únicas que son extremadamente importantes en la producción de energía: se conserva en los ciclos de vapor y no resulta ser tóxico en caso de presentarse fugas. Otra ventaja del agua es que debido a su amplio uso en la industria y en la investigación, sus propiedades térmicas están ampliamente documentadas en la literatura, facilitando el diseño de componentes que la utilizan como fluido térmico. A continuación se describe el proceso que permite la obtención de vapor por el paso a través de sus diferentes fases.

##### **2.3.4.1 Estados de líquido subenfriado y vapor sobrecalentado**

La generación de vapor de agua a partir de agua líquida se lleva a cabo añadiendo el calor proveniente de una fuente térmica (resistencia eléctrica, combustible sólido, líquido o gaseoso, reacciones nucleares o radiación solar) necesaria para llevarle desde su estado como líquido subenfriado hasta el estado de líquido saturado, produciendo un aumento de su temperatura. A partir de este punto, si se continúa añadiendo calor, la temperatura no aumenta y se mantiene constante en un valor denominado *Temperatura de saturación*, lo que a su vez fija la presión del sistema en una *Presión de Saturación* correspondiente, hasta alcanzar el estado de vapor saturado seco. Esto se denomina *Ebullición*, y se tratará en la siguiente sección. A partir de este punto desaparecen los últimos vestigios de líquido y se alcanza la zona de vapor sobrecalentado.

El líquido subenfriado o líquido comprimido es una fase en que el agua posee propiedades altamente incompresibles por lo cual su volumen específico varía muy poco con el aumento de la presión. Cuando se define líquido subenfriado se entiende como un líquido a una temperatura menor que su temperatura de saturación para una presión determinada. Y cuando se habla de líquido comprimido, se entiende como un líquido a una presión mayor a la presión de saturación para una temperatura dada. En cualquier caso, esta fase implica que el líquido no está a punto de evaporarse.

El vapor sobrecalentado por su parte se define como la fase cuya temperatura está por encima del vapor saturado para una presión dada y no está a punto de condensarse.

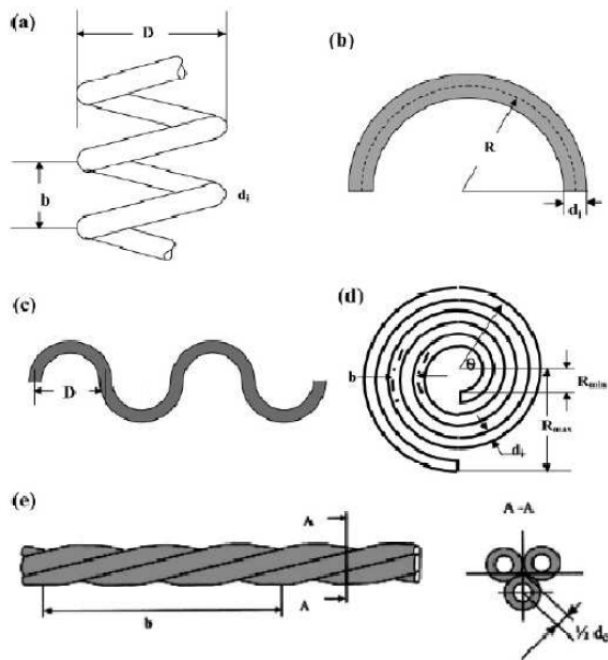
#### **2.3.4.2 Estado de mezcla líquido-vapor. Proceso de Ebullición**

Cuando se añade suficiente calor al líquido subenfriado como para que se genere la primera burbuja de vapor o cuando se extrae la suficiente energía de un vapor de modo que aparezca la primera gota condensada, se inicia el proceso de cambio de fase. Si es un calentamiento se llama ebullición y si es un enfriamiento se llama condensación. En los procesos de cambio de fase, la temperatura y presión de la sustancia se mantienen constantes hasta que se evapore todo el líquido o se condense todo el vapor. Existen básicamente dos modos de transferencia de calor por ebullición: Ebullición en masa o en estanque (en inglés *Pool Boiling*) y Ebullición con convección Forzada (en inglés *Forced Convective Boiling*).

#### **2.3.5 Consideraciones generales acerca de los tubos curvos.**

La complejidad de la mecánica de fluidos que ocurre al interior los tubos curvos ha sido un Campo imprescindible para la investigación en las últimas décadas . En la

literatura se sugiere que las primeras investigaciones del flujo en geometrías curvas pueden encontrarse en los trabajos de Thompson, Williams, Grindley y Gibson [17], y Eustice. Dean fue el primero en desarrollar una solución analítica para un flujo laminar completamente desarrollado en un tubo curvo de sección transversal circular; Jeschke fue el primero en reportar los resultados experimentales de la transferencia de calor en dos serpentines helicoidales para una condición turbulenta, desarrollando una correlación empírica. Las diferentes geometrías de tubos curvos pueden ser clasificadas como: toroides (curvatura constante con cero paso de hélice), tubos helicoidales (curvatura y paso constantes), tubos serpentines (curvas periódicas con paso cero), codos y dobles, espirales arquimedianas, y tubos retorcidos, como puede apreciarse en la Figura 2.4



**Figura 4.** Diferentes geometrías de tubos curvos a) Serpentes helicoidales, b) tubos doblados, c) Tubos serpentines, d) Espirales, e) Tubos retorcidos.

### 2.3.5.1 Aplicaciones industriales de las configuraciones de tubos curvos



Los usos de los tubos curvos en los procesos industriales pueden clasificarse en tres grandes áreas: el mezclado, la transferencia de calor y la transferencia de masa. Las aplicaciones industriales incluyen el mezclado de fluidos en una sola fase, el aumento de la transferencia de calor y de masa, la disolución de un gas en una fase líquida, la homogenización de la composición en la dirección transversal al flujo principal, en sistemas líquido-líquido, gas-líquido y sólido-líquido y el uso en reactores altamente exotérmicos.

### **2.3.5.2 Ventajas de los tubos curvos frente a los tubos rectos en el proceso de Transferencia de calor.**

El principio de funcionamiento de los tubos curvos así como las ventajas que se les atribuyen sobre el desempeño de los tubos rectos, se pueden resumir de la siguiente forma:

- a) Generación de un flujo secundario en la dirección radial debido al desbalance de las Fuerzas centrífugas,
- b) Potencializarían el proceso de mezclado en la sección transversal,
- c) Reducción de la dispersión axial,
- d) Mejoramiento del coeficiente convectivo de transferencia de calor
- e) Mejoramiento del coeficiente de transferencia de masa

### **2.3.6 Correlaciones experimentales para el cálculo de la transferencia de calor al interior del serpentín.**

Para calcular la transferencia de calor por convección desde la pared de un tubo hacia el fluido que viaja por el interior del mismo, se utiliza la ley de enfriamiento de Newton que viene dada por la ecuación:

$$\dot{Q} = hA \Delta T \quad \text{(Ecuación 22)}$$

Donde  $\dot{Q}$  es la tasa de calor transferido,  $h$  es el coeficiente convectivo,  $A$  es el área de transferencia de calor y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie del tubo, en el caso del calentamiento y sobrecalentamiento, donde la temperatura del fluido varía con la adición de calor. En el caso donde se presenta la ebullición, la temperatura del fluido permanece constante por lo que  $\Delta T$  se define como la diferencia de temperaturas entre la pared y la temperatura de saturación del fluido.

A continuación se hace un resumen de las correlaciones propuestas por diferentes autores para calcular el coeficiente de transferencia de calor  $h$ .

### **2.3.6.1 Correlaciones para el cálculo de la transferencia de calor en una sola fase en tubos curvos. Correlación de Seban y McLaughlin.**

Las correlaciones para el cálculo del coeficiente convectivo  $h$  en tubos rectos se encuentran ampliamente documentadas en la literatura, entre las cuales las más utilizadas son las propuestas por Sieder y Tate, y Gnielinski.

Para una configuración con forma de serpentín helicoidal y un fluido sin cambio de fase, el valor de  $h$  fue estudiado por Seban y McLaughlin. Estos autores propusieron una correlación para flujo turbulento la cual viene dada por la ecuación:

$$h = \frac{\bar{N}u \times k_l}{D} = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left[ Re^{\frac{1}{20}} \left( \frac{D}{D_H} \right)^{\frac{1}{10}} \right] \times \frac{k_l}{D} \quad \text{(Ecuación 23)}$$

Diseñar (o idear) es formular un plan para satisfacer una necesidad. En principio, una necesidad que habrá de ser satisfecha puede estar bien determinada. El diseño mecánico es el diseño de objetos y sistemas de naturaleza mecánica; piezas, estructuras, mecanismos, máquinas y dispositivos e instrumentos diversos. En su mayor parte, el diseño mecánico hace uso de las matemáticas, las ciencias de uso materiales y las ciencias mecánicas aplicadas a la ingeniería.

El diseño de ingeniería mecánica incluye el diseño mecánico, pero es un estudio de mayor amplitud que abarca todas las disciplinas de la ingeniería mecánica, incluso las ciencias térmicas y de los fluidos. A parte de las ciencias fundamentales se requieren, las bases del diseño de ingeniería mecánica son las mismas que las del diseño mecánico y, por, consiguiente, éste es el enfoque que se utilizará en el presente texto.<sup>5</sup>

#### **2.4.1 Teoría de la Energía De Distorsión de Von Mises-Henky.**

Es la teoría de falla más adecuada para materiales dúctiles y uniformes (resistencia aproximadamente igual a la resistencia a compresión), y cuya resistencia al cortante sea menor a la de tracción. Consiste básicamente en determinar la denominada tensión efectiva de Von Mises ( $\sigma'$ ), tras determinar el estado de tensiones del punto más castigado. Una vez obtenida la tensión de Von Mises, se compara con el límite elástico del material ( $S_y$ ), y obtenemos el coeficiente de seguridad del material.<sup>6</sup>

$$CS = \frac{S_y}{\sigma} \quad \text{(Ecuación 24)}$$

Tensión de Von Mises para un estado bidimensional de tensiones:

---

<sup>5</sup> RONDON MATHEUS, Oscar. El diseño de la Ingeniería de Máquina y su Evolución en la Historia. Encontrado en <http://casanchi.com/ref/ingemaquina01.pdf>

<sup>6</sup> MARÍN GARCÍA, Juan Manuel. Apuntes de Diseño de Máquinas Ed. 2. Tema 3 Diseño Mecánico bajo Cargas Estáticas. p. 73.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_3 + \sigma_3^2} \quad \text{(Ecuación 25)}$$

Tensión de Von Mises para un estado tridimensional de tensiones:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x + \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z + \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}}$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_1 \cdot \sigma_3} \quad \text{(Ecuación 26)}$$

## 2.4 RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN

Se considera como un recipiente sometido a presión cualquier vasija cerrada que sea capaz de almacenar un fluido a presión manométrica, ya sea presión interna o vacío, independientemente de su forma y dimensiones. Generalmente en el diseño se consideran los cálculos para los esfuerzos a los que está sometido como cilindros de pared delgada. Para realizar el cálculo de dichos esfuerzos es importante definir ciertos parámetros y conocer algunos conceptos.

Existen diferentes tipos de recipientes a presión los cuales se clasifican según su uso y su forma. Por su uso los podemos dividir en recipientes de almacenamiento y en recipientes de proceso. Los de almacenamiento sirven únicamente para almacenar fluidos a presión, y son conocidos como tanques de almacenamiento o tanques acumuladores, entre otros. Los recipientes a presión de proceso tienen múltiples y muy variados usos, entre ellos podemos citar los intercambiadores de calor, reactores, torres fraccionadoras, torres de destilación entre otros.

Por su forma, los recipientes sometidos a presión pueden dividirse en cilíndricos y esféricos. Los recipientes cilíndricos están a su vez subdivididos según su orientación, es decir que estos pueden ser horizontales o verticales. Los recipientes cilíndricos pueden también en algunos casos tener chaquetas para incrementar o decrecer la temperatura del fluido según sea el caso. Los

recipientes esféricos se utilizan para almacenar grandes volúmenes de fluidos a muy altas presiones debido a su geometría que expresa la forma natural que toman los cuerpos al “inflarse” por presiones internas, lo que los lleva a ser la forma más óptima para almacenar fluidos a presión; mas sin embargo, son más costosos, debido a su proceso de fabricación, que los recipientes cilíndricos.

Para realizar el análisis numérico del diseño de estos recipientes es necesario conocer algunos conceptos de ciertas variables como lo son:

- a. **Presión de operación (Po):** También se le conoce como presión de trabajo y es la presión manométrica a la que estará sometido un cuerpo o equipo en condiciones de trabajo normal.
  
- b. **Presión de diseño (P):** Este valor se tendrá en cuenta en las ecuaciones para el cálculo de las partes que forman los recipientes contenedores sometidos a presión. Su valor varía dependiendo de lo siguiente: Si el valor de la presión de operación es mayor a 300psi entonces el valor de la presión de diseño será de 1.1, pero si el valor de la presión de operación es menor o igual a 300psi entonces el valor de la presión de diseño será igual a la suma de la presión de operación más 30psi. Cuando se determine la presión de diseño hay que tener en cuenta la presión hidrostática debida a la columna del fluido que estemos manejando.
  
- c. **Presión de prueba (Pp):** Se conocerá como presión hidrostática de prueba y se cuantificará por medio de la siguiente ecuación:

$$Pp = P (1.3) Sta/Std \quad \text{(Ecuación 27)}$$

Dónde:

**P** = Presión de diseño.

**Sta** = Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura ambiente.

**Std** = Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura de diseño.

- d. Presión de trabajo máxima permisible:** Es, en condiciones de operación, la presión máxima a la que se puede someter un recipiente. Esto bajo las siguientes suposiciones: Bajo los efectos de la temperatura de diseño, en la posición normal de operación y finalmente bajo los efectos de otras cargas ambientales cuyos efectos deben agregarse a los ocasionados por la presión interna como cargas por vientos o presión hidrostática.

El valor de la presión de trabajo máxima permisible, se obtiene despejando la presión de diseño (P) de las ecuaciones que determinan los espesores del cuerpo y las tapas, las cuales veremos más adelante, y usando como espesor de la pared (t) el espesor real del equipo y su valor será el que resulte menor.

- e. Esfuerzo de diseño a la tensión (S):** Es el valor del esfuerzo máximo al que podemos someter un material del cual está construido el recipiente a presión en condiciones normales de operación y su valor es aproximadamente una cuarta parte del esfuerzo último a la tensión del material.
- f. Eficiencia de las soldaduras (E):** La definición de la eficiencia de las soldaduras nos indica el grado de confiabilidad que se puede tener de ellas. Sus valores están dados en el Anexo A., en la cual se muestran las eficiencias de los tipos de unión más comúnmente usados en la fabricación de recipientes a presión.<sup>7</sup>

#### **2.4.1 Tapas Para Recipientes Sometidos A Presión.**

---

<sup>7</sup> Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión, Juan Manuel León Estrada. Capítulo I Generalidades. Pág. 1-3

Para sellar o “cerrar” recipientes cilíndricos existen diferentes tipos de tapas. El Código ASME Sección VIII División I nos indica que para sellar recipientes cilíndricos existen varios tipos de tapas definidas por su forma. Estos tipos de tapas pueden ser planas, planas con ceja, únicamente abombadas, abombadas con ceja invertida, toriesféricas, semielípticas, semiesféricas, tapas 80-10, tapas cónicas, toricónicas, entre otras. Las características y los usos de estas tapas son las siguientes:

- a. Tapas planas:** Son las tapas más económicas en el mercado debido a su fácil fabricación y se utilizan para cerrar recipientes sujetos a presión atmosférica generalmente. También son utilizadas como fondos de tanques de almacenamiento de grandes dimensiones.
- b. Tapas planas con ceja:** Al igual que las anteriores, se utilizan generalmente para presiones atmosféricas, su costo también es relativamente bajo, y tienen un límite dimensional máximo de 6 metros de diámetro.
- c. Tapas únicamente abombadas:** Son empleadas en recipientes a presión manométrica relativamente baja, su costo puede considerarse bajo, sin embargo, si se usan para soportar presiones relativamente altas, será necesario analizar la concentración de esfuerzos generada al efectuar un cambio brusco de dirección.
- d. Tapas abombadas con ceja invertida:** Su uso es limitado debido a su difícil fabricación, por lo que su costo es alto, siendo empleadas solamente en casos especiales.
- e. Tapas toriesféricas:** Son las que mayor aceptación tienen en la industria, debido a su bajo costo y a que soportan altas presiones manométricas, su característica principal es que el radio de abombado es aproximadamente

igual al diámetro. Se pueden fabricar en diámetros desde 0.3 hasta 6 metros.

- f. Tapas semielípticas:** Son empleadas cuando el espesor calculado de una tapa toriesférica es relativamente alto, ya que las tapas semielípticas soportan mayores presiones que las toriesféricas. El proceso de fabricación de estas tapas es el troquelado, su silueta describe una elipse relación 2:1, su costo es alto y en algunos países se fabrican hasta un diámetro máximo de 3 metros.
- g. Tapas semiesféricas:** Utilizadas exclusivamente para soportar presiones críticas. Como su nombre lo indica, su silueta describe una media circunferencia perfecta, su costo es alto y no hay límite dimensional para su fabricación.
- h. Tapas 80:10:** Ya que en algunos países no se cuenta con prensas lo suficientemente grandes para troquelar tapas semielípticas 2:1 de dimensiones relativamente grandes, se ha optado por fabricar este tipo de tapas, principalmente en México. Las características principales son: El radio de abombado es el 80% del diámetro; y el radio de esquina o radio de nudillos es igual al 10% del diámetro. Estas tapas las usamos como equivalentes a la semielíptica relación 2:1.
- i. Tapas cónicas:** Se utilizan generalmente en fondos donde se espera acumulación de sólidos y como transiciones en cambios de diámetro de recipientes cilíndricos. Su uso es muy común en torres fraccionadoras o de destilación, no hay límite en cuanto a dimensiones para su fabricación y su única limitación consiste en que el ángulo del vértice no deberá ser mayor a 60°. Las tapas cónicas con ángulo mayor a 60° en el vértice, deberán ser calculadas como tapas planas. Deberá tenerse la precaución de reforzar las uniones cono-cilindro de acuerdo al procedimiento.



- j. Tapas toricónicas:** A diferencia de las tapas cónicas, este tipo de tapas tienen en su diámetro mayor un radio de transición que no deberá ser menor al 6% del diámetro mayor ó 3 veces el espesor. Tienen las mismas restricciones que la tapa cónica a excepción de que en algunos países no se pueden fabricar con un diámetro mayor a 6 metros.<sup>8</sup>

En el Anexo B. se resume la representación gráfica de cada una de estas tapas y las respectivas variables que se tienen en cuenta para su diseño.

#### **2.4.2 Soldadura en recipientes a presión.**

En el pasado era usual el proceso de remachado para la construcción de recipientes contenedores; sin embargo, actualmente el proceso más utilizado es el de la soldadura.

Generalmente las soldaduras se deben realizar en arco eléctrico sumergido en donde se deberá eliminar la escoria dejada por el cordón antes de aplicar el siguiente. Las soldaduras deben ser verificadas mediante ensayos no destructivos (END) como radiografía, tintas penetrantes, o incluso, ultrasonido con el fin de garantizar la calidad del cordón.

La radiografía es el método comúnmente utilizado para evaluar la aplicación de los cordones, esta se realiza total o por secciones. En las representaciones gráficas, referidas en los anexos al final del documento, se aprecia cómo se representan las características de las juntas soldadas.

---

<sup>8</sup> Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión, Juan Manuel León Estrada. Capítulo I, Tipos de Tapas. Pág. 4-9

Las características principales son: la línea de referencia, las flechas, símbolos básicos, dimensiones y otras especificaciones (Revisar Anexo C.) el cual contiene los símbolos básicos para la representación gráfica de las soldaduras.

La línea de referencia se traza paralela a los extremos del papel y es la base que sirve para colocar los símbolos y especificaciones. La flecha se utiliza para señalar la junta y se coloca en la prolongación de uno de los extremos de la línea de referencia. Estos símbolos básicos definen en detalle, las características de la conexión, las ranuras que deben hacerse a los miembros de las juntas y el tipo de soldaduras. En el Anexo C, se aprecian dichos símbolos.

Se establecen, entonces de manera acorde con los símbolos básicos las dimensiones, el espesor del cordón, la longitud, el paso, la separación en la raíz de las ranuras, el ángulo de las mismas y el espesor de un tapón. También se utilizan símbolos adicionales o complementarios a los básicos.

En el diseño del domo mismo, todas las piezas, o por lo menos todas las que van unidas por soldadura, son de acero inoxidable, por lo cual mostramos interés específicamente en los procedimientos para placas de acero inoxidable.

Dependiendo del tipo de unión, utilizaremos un valor de eficiencia para realizar los cálculos de diseño. Como se mencionó anteriormente, estos valores de eficiencia se aprecian en el Anexo A.

Se debe diseñar un procedimiento de soldadura antes de aplicar dicha soldadura. Este procedimiento es específico para cada caso en particular el cual indica factores como el diámetro del electrodo y la preparación para cada tipo y espesor del material. Debido a la clasificación de este tipo de componentes, los recipientes sometidos a presión, y del tipo de riesgo que se corre debido a una falla, deben realizarse pruebas a los soldadores para garantizar la calidad del trabajo. Dichas pruebas deben apegarse a las recomendadas por el Código ASME, Sección IX "Welding and Brazing Qualifications".

Cuando se aplica soldadura en recipientes a presión de acero inoxidable, es necesario utilizar gases inertes, como argón o helio, y es recomendable pasivar las soldaduras con una solución a base de ácido nítrico y ácido clorhídrico.

Debemos evitar los cruces de cordones de soldadura. La distancia mínima entre cordones será 5 veces la distancia del espesor del material, sin embargo, si se hace inevitable realizar el cruce de cordones de soldaduras, el código ASME, Sección VIII división 1, recomienda realizar radiografías con una distancia mínima de 10 centímetros a cada lado de la intersección.<sup>9</sup>

### **2.4.3 Materiales para recipientes a presión.**

Un aspecto que es de suma importancia en la fabricación de los recipientes a presión, y de hecho se considera así en el diseño y fabricación de casi todo, es la selección de materiales. Para el caso de los recipientes a presión es necesario tener una secuencia lógica para seleccionar el material de construcción, sin embargo, esto no es garantía de que exista una “receta” para la selección adecuada.

El código ASME habla de los materiales más comúnmente utilizados. Entre estos se encuentran aceros al carbón, algunas aleaciones de aceros especiales como los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos entre otros materiales como el titanio, Incoloy, Zirconio, Hastelloy, Hafnio, Monel, Tántalo, Inconel, Molibdeno y Admiralty.

A continuación presentaremos una serie de propiedades que deben tener los materiales de fabricación de recipientes a presión y los requisitos que deben llenar para satisfacer las condiciones de servicio en los recipientes.

**a. Propiedades mecánicas:** Lo importante de un material que se somete a presiones constantes o variables para estos tipos de componentes es que

---

<sup>9</sup> LEON ESTRADA, Juan Manuel. Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión. p. 20-41.

tenga alta resistencia a la tensión, un alto punto de cedencia, un alto porcentaje de alargamiento con la mínima reducción de área. Usando estas propiedades se establece el diseño del recipiente.

- b. Propiedades físicas:** Dependiendo del tipo de proceso que se lleva a cabo en el recipiente, del tipo de fluido pero principalmente de la temperatura de operación es necesario que estos materiales tengan un bajo coeficiente de dilatación térmica.
  
- c. Propiedades químicas:** En las propiedades químicas un aspecto muy importante es la resistencia a la corrosión. Un material mal seleccionado en función de la corrosión acarreará problemas como la reposición del equipo por deterioro de la vida útil de un componente debido a la corrosión. Otro problema es la sobredimensión del diseño dado que para materiales poco resistentes a la corrosión siempre hay que dejar un excedente en el espesor lo que conlleva a un aumento en el precio de fabricación, en el peso, además de no ser siempre la mejor solución. Otra situación generada por la corrosión es el mantenimiento preventivo de los equipos, ya que por causa de la corrosión y para evitar futuras fallas siempre se debe monitorear las condiciones del material teniendo en cuenta que un recipiente corroído debe ser inmediatamente sacado de operación trayendo consigo pérdidas en la producción. Otra situación muy importante es la contaminación del producto almacenado por causa de la corrosión lo que es siempre muy costoso. Sumado a todo esto también se sabe que la corrosión causa debilitamiento de las paredes sometidas a altas presiones, disminuyendo en gran medida la resistencia del material, lo que puede causar lesiones a las personas que se encuentran cerca del equipo.
  
- d. Soldabilidad:** Es importante que los materiales que se utilicen para la fabricación de estos equipo posean una buena soldabilidad debido a que,

generalmente, la mayoría de sus componentes son de construcción soldada; sin embargo, si se utilizan diferentes tipos de materiales en la construcción debe tenerse en cuenta que sean compatibles en cuanto a soldabilidad se refiere. Un equipo entre más elementos de aleación diferentes posea más precaución hay que tener. <sup>10</sup>

#### **2.4.3.1 Códigos de diseño aplicables.**

Este trabajo, en lo referente a cálculos de diseño del generador de vapor, se basa en el principal código utilizado para la fabricación de recipientes sometidos a presión en Estados Unidos y muchos países del mundo es el “Código ASME Sección VIII División 1”. Este código se publica de manera trianual por la Asociación Americana de Ingenieros, sin embargo se emiten adendas trimestrales con el objetivo de mantener el código constantemente actualizado.

Además se utilizará la Sección 1 de la división octava del Código ASME, de la cual también existe la división 2, cuyas diferencias radican en los factores de seguridad los cuales son mayores en la división 1. Es criterio del diseñador seleccionar bajo qué división realizar su trabajo, teniendo en cuenta los factores de seguridad Vs economía.

Complementario al Código ASME Sección VIII División 1, para la parte de las soldaduras se utiliza la Sección IX del Código ASME, y el AWS de la Asociación Americana de Soldadores. En la parte de selección de materiales usamos la Sección II.

---

<sup>10</sup> Ibid., p. 50.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

El desarrollo de un proyecto de este tipo requiere una serie de pasos y herramientas para lograr el alcance de los objetivos. Si bien existen muchos caminos para llegar al desarrollo de los objetivos, tenemos que ser claros y buscar el camino más sencillo y eficaz. La metodología cumple con una serie de tareas planteadas a partir de los objetivos específicos plasmados para el alcance del desarrollo del trabajo.

#### 3.1. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto y alcanzar los objetivos propuestos se han adoptado los siguientes sistemas:

- a. **Reuniones para discutir información de carácter científica y bibliografías:** Se realizarán reuniones para evaluar los avances del proyecto de manera periódica, mas puntualmente con el director del proyecto, el tutor en la parte del diseño mecánico y de asesoramientos en tutorías para la fabricación de los planos de construcción. Además en estas mismas reuniones se discuten las publicaciones en artículos y revisión de bibliografías para mantener el trabajo actualizado.
  
- b. **Reuniones de carácter interdisciplinario para el desarrollo de la investigación:** Para el desarrollo del proyecto fue necesario crear rutinas de trabajo con diferentes responsabilidades en la parte de diseño mecánico la cual, aunque con responsabilidades independientes necesitan mantenerse y trabajar en equipo para determinar todos los parámetros de

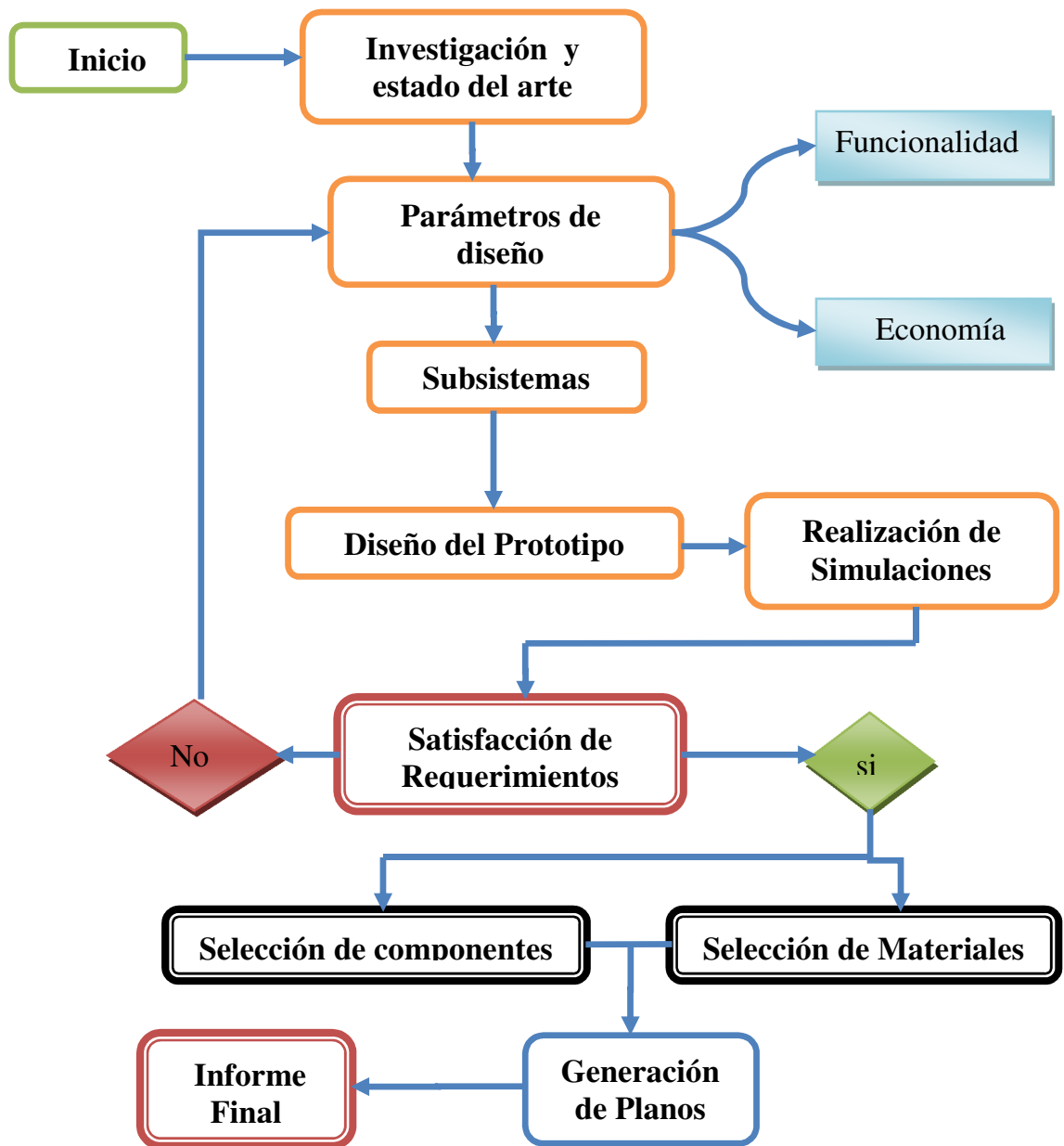
diseño y restricción que ofrezca su equipo. Es por esto que se realizarán reuniones periódicas interdisciplinarias para discutir aspectos del diseño y desarrollo de cada uno de los subsistemas del equipo. Este trabajo particularmente se encarga del diseño mecánico del prototipo. Adicionalmente realiza aportes para la selección de subsistemas necesarios para el funcionamiento del generador de vapor.

**c. Actividades de investigación:**

- **Investigación del marco teórico y antecedentes.** Necesaria para realizar la recolección de toda la experiencia de diversos diseños similares que ayudarán a optimizar el diseño mecánico del generador de vapor.
- **Selección de materiales y dispositivos.** La cual en conjunto con las discusiones permitirán realizar la adecuada selección de los materiales del horno.
- **Modelamientos y animación en software.** Permite utilizar las herramientas de tipo informático a los cuales tenemos acceso hoy en día que permiten un análisis más exacto, completo y mucho menos tedioso del comportamiento del equipo y cada uno de sus componentes.
- **Herramientas para el desarrollo:** Para el desarrollo del prototipo del horno se utilizó principalmente los software Solidworks® y Autodesk Inventor®. Estos permiten modelar las dimensiones reales del equipo así como su ensamble, además permiten realizar análisis de esfuerzos y deformaciones en elementos mecánicos aplicando la teoría de esfuerzos de Von Mises.

### 3.2. ESQUEMA METODOLÓGICO

Figura 5. Esquema Metodológico.





El esquema metodológico (*Figura 4*) representa un algoritmo sencillo que indica el camino o flujo de responsabilidades y requerimientos para llevar a cabo el desarrollo del proyecto. Parte desde el inicio del proyecto, donde como primera medida se realiza una investigación a fondo de los antecedentes y teorías referentes a la temática del proyecto. Luego de desarrollar las bases teóricas tales como; generadores de vapor, clasificación de generadores de vapor, rendimiento de las calderas entre otros. Pasamos a evaluar los requerimientos que demanda el prototipo del generador de vapor. Estos requerimientos son: funcionalidad que garantice que el generador de vapor sea útil y realice su trabajo y último economía que permita la viabilidad de construcción del generador de vapor.

Definidos los requerimientos del generador de vapor, lo siguiente es la selección de los subsistemas que no son más que equipos, mecanismos y componentes necesarios para el funcionamiento del intercambiador de calor. Una vez definidos estos subsistemas lo siguiente es realizar el diseño en detalle del equipo cumpliendo con los requerimientos antes mencionados. Si el diseño cumple con estos dos requerimientos se dará paso a la fase de ensamble de las piezas del equipo, de lo contrario habrá que reevaluar los requerimientos hasta llegar a un diseño final satisfactorio.

Una vez se tenga listo el diseño final del prototipo con los materiales seleccionados y el ensamble terminado se dará paso a la realización de los planos y redacción del informe final.

#### **4. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO**

Los generadores de vapor son equipos complejos compuestos de diversos sistemas para lograr su funcionamiento. Estos sistemas a su vez están compuestos por piezas ensambladas que ameritan construcción por procesos de manufactura y algunos componentes que pueden ser adquiridos comercialmente.

El diseño del generador de vapor está dividido en 4 partes. La primera parte hace referencia al diseño de la caldera en sí, que está compuesta por varios cilindros de acero inoxidable, los serpentines por donde pasa el fluido, el quemador que entrega la energía necesaria en forma de calor para llevar el agua al punto de ebullición, los recubrimientos refractarios y la chimenea con su respectivo termómetro. La segunda comprende todo el sistema de entrada de fluido que está compuesto por el tanque acumulador, la bomba de agua que da la presión al fluido para fluir por los serpentines, la base de soporte y la línea de entrada compuesta por diferentes instrumentos de control como válvulas y medidores. La tercera parte es el sistema de salida compuesta por el domo de condensados donde se separa el líquido del vapor y la línea de salida compuesta al igual que la línea de entrada por válvulas y comparadores. Por último el cuarto sistema comprende la base del generador donde descansa el equipo completo y el sistema eléctrico y de control.

## **4.1 GENERADOR DE VAPOR**

Es el sistema primordial del diseño completo. Comprende el diseño en detalle del cuerpo del generador donde se va a realizar el proceso de evaporación del fluido de trabajo, agua en este caso.

El generador de vapor posee los serpentines por donde viaja el fluido de trabajo y que se encuentran sometidos a la presión de vapor y altas temperaturas generadas por la flama del quemador. También posee tres compartimientos definidos por tres recipientes cilíndricos de acero con tapa recubiertos por una mezcla que sirve como aislante térmico que permite la calidad refractaria del dispositivo y minimiza los riesgos de quemaduras del operario.

El generador de vapor es entonces el conjunto de una serie de piezas ensambladas que permiten realizar el proceso de evaporación. Está compuesto por las siguientes partes: Recipiente primario con recubrimiento aislante, serpentín primario con soporte, recipiente secundario con aislante, tapa del recipiente secundario, serpentín secundario con soporte, carcasa del generador con recubrimiento aislante, tapa de la carcasa, chimenea, orejas de fijación de recipientes y base de ensamble del generador. También posee a su vez otros subsistemas que pueden ser adquiridos comercialmente y adaptados como el quemador y el termómetro de gases de escape. A continuación se realizará una descripción detallada de cada una de las partes.

#### **4.1.1. Recipiente primario**

Es un recipiente cilíndrico formado de lámina delgada de acero inoxidable. Posee un agujero en la parte inferior para permitir la entrada de la tubería que conecta al serpentín primario con la línea de entrada del fluido de trabajo. Su función es contener al serpentín primario manteniendo la alta temperatura generada por la flama del quemador y permitir el paso de los gases calientes hacia el recipiente secundario. Se encuentra fijado a la base del generador de vapor mediante orejas de acero pernadas. Debe ser resistente a altas temperaturas. Otra de sus funciones es servir de guía vertical para el flujo de los gases calientes, es decir, que permita y garantice que los gases lleguen hasta la parte superior del recipiente secundario para luego desplazarse hasta la chimenea.

El recipiente primario está cubierto por un material aislante que permite la conservación de alta temperatura en su interior. Este material aislante permitirá evitar roturas en el material a causa de la exposición perpendicular entre la flama y las áreas de acero. Está formado por una mezcla de asbesto, cemento blanco, Colbón y agua. Con esta mezcla se forma un lodo refractario que permite realizar el recubrimiento de las partes.

Adicional a la mezcla refractaria también se utilizará fibra cerámica para recubrir las paredes de los cilindros contenedores. Esta fibra cerámica es una colchoneta a base de fibras cerámicas entretajadas formando un material flexible y de peso ligero ideal para trabajar en temperaturas de hasta 1425°C. Permite aumentar la eficiencia del generador al disminuir las pérdidas de calor por transferencia térmica entre la superficie del generador y el medio.

#### **4.1.2. Serpentín Primario**

El serpentín primario es un “tubing” delgado de acero inoxidable del tipo 304 rolado en forma de espiral. Su función es recibir el fluido de trabajo desde el serpentín secundario en calidad de mezcla para aumentar la transferencia de calor por medio de los gases generados por el quemador para aumentar la cantidad de vapor dentro de los conductos y transportarlos hasta el domo de condensados. Su función es canalizar el fluido de trabajo que corre por su interior y realizar el cambio de fase dentro de este por medio de la transferencia térmica entre las paredes de la tubería y los gases calientes generados por la flama del quemador. Su forma de hélice permite un mayor volumen de líquido contenido y un mayor tiempo de exposición a la energía térmica para obtener una calidad en mayor porcentaje de vapor.

El serpentín primario se encuentra fijado a unos soportes. Estos soportes a su vez están fijados a la placa base del generador de vapor mediante tornillos para permitir el ensamble. Los soportes están fabricados con ángulos de acero del tipo A-36, poseen perforaciones por donde pasa y descansa el tubing. El tubing se sujeta por medio de alambre recocado que posee buena resistencia a altas temperaturas.

#### **4.1.3. Recipiente secundario**

El recipiente secundario es muy similar al recipiente primario pero con una mayor escala. Es una lámina de acero del tipo 304 rolada y soldada que forma un contenedor cilíndrico. Posee agujeros en la parte inferior para permitir el escape de los gases calientes producidos por el quemador hacia la chimenea para su posterior expulsión. Al igual que el recipiente primario también se encuentra fijado a la base del generador de vapor mediante orejas de acero pernadas. Está cubierto por el interior de sus paredes con la mezcla aislante para mantener la temperatura interna

deseada. Su función principal es contener al serpentín secundario sirviendo como hogar para mantener el calor generado por la flama del quemador y permitir el paso de los gases calientes hacia la chimenea de escape.

#### **4.1.4. Serpentín secundario**

El serpentín secundario es igual que el serpentín primario en funcionalidad y diseño salvo que el diámetro de su espiral es mayor pues se encuentra sobre el recipiente primario encargado de contener al serpentín primario. Su función es canalizar el fluido de trabajo proveniente de la línea de entrada que corre por su interior y realizar el cambio de fase dentro de este por medio de la transferencia térmica entre las paredes de la tubería y los gases calientes generados por la flama del quemador. Esta igualmente fabricado en tubing de acero inoxidable entorchado.

#### **4.1.5. Tapa del recipiente secundario**

Es una tapa circular de acero inoxidable del tipo 304. Se fija al recipiente secundario por medio de pernos para permitir desensamblar ambas piezas en caso de limpieza y mantenimiento. Su función es recibir los gases calientes generados por el quemador ya que se encuentra perpendicular a la dirección de los gases y permite que bajen en dirección paralela al recipiente secundario para que posteriormente salgan por la chimenea.

#### **4.1.6. Recipiente Principal**

Muy similar a los recipientes primario y secundario, el recipiente principal es una lámina de acero inoxidable del tipo 304 rolada y soldada que recubre todo el sistema

de la caldera. Debe estar aislado térmicamente en su superficie externa pues es esta superficie la que se encuentra expuesta al medio y puede permitir quemaduras en las personas que operan el equipo. Su función es contener todo el sistema generador de vapor completo incluyendo los gases generados por la combustión manteniendo el sistema de manera adiabática aislando la temperatura interna del generador con el exterior para evitar riesgos de quemaduras con el operario. Posee un orificio en su superficie inferior para permitir el acceso de la línea de entrada del fluido de trabajo. Se encuentra fijado por pernos y orejas metálicas a la base del Generador. También está cubierto por el interior de sus paredes con la mezcla aislante para mantener la temperatura interna, sin embargo en este caso el grosor de la capa de aislante es mucho mayor para evitar el calentamiento de las paredes externas.

#### **4.1.7. Tapa del Recipiente Principal**

Es una lámina de acero inoxidable en forma de círculo con un agujero en el centro. Esta unida por medio de pernos a la chimenea y al recipiente principal. Su función, junto con el recipiente principal, es servir de carcasa del sistema generador de vapor completo y fijar la chimenea para permitir el escape de los gases. También está cubierta por el interior de sus paredes con la mezcla aislante.

#### **4.1.8. Chimenea**

Es una lámina de acero del tipo 304 rolada y soldada que se encuentra unida a la tapa del recipiente primario mediante unión pernada. Como su nombre lo indica, su función es servir como estructura de exosto para permitir la salida de los gases de escape. Posee un agujero donde se fijará un termómetro análogo que permitirá vigilar la temperatura de salida de los gases de escape.

#### **4.1.9. Base del Generador**

Es una lámina de acero estructural del tipo A-36 que tiene como función soportar todas las piezas del sistema generador de vapor incluyendo las anteriormente descritas y el quemador. Posee múltiples agujeros donde se pernearán las piezas. En el centro posee un agujero de mayor diámetro que permitirá la entrada de la boca del quemador al sistema. También soporta los ángulos de acero con perforaciones por donde corren los serpentines. Esta base está sujeta por medio de pernos a la mesa del generador de la cual se hablará más adelante. Para permitir las unión entre la base y la estructura de la mesa del generador se realizarán unas muescas en las esquinas de la base para permitir el acople perfecto.

#### **4.1.10. Quemador**

El quemador es el sistema encargado de proveer la energía en forma de calor necesaria para producir el cambio de fase de líquido comprimido a vapor sobrecalentado del fluido de trabajo. Para este diseño se ha seleccionado un quemador de marca Riello que tiene una capacidad de 5300kcal/hr. Es un tipo de quemador de aire impulsado, es decir, que el aire y algunas veces el gas es impulsado por ventilación forzada.

El ciclo de funcionamiento se considera n período de precalentamiento de la cámara de combustión, el servomotor activa la mariposa del aire dejándola toda abierta. Durante este período la electro válvula del gas está toda cerrada. Después de este paso, con la mariposa de aire y la mariposa del dosificador de gas posicionado en un valor mínimo, se acciona la electroválvula de gas y el transformador que prevé el encendido de gas de mínimo consumo. En este punto aparece la chispa del electrodo, se acciona el servomotor que provee la mezcla aire-gas que lleva el quemador, en este momento es cuando se produce la flama.



Después de un tiempo preestablecido a la potencia máxima, el quemador sigue en estas condiciones de funcionamiento hasta llegar a la temperatura máxima del termostato. Luego, por medio del servomotor, se estabiliza el consumo mínimo hasta que exista una demanda mayor de calor por parte del generador.

#### **4.1.11. Otros componentes y accesorios**

Para el generador de vapor también se utilizarán componentes con uniones de tubing hembra-hembra principalmente para realizar las conexiones entre los serpentines y las líneas de entrada y salida del fluido de trabajo. También se utilizarán ángulos de acero para los soportes de los serpentines. Algunos pernos de distintos calibres y longitudes para la unión de las piezas del generador. Finalmente un termómetro análogo de aguja fijado a la chimenea que permitirá observar la temperatura de los gases de escape del sistema.

### **4.2. SISTEMA DE ENTRADA**

El segundo sistema del Generador de Vapor es el Sistema de Entrada. Este sistema corresponde a todos los componentes ensamblados que permiten el ingreso del fluido de trabajo hacia la caldera desde el depósito hasta el serpentín primario.

Además de permitir el ingreso del fluido de trabajo, en este caso agua, a la caldera para realizar el posterior cambio de fase también es el encargado de vigilar y controlar las características de este fluido tales como temperatura, presión y caudal. También tiene como objeto recibir el fluido de trabajo que no alcanzó a evaporarse durante el proceso y que viaja desde el domo de condensados por la línea de salida hasta el sistema de entrada.

Está compuesto principalmente por un tanque contenedor del fluido, una bomba alimentadora de agua, la mesa del tanque de agua, válvulas entre las cuales se

encuentran una válvula check, de globo, una de aguja, también posee un sensor de control de presión, una base para las válvulas fabricada en ángulo de acero, algunos tramos de tubing y manguera.

#### **4.2.1 Tanque Contenedor de Agua**

Es un simple tanque cilíndrico vertical de algún tipo de material polimérico utilizado para contener el agua que va a entrar al sistema. El tanque debe ser de unos 100 litros aproximadamente pero solo será llenado de manera parcial. Este tanque posee dos agujeros en sus paredes laterales curvas, uno en la parte superior que se conecta por tubing a la línea salida como retorno del fluido de trabajo que no fue evaporado y un agujero inferior donde sale el fluido y se conecta a la bomba alimentadora de agua. En ambos agujeros se fijan conexiones de acople rápido hembra en bronce o acero inoxidable para realizar las respectivas conexiones.

#### **4.2.2. Bomba Alimentadora de Agua**

Es una bomba de agua conectada al tanque contenedor de fluido que permitirá impulsar el agua a través de la línea de entrada de fluido y pasar por los serpentines hasta el domo de condensados a presión y caudal deseados. La bomba se encuentra fija a la mesa del tanque contenedor por medio de uniones pernadas. La línea de entrada de la bomba está directamente conectada al tanque contenedor y la salida a la válvula tipo check.

#### **4.2.3. Mesa del tanque de agua**

Es una estructura fabricada en ángulo de acero cuya función es soportar al tanque contenedor de fluido de trabajo y a la bomba alimentadora de agua. Similar a un banco de trabajo con dos repisas, en la superior va el tanque contenedor de fluido y en la repisa inferior se encuentra pernada la bomba de agua.

#### **4.2.4. Válvulas de entrada**

Para el ingreso del agua a la caldera, desde la bomba alimentadora hasta el serpentín primario, se colocarán válvulas cada una con una función respectiva. Estas válvulas son las siguientes:

##### **4.2.4.1. Válvula Tipo Check**

Es la primera válvula directamente conectada a la bomba alimentadora. Las válvulas de retención o check son integrales y se destinan a impedir la inversión de flujo en una tubería. La presión del fluido circulante abre la válvula; el peso del mecanismo de retención y cualquier inversión de flujo la cierra. Su selección depende de la temperatura, caída de presión y limpieza del fluido. No suelen tener un cierre confiable con poco escurrimiento para controlar el flujo inverso de gran volumen. En la mayoría de los casos, la válvula tiene la ayuda de una válvula de cierre para el control del escurrimiento.

##### **4.2.4.2. Válvula de Globo**

Es la segunda válvula en la trayectoria del fluido a través de la línea de entrada. Son para uso frecuente, cierre positivo, el asistente suele estar paralelo con el sentido del flujo; produce resistencia y caídas de presión considerables. Su nombre se debe a la forma de su cuerpo. En este caso su función es simplemente servir como sistema ON/OFF para abrir o cerrar el flujo en la línea de entrada.

##### **4.2.4.3. Válvula de Aguja**

Es la tercera y última válvula del sistema de entrada. Se utiliza para descargar sistemas con líquidos a altas presiones; la mayoría son pequeñas y poseen conexiones con rosca NPT. Su función es permitir la dosificación de fluido a través de la línea de entrada al sistema.

#### **4.2.5. Sensor de Presión**

Se colocará al final de la línea de entrada para vigilar la presión de entrada de fluido al sistema. Debe ser digital para permitir tomar el dato del tablero de control por medio de un display.

#### **4.2.6. Base para línea de salida**

Fabricada en ángulo de acero del tipo A-304, su función es servir como estructura de soporte de la línea de salida, específicamente donde descansan las válvulas y el sensor de presión. Está sujeta mediante unión pernada a la estructura de la base del generador. Posee algunas láminas soldadas con agujeros por donde pasa el tubing que conecta las válvulas.

### **4.3. SISTEMA DE SALIDA**

El tercer sistema del Generador de Vapor es el Sistema de Salida. Este sistema corresponde a todos los componentes ensamblados que permiten la salida desde el serpentín secundario, pasando por el domo de condensados, del vapor sobrecalentado y el retorno del fluido a alta temperatura hasta el tanque acumulador.

En este sistema se hace un énfasis especial al domo de condensados. Este componente está sometido a grandes presiones a altas temperaturas. Su diseño estará basado en cálculos de resistencia de los materiales sometidos a esfuerzos generados por las altas presiones y temperaturas internas. Al igual que el sistema de

entrada, el sistema de salida posee un conjunto de válvulas y sensores en serie que permitirán controlar la salida del fluido en sus distintas fases.

El sistema de salida está dividido en cuatro subsistemas principales: El primero corresponde al domo de condensados que posee una válvula de seguridad y algunos niples como complementos. El segundo subsistema corresponde a la línea de salida de vapor que contiene una serie de válvulas y medidores. El tercer subsistema hace referencia a la línea de salida de condensados y por último el cuarto corresponde a las estructuras de soporte del domo y de las líneas.

#### **4.3.1. Domo de condensados**

El domo de condensados es uno de los dispositivos más importantes del proceso de evaporación del fluido de trabajo. En el domo se acumula vapor sobre saturado y separa el condensado. En la parte superior del domo se acumula vapor sobre saturado el cual saldrá al tener una presión de 1Mpa. Este se comunica con la salida controlada por una válvula de bola controlada por una válvula solenoide que abre a los 220°C. Es un contenedor en forma de tanque cilíndrico fabricado en acero inoxidable del tipo A-304. Su función principal es la de separar el fluido de trabajo en sus diferentes fases, es decir, separa el vapor generado del líquido a alta temperatura.

Para realizar su función, el domo de condensados se encuentra unido a dos líneas de salida, la de vapor y la de condensados. También posee una válvula de seguridad para liberar el vapor en caso de generar una sobrepresión que pueda causar un accidente. En las plantas de procesos existen diversos dispositivos que pueden deteriorarse por los cambios bruscos de presión y la sobre presión. El término válvula de seguridad se aplica en general a las utilizadas en servicio para vapor de caldera. Su función es detectar un aumento en la presión y proveer una trayectoria para la salida del material.

El domo de condensados puede definirse, según el Código ASME sección VIII División 1 como un recipiente sometido a presión externa de pared delgada cilíndrico vertical con tapas abombadas. Es importante identificar el tipo de recipiente ya que el Domo de Condensados es el dispositivo al cual aplicaremos los cálculos de resistencia por presión interna. Cada tipo de recipiente posee sus propias ecuaciones según su geometría, orientación y sentido de la presión.

El Domo de condensados se apoya sobre una base fabricada a partir de ángulos de acero del tipo A-36 que se une a la base del generador por medio de pernos pasantes. El domo se conecta directamente a la salida del serpentín secundario por donde llega el fluido de trabajo en calidad de mezcla. El domo también se encuentra unido a dos uniones para tubing.

#### **4.3.2. Línea de salida de Vapor**

La línea de salida de vapor es la unión de varios componentes entre los que se encuentran válvulas y sensores conectados entre sí por medio de tubing que en conjunto permiten controlar la salida del vapor generado en el proceso del generador y que a su vez se ha contenido en el domo. Adicional a su función principal, también debe poder medir las condiciones y propiedades del vapor de salida como son la temperatura y la presión.

La línea de salida comienza su recorrido desde la salida del domo de condensados, conectado a este por el orificio superior ubicado en una de sus tapas abombadas. Al final de la línea de salida se encuentra una válvula de bola que podría conectarse con una turbina de vapor para completar el ciclo Rankin.

Los componentes de la línea de salida, en el sentido del recorrido del vapor son los siguientes: Un manómetro de diafragma; en este tipo de manómetros la presión es resistida por un disco ondulado o diafragma. Un termómetro análogo de aguja. Un

sensor digital de presión igual que el de la línea de entrada. Una válvula solenoide que se abre cuando el vapor alcance una temperatura de 220°C. Finalmente una válvula de bola que permite la salida del vapor.

#### **4.3.3. Línea de Salida de condensados**

Al igual que la línea de salida de vapor, la salida de condensados también es la unión de varios componentes entre los que se encuentran dos válvulas, una tipo check y una de bola, conectadas entre sí por medio de tubing que en conjunto permiten la salida del líquido que no alcanzó a evaporarse durante el proceso de la caldera y que se acumula en la parte inferior del domo.

La línea de salida de condensados comienza su recorrido desde la salida del domo de condensados, conectado a este por el orificio inferior, justo debajo del orificio de la línea de salida de vapores, ubicado en una de sus tapas abombadas. Al final de la línea de salida de condensados se encuentra una válvula de bola que se conecta a una manguera. Esta manguera arroja el líquido hasta el tanque contenedor de fluido de trabajo para ser reutilizado.

Los componentes de la línea de salida, en el sentido del recorrido del vapor son una válvula check que permite el avance del fluido pero no el retroceso del mismo y una válvula de bola que permite la salida del fluido hasta el tanque contenedor.

#### **4.3.4. Estructuras de soporte**

Las estructuras de soporte están fabricadas en ángulos de acero estructural. Existen dos estructuras de soporte. La primera hace referencia a la estructura que fija el domo de condensados a la base del generador. Esta unión se permite mediante ganchos perneados que sujetan el domo de condensados. La segunda estructura de soporte es donde descansan las líneas de salida, tanto de vapor como de

condensados. Esta última se encuentra pernada al chasis de la base del generador. También posee platinas con orificios para sujetar cada uno de los componentes de cada línea y unirlos mediante tubing.

#### **4.4. BASE DEL GENERADOR DE VAPOR, SISTEMAS ELÉCTRICO Y DE CONTROL**

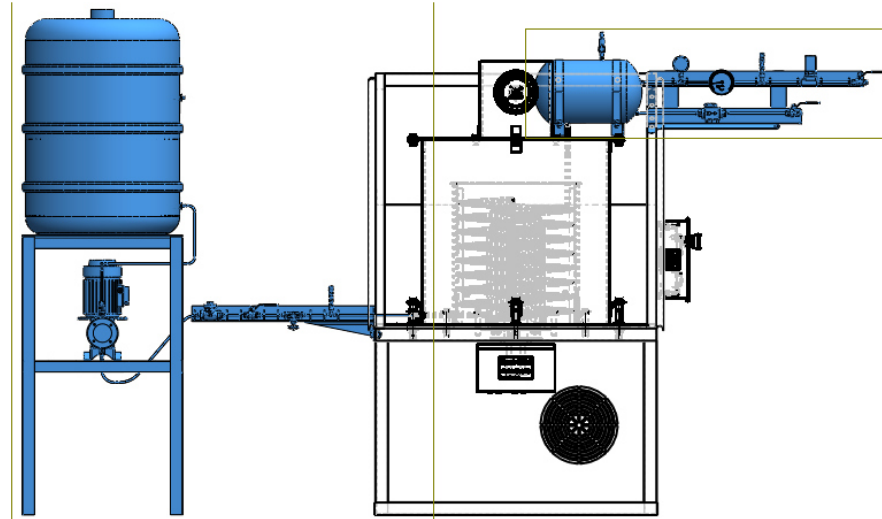
El último sistema del generador de vapor corresponde a la base del generador de vapor y el sistema eléctrico y de control. La base del generador es la estructura donde descansa todo el equipo, excepto el sistema de entrada de fluido de trabajo el cual posee su propia estructura en forma de banco. El chasis está fabricado en tubería de acero estructural cuadrada de diferentes calibres y el recubrimiento es de lámina de acero delgada debidamente cortada para formar el mueble deseado. El mueble posee una cabina inferior con una tapa pernada que puede retirarse para realizar intervenciones al quemador. También cuenta con una rejilla para permitir la circulación de aire en la cámara del quemador.

El sistema eléctrico o centro de carga del generador es una caja eléctrica con brakers que se ubicará en la parte lateral derecha de la base para alimentar la bomba de agua, el quemador, los displays, los focos piloto, la válvula solenoide y el eliminador de corriente. El sistema de control consta de sensores de presión y temperatura y la válvula solenoide que sirve como actuador para permitir la salida del vapor a presión y temperatura deseada.

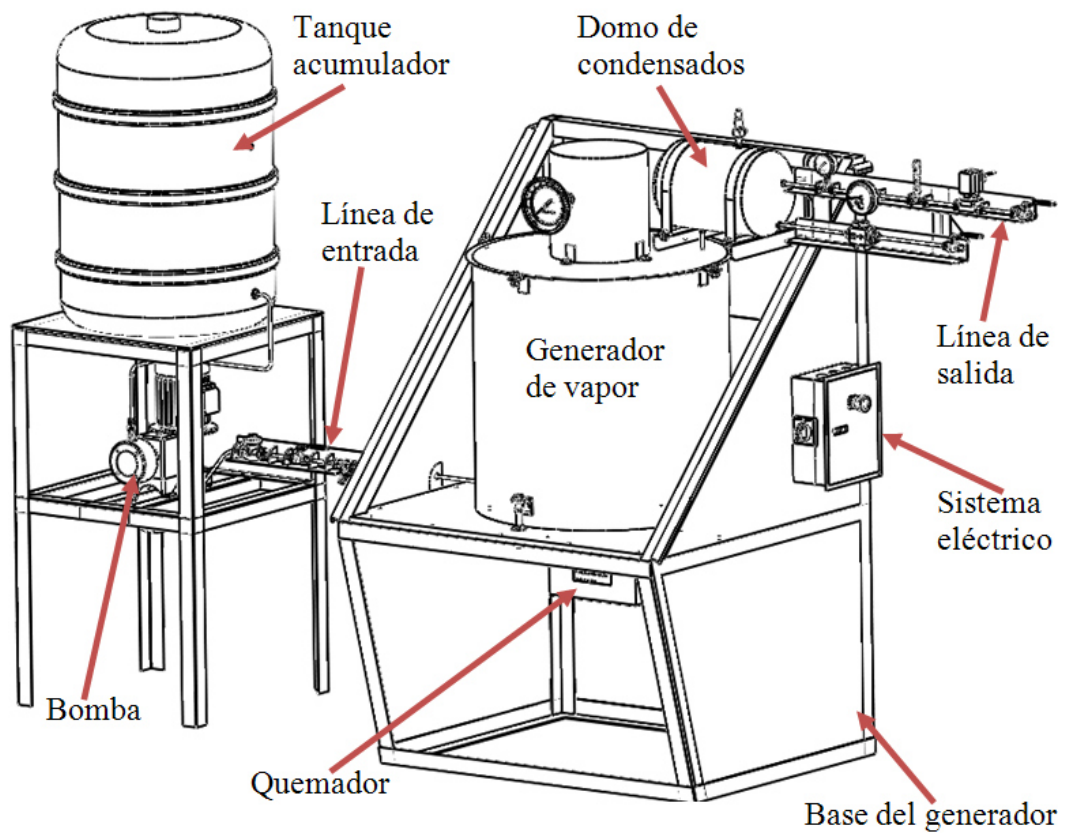
Los Displays son sistemas digitales con una fuente de alimentación de 9V y 20mA. Éstos pueden ser utilizados para medir la presión, temperatura, voltaje, entre otros. Los focos pilotos son un tipo de instrumentación que generalmente indican buen funcionamiento y fallos importantes en sistemas. Se encuentran de 110 y 220 V de diferentes colores.



En la Figura 6, se presenta un esquema básico del ensamble de los 4 sistemas.  
**Figura 6. Ensamble de los 4 sistemas**



**Figura 7. Esquema del Generador de vapor**



El anterior esquema lo que presenta es una descripción gráfica de los elementos y sistemas principales en el diseño del generador de vapor Acuotubular. A continuación se realiza una descripción detallada de cada uno de los sistemas que lo componen.

## **5. CÁLCULOS DE DISEÑO DEL EQUIPO**

A continuación se describen los resultados obtenidos para los cálculos termodinámicos y de transferencia de calor, utilizados para el serpentín. Primero se realiza un balance de energía usando primera la ley de la termodinámica con el fin de determinar la potencia necesaria para llevar el agua desde una condición de líquido subenfriado en condiciones ambientales hasta las condiciones deseadas de temperatura y presión. Luego, se estiman los coeficientes convectivos de transferencia de calor al interior del serpentín, primero para las regiones de una sola fase y luego para la condición de dos fases, haciendo uso de las correlaciones descritas por otros autores y considerando la tasa de transferencia de calor hallada en la sección 5.1

Para seleccionar el equipo quemador, se realizaron los cálculos termodinámicos para el combustible asumiendo una reacción estequiometría con un exceso de aire del 200% con el fin de reducir las posibilidades de una combustión incompleta y disminuir la temperatura de la llama. Los resultados obtenidos en esta sección son necesarios para realizar los cálculos de la tasa de transferencia de calor por radiación y por convección de los gases productos de la combustión. De esto se sigue el cálculo de la transferencia de calor conjugada, la cual indica cual es la tasa máxima de transferencia de calor que pueden proporcionar los gases de combustión.

### **5.1. Análisis de la energía transformada. Cálculo de la potencia Suministrada al fluido.**

Como requerimientos máximos establecidos para el vapor de agua a la salida se fijan: Vapor sobrecalentado a 11.8 bares absolutos y 250°C. Así mismo las condiciones para el líquido a la entrada corresponderán a una presión absoluta de 2 bares y una temperatura de 25°C, asumidos de la red de acueducto. El gasto másico máximo será de 40 Kg/h (0,66Kg/min ó 0,011 Kg/s). En el proceso de ebullición, donde se considera que la presión permanece constante e igual a 11.8 bares (presión a la salida de la bomba de caudal de agua), se asume una temperatura de saturación de 125°C. Para llevar el fluido desde las condiciones iniciales como líquido subenfriado hasta vapor sobrecalentado se seguirá una trayectoria representada en el de estado termodinámico como se muestra en la figura 8.

En la Tabla 1 se detallan las propiedades para cada uno de los estados termodinámicos que se describen en la Figura 4.2, a saber: 1) líquido subenfriado, 2) líquido saturado, 3) vapor saturado seco y 4) vapor sobrecalentado.



**Figura 8. Estados termodinámicos del fluido a lo largo del serpentín.**

**Tabla 1. Propiedades termodinámicas**

<b>Propiedad (unidad)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
$\dot{m}$ (Kg/hora)	20	20	20	20
$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	25	125	125	250
$P$ (bar)	2	11.8	11.8	11.8
$i$ (KJ/Kg)	105.011	525.728	794.956	2936.36
$\sigma$ (N/m)	0.0719722	0.0539553	0.040577	0.026043
$Pr$ (Adim)	6.12833	1.38106	0.953181	0.994227
$\mu$ ( $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	890.059	222.332	144.025	18.0112
$\rho$ (Kg / m <sup>3</sup> )	997.092	939.507	879.184	5.10655
$S$ (Kj / Kg $^{\circ}\text{C}$ )	0.367174	1.58067	2.20865	6.84018
$Cv$ (KJ/ Kg $^{\circ}\text{C}$ )	4.13723	3.6403	3.36642	1.6631
$Cp$ (KJ/Kg $^{\circ}\text{C}$ )	4.18103	4.24963	4.43494	2.26422
$K$ (W / m. $^{\circ}\text{C}$ )	0.60724	0.684135	0.607119	0.410181

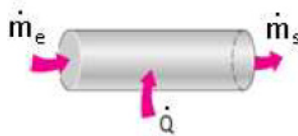
$\dot{m}$  flujo másico,  $T$  temperatura,  $P$  presión,  $h$  entalpía,  $\sigma$  tensión superficial,  $Pr$  Número de Prandtl,  $\mu$  Viscosidad dinámica,  $\rho$  densidad,  $s$  entropía,  $c_v$  calor específico a volumen constante y  $c_p$  calor específico a presión constante.2) Para calcular las propiedades de la Tabla 1 se utilizó el

software Chemicalogic Steamtab Companion V1.0. Basado en la formulación IAPWS-95 tomado de <http://www.chemicalogic.com/>

A partir de los datos anteriores, se determina la tasa de transferencia de calor que se espera transmitan los gases de combustión al fluido que circula por el interior del serpentín. Se aísla cada una de las regiones considerándolas como un volumen de control independiente.

### 5.1.1 Calentamiento del líquido subenfriado

Para la zona de calentamiento desde líquido subenfriado hasta el líquido saturado, el balance de energía arroja que, sin considerar interacciones de trabajo, asumiendo flujo estable y despreciando variaciones de la energía cinética y potencial:

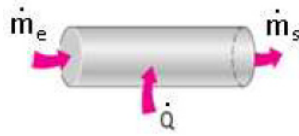


$$\dot{Q} = \dot{m}(i_s - i_e) = \frac{(20Kg)}{(3600seg)} (525.728 - 105.011) \frac{Kj}{Kg}$$

La tasa de calor es:  $\dot{Q} = 2.34KW$

### 5.1.2 Proceso de Ebullición

Análogamente, para el tramo en que se presenta la ebullición, la energía es absorbida como calor latente de evaporación, y con las mismas consideraciones respecto al trabajo y la energía cinética y potencial, se tiene que:

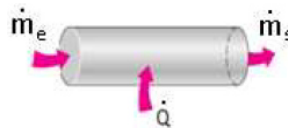


$$\dot{Q} = \dot{m}(i_s - i_e) = \frac{(20Kg)}{(3600seg)} (794.956 - 525.728) \frac{Kj}{Kg}$$

La tasa de calor es:  $\dot{Q} = 1.9 KW$

### 5.1.3 Sobrecalentamiento del vapor

También podemos escribir para la zona de vapor sobrecalentado que:



$$\dot{Q} = \dot{m}(i_s - i_e) = \frac{(20Kg)}{(3600seg)} (2936.36 - 794.956) \frac{Kj}{Kg}$$

La tasa de calor es:  $\dot{Q} = 11.79KW$

Finalmente, considerando la transferencia de calor total a lo largo de la longitud del tubo se obtiene que el flujo de calor total requerido de  $\dot{Q} = 16.03 KW$  equivalente a  $\dot{Q} = 54696 \frac{Btu}{hora}$ .

Flujo de calor suministrado por el combustible

$$\dot{Q}_c = m * PC$$

$$\dot{Q}_c = 2 * 33913kj/m^3$$

$$\dot{Q}_c = 67826 \text{ kJ/m}^3$$

Eficiencia de la caldera

$$\eta = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_c} * 100 = \frac{54696}{67826} * 100$$

$$\eta = 80 \%$$

#### **5.1.4 Cálculos para la transferencia de calor por convección del agua al Interior del serpentín para las condiciones de diseño**

Según se determinó en la sección 5.1, se requieren cerca de 32KW para producir vapor en las condiciones establecidas. Para calcular el coeficiente de transferencia por convección al interior del serpentín se utilizaron las correlaciones reportadas para una fase (agua o vapor) y dos fases (mezcla de agua y vapor) (ver secciones 2.3.6 y 2.3.6.1)

Para las regiones de calentamiento y sobrecalentamiento (fase única), la forma apropiada de la ley de Newton para el flux de calor viene dado por:

$$q'' = h(T_s - T_m) = h\Delta T$$

Donde  $T_s$  y  $T_m$  son las temperaturas de la superficie y del fluido respectivamente. El coeficiente de transferencia de calor  $h$  se calcula a partir de la correlación de Seban y McLaughlin:

$$h = \frac{\bar{Nu} \times k_f}{D} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \left[ \text{Re}^{\frac{1}{20}} \left( \frac{D}{D_H} \right)^{\frac{1}{10}} \right] \times \frac{k_f}{D}$$

Usando las propiedades promedio del fluido para el tramo de líquido subenfriado e interpolando, se calculan los números adimensionales de Reynolds y Prandtl:

$$ReD = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} = \frac{4(0.011 \text{ Kg/s})}{\pi(0.00546 \text{ m})(556.1955 \mu \text{ Pa.s})} = 4612.4$$

$$Pr = 3.754, \quad k = 0.6456 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}, \quad D = 0.00546 \text{ m}$$

**Resultando:**

$$h = \frac{Nu * K1}{D} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left( Re^{\frac{1}{20}} \left( \frac{D}{Dh} \right) 1/10 \right) * \frac{K1}{D} = 3905.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Ahora, para la zona de vapor sobrecalentado, e interpolando y utilizando la expresión de Seban y McLaughlin, y sabiendo que los números de Reynolds y Prandtl, respectivamente son:

$$ReD = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} = \frac{4(0.011 \text{ Kg/s})}{\pi(0.00546 \text{ m})(80.002 \mu \text{ Pa.s})} = 3206.4$$

$$Pr = 0.973704, \quad k = 0.50865 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}, \quad D = 0.00546 \text{ m}$$

**Resultando:**

$$h = \frac{Nu * K1}{D} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left( Re^{\frac{1}{20}} \left( \frac{D}{Dh} \right) 1/10 \right) * \frac{K1}{D} = 1864.4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

## 5.2 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA PRESIÓN DEL DOMO

Para el diseño del generador de vapor se realizarán cálculos de resistencia al equipo. Estos cálculos se dividirán en dos fases unos analíticos apoyados en



teoremas y ecuaciones referentes al diseño de recipientes sometidos a presión y una segunda fase de análisis por medio de simulación computacional de esfuerzos.

En este capítulo se abordarán los cálculos analíticos de resistencia a la presión interna y temperatura. Es importante recalcar que son solo algunos los componentes sometidos a esfuerzos por presiones internas. Estos componentes son los serpentines y el domo de condensados.

Los serpentines están fabricados en su totalidad por tubería delgada de acero inoxidable tipo *tubing*. Este tipo de tuberías están diseñadas para resistir altas presiones. Se sabe que la presión máxima de trabajo del generador es 1.2 MPa y temperatura entre 30 y 250°C, entonces la tubería que utilizaremos para el sistema de serpentines y tubing es tubería de acero inoxidable AISI 304 de ¼" (6.35mm) y espesor de pared 0.89mm. Con la información anterior evaluamos según el catálogo de tuberías con dichas especificaciones:

**Tabla 2. Presiones Admisibles para Tubos de Acero Inoxidable.**



**PRESIONES ADMISIBLES POR TUBOS DE ACERO INOXIDABLE**

DIAMETRO EXTERIOR DEL TUBO		ESPESOR DE PARED DEL TUBO															
		0,010		0,012		0,014		0,016		0,020		0,028		0,035		0,049	
pulg	mm	0,254		0,305		0,356		0,406		0,508		0,711		0,889		1,245	
		psi	bar	psi	bar	psi	bar	psi	bar	psi	bar	psi	bar	psi	bar	psi	bar
1/16	1,587	5600	383	6800	465	8100	554	9400	643	12000	821						
1/8	3,175											8500	582	10900	746		
3/16	4,762											5400	369	7000	479	10200	699
1/4	6,350											4000	274	5100	349	7500	514
5/16	7,937													4000	274	5800	397
3/8	9,525													3300	226	4800	329
1/2	12,700													2600	178	3700	253
5/8	15,875															2900	199
3/4	19,050															2400	164
7/8	22,225															2000	137
1	25,400																
1-1/4	31,750																
1-1/2	38,100																
2	50,800																

Tubos de acero inoxidable AISI 304 ó 316, recocido, s/ASTM A 269 .  
 Basadas en una resistencia de rotura a la tracción de 5167 bar (75000psi).  
 Temperaturas entre -30 a 40 C  
 Cargas de presiones de trabajo admisibles calculadas a partir de valores S de 1378bar s/ANSI B 31.3  
 Para tubos con soldadura multiplicar por 0,80

Fuente: Fittinox <http://www.fittinox.com.ar/Tabla%206-Presion%20admisibles.pdf>

Según la tabla anterior se puede determinar que la tubería de acero inoxidable de 1/4" con espesor de pared de 0.89mm resiste una presión interna máxima de 5100psi equivalente a 35Mpa. Con esto podemos concluir que no hay problema de rotura por presión interna con la tubería de acero inoxidable ya que resiste una presión 10 veces mayor a la presión de trabajo.

Para realizar los cálculos de resistencia a la presión interna en el domo de condensados en función de la temperatura y presión de trabajo, se abordaron dos referencias bibliográficas: "API 510 Certified Pressure Vessel Inspector

*Syllabus*” y “*Diseño y cálculos de recipientes a presión*”. Estos son muy útiles para realizar el diseño de recipientes, cualquiera que fuera su geometría o dimensión, sometido a esfuerzos procedentes de presiones internas o externas. Ambos se apoyan en la norma ASME Sección VIII División 1 que enfatizan en el diseño de recipientes sometidos a presión.

Un recipiente sometido a presión es definido como un contenedor con un diferencial de presión entre el interior y exterior del mismo. El domo de condensados del generador es considerado como un recipiente a presión, según la bibliografía, debido a que es capaz de almacenar un fluido a presión interna manométrica y de pared delgada.

Para realizar el cálculo de dichos esfuerzos es importante definir ciertos parámetros y conocer algunos conceptos.

Lo primero es conocer la situación a la que se le aplicará el análisis, es decir conocer todos los aspectos del cuerpo al que se realizará el estudio de resistencia. Existen diferentes tipos de recipientes a presión los cuales se clasifican según su uso y su forma. Por su uso se pueden dividir en recipientes de almacenamiento y en recipientes de proceso. Por su forma, los recipientes sometidos a presión pueden dividirse en cilíndricos y esféricos. En el marco temático de este trabajo se encuentran definidos cada uno de estos tipos de recipientes.

El domo de condensados del generador de vapor es un recipiente sometido a presión interna y que debido a su uso estaría categorizado como un recipiente de proceso debido a que el tiempo al que estará sometido a dicha presión es relativamente corto y de manera repetitiva, además estaría categorizado, según su forma, como un recipiente cilíndrico de orientación horizontal.

Otros aspectos muy importantes a considerar en el diseño de los recipientes sometidos a presión son el diseño de las tapas, la eficiencia de las soldaduras, las boquillas, el cálculo de las silletas y el cálculo de las orejas. Estos temas los

trataremos más adelante a modo de realizar un análisis completo de la situación. De cualquier modo, cualquiera que fuese el caso, antes de abordar el análisis numérico del diseño de alguno de los componentes antes mencionados, es importante tener en cuenta las variables a considerar que ya han sido previamente definidas.

**a. Presión de operación (Po) y Presión de diseño (P):**

Según el código ASME:

$$\text{Si } P_o < 300 \text{ lb/in}^2 \quad \text{entonces} \quad P = P_o + 30 \text{ lb/in}^2$$

Como nuestra presión de operación es 1.2MPa (174.05 lb/in<sup>2</sup>) entonces:

$$P_o = 174,05 \text{ lb/in}^2$$

$$P = 174,05 \text{ lb/pul}^2 + 30 \text{ lb/in}^2$$

$$P = 204,05 \text{ lb/in}^2$$

Entonces la presión de diseño será 204 Psi.

**b. Presión de prueba (Pp):**

$$P_p = P (1.3) \text{ Sta/Std}$$

Dónde:

**P** = Presión de diseño.

**Sta** = Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura ambiente.

**Std** = Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura de diseño.

El domo está fabricado en acero inoxidable del tipo 304. Sabiendo esto, y además conociendo la temperatura de diseño, podemos determinar el módulo de elasticidad del material. La temperatura de diseño es la temperatura a la que va a estar sometido el recipiente. Anteriormente determinamos una temperatura máxima de 300°C

Según la siguiente tabla deducimos los valores  $Sta$  y  $Std$  sabiendo que la temperatura de operación es de 300°C (570°F):

**Tabla 3. Valores máximos de tensión admisible “S” para materiales ferrosos.**

2009b SECTION II, PART D (CUSTOMARY)									
TABLE 1A (CONT'D)									
SECTION I; SECTION III, CLASSES 2 AND 3; * SECTION VIII, DIVISION 1; AND SECTION XII									
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS									
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)									
Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Designation/ UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size/Thickness, In.	P-No.	Group No.
1	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	302	S30200	...	...	8	1
2	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	302	S30200	...	...	8	1
3	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	304	S30400	...	...	8	1
4	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	304	S30400	...	...	8	1
5	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	304H	S30409	...	...	8	1
6	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	304H	S30409	...	...	8	1

Line No.	Min. Tensile Strength, ksi	Min. Yield Strength, ksi	Applicability and Max. Temperature Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only)				External Pressure Chart No.	Notes
			I	III	VIII-1	XII		
1	75	30	NP	NP	750	650	HA-1	G5
2	75	30	NP	NP	750	650	HA-1	G5
3	75	30	1500	NP	1500	650	HA-1	G12, T8
4	75	30	1500	800	1500	650	HA-1	G5, G12, H1, T7
5	75	30	1500	800	1500	NP	HA-1	G5, T7
6	75	30	1500	NP	1500	NP	HA-1	T8

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding													
	-20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
1	20.0	...	20.0	...	18.9	18.3	17.5	16.6	16.2	15.8	15.5	...	...	...
2	20.0	...	16.7	...	15.0	13.8	12.9	12.3	12.0	11.7	11.5	...	...	...
3	20.0	...	16.7	...	15.0	13.8	12.9	12.3	12.0	11.7	11.5	11.2	11.0	10.8
4	20.0	...	20.0	...	18.9	18.3	17.5	16.6	16.2	15.8	15.5	15.2	14.9	14.6
5	20.0	...	20.0	...	18.9	18.3	17.5	16.6	16.2	15.8	15.5	15.2	14.9	14.6
6	20.0	...	16.7	...	15.0	13.8	12.9	12.3	12.0	11.7	11.5	11.2	11.0	10.8

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding														
	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650
3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Fuente: Código A.S.M.E. Sección II Parte D. Fragmento de Tabla 1A. Pág: 90 – 93

Entonces se tiene que para el acero A-304 a temperatura ambiente:

$$S_a = 16700 \text{ psi}$$

Para el acero A-304 a 570°F tenemos que:

$$S_d = 12500 \text{ psi}$$

Entonces, como se determinó anteriormente que la presión de diseño es de 204 lb/pul<sup>2</sup> se puede hallar la presión de prueba con la siguiente ecuación:

$$P_p = P (1.3) \frac{S_{ta}}{S_{td}} = 204 \text{lb/in}^2 (1.3) \frac{16700 \text{Psi}}{12500 \text{Psi}}$$

$$P_p = \left( \frac{58.5 \text{lb}}{\text{in}^2} \right) 1.44$$

$$P_p = 354,3 \text{ lb/in}^2$$

Entonces, realizando un redondeo, se establece que la presión de prueba será 350Psi.

### 5.2.1 Cálculos del Caparazón (Cámara interna del Domo): Presión Interna.

Los cálculos del caparazón son bastante sencillos. La Figura 10 muestra las dos tensiones principales existentes en un depósito del recipiente de paredes finas.

#### 5.2.1.1 Tensión circular (aro):

Es la tensión que trata de dividir el recipiente o abrirlo a lo largo de su longitud. Este esfuerzo actúa sobre el cordón de soldadura longitudinal (si es que existe). Las ecuaciones correspondientes son:

$$t = \frac{PR_i}{SE - 0.6P} \quad (\text{Ecuación 23})$$

La ecuación se utiliza para hallar  $t$  o, reordenando la ecuación para hallar  $P$  cuando  $t$  que ya se conoce:

$$P = \frac{SEt}{R_i + 0.6t} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Dónde:

**P**= Máxima presión de diseño (o MAWP) (psi)

**t** = Espesor mínimo requerido para resistir la tensión (in)

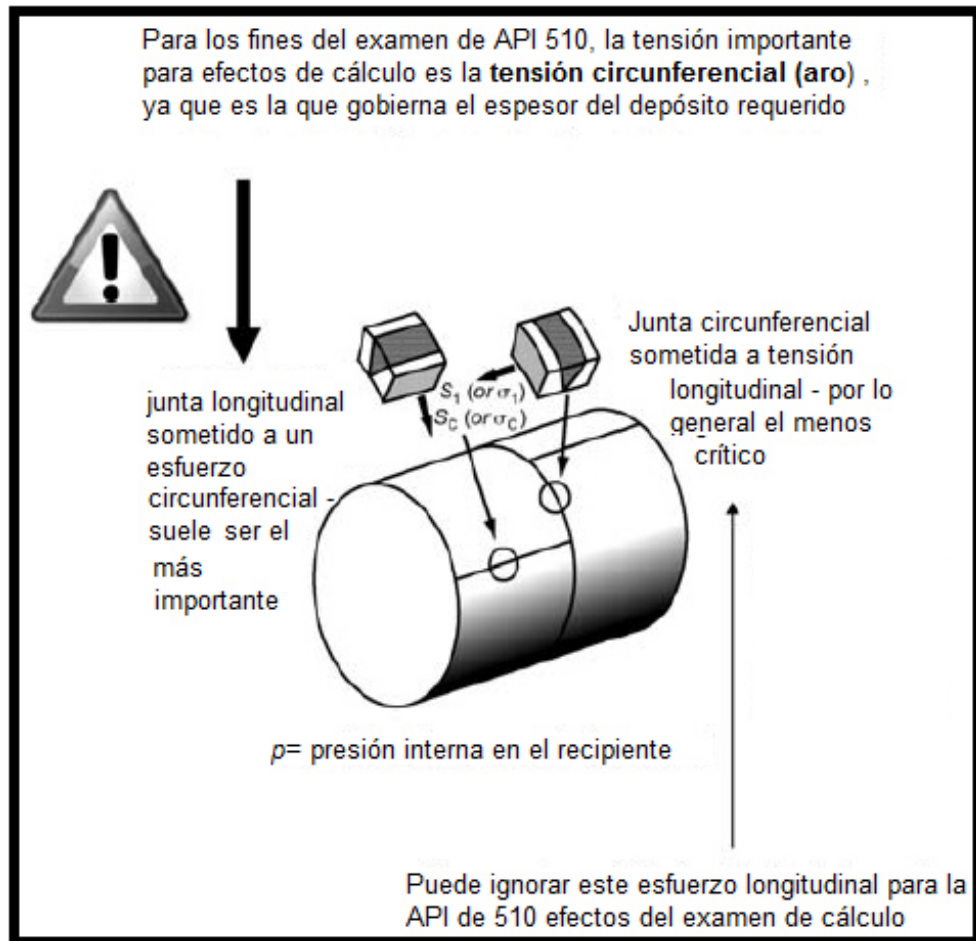
**S** = Máxima tensión permisible del material. Esta puede extraerse de las tablas del código ASME Sección IID. (psi)

**E** = Es la eficiencia de la junta. Este es un factor (entre 0,65 y 1) utilizado para permitir el hecho de que una junta soldada puede ser más débil que el material matriz. Puede leerse del Anexo A correspondiente a las eficiencias de las soldaduras.

**R<sub>i</sub>**= Es el radio interno del recipiente. Una característica clave de  $R_i$  es que es el radio de las condiciones de corrosión (es decir, que prevé en la siguiente inspección programada). La ecuación para determinar  $R_i = R + (No. \text{ de Años multiplicado por la velocidad de corrosión [in/años])$ . Si se fabrica en material inoxidable como aceros del tipo 304 simplemente se toma R como el radio interior del recipiente.



**Figura 9. Tensiones de recipientes.**



Fuente: API 510. Certified Pressure Vessel Inspector Syllabus. Pág. 131

### 5.2.1.2 Esfuerzos Axiales (Longitudinales)

Este es el esfuerzo de tratar de dividir el recipiente en un plano circular, es decir, tratando de hacer estallar la cabeza del recipiente. Es aproximadamente la mitad de la magnitud de la tensión circunferencial y no es un factor determinante de los parámetros de diseño. Deben tenerse cuenta los siguientes puntos específicos.

En cuanto a la fórmula la cáscara cilíndrica para la tensión circunferencial, hay dos limitaciones:

- El espesor no debe exceder la mitad del radio interior, es decir, no es un cilindro grueso
- La presión no debe exceder  $0.385(S-E)$ , es decir, no ser de alta presión. En la práctica esto es más de aproximadamente 4000 *psi* para la mayoría de los recipientes de acero al carbono.

Si el primer requisito se aplica, es decir, se trata de un cilindro de espesor relativamente alto, entonces, se utilizan un conjunto de ecuaciones diferentes.

En este caso conocemos el espesor de pared deseado, así que lo que se desea hallar es la presión interna máxima permisible para el recipiente, entonces se tiene que:

**R=** 7,71 in (diámetro interno de la cámara interna)

**t=** 0,141 in

**E=** se realizarán los cálculos con varios valores de eficiencia de las soldaduras (0,7; 0,85; 1.0)

**S=** 12500psi (para aceros del tipo 304 en láminas a 570°F) (Ver tabla 3)

Entonces, para determinar la presión máxima permisible se sustituyen los valores en la Ecuación 2:

$$P = \frac{S \cdot E \cdot t}{R + 0,6t} = \frac{(12500 \text{ psi}) \cdot (0,7) \cdot (0,141 \text{ in})}{7,71 \text{ in} + (0,6 \times 0,141 \text{ in})} = \frac{1233,75 \text{ psi in}}{7,8 \text{ in}} = 158,17 \text{ psi}$$

$$\text{(Para un } E=0,7) \quad P = 158,17 \text{ psi}$$

$$P = \frac{S \cdot E \cdot t}{R + 0,6t} = \frac{(12500 \text{ psi}) \cdot (0,85) \cdot (0,141 \text{ in})}{7,71 \text{ in} + (0,6 \times 0,141 \text{ in})} = \frac{1498,125 \text{ psi in}}{7,8 \text{ in}} = 192,1 \text{ psi}$$

$$\text{(Para un } E=0,85) \quad P = 192,1$$

$$P = \frac{S \cdot E \cdot t}{R + 0,6t} = \frac{(12500 \text{ psi}) \cdot (1) \cdot (0,141 \text{ in})}{7,71 \text{ in} + (0,6 \times 0,141 \text{ in})} = \frac{1762,5 \text{ psi in}}{7,8 \text{ in}} = 225,96 \text{ psi}$$

$$\text{(Para un } E=1,0) \quad P = 225,96 \text{ psi}$$

### 5.2.1.3 Esfuerzos en Cilindros de Pared Delgada

Para realizar estos cálculos se sustituyen las variables por sus valores relacionados con el Domo de Condensados. Dichas variables son las dimensiones del componente y las presiones a las que está sometido:

**Presión de diseño (P)** = 204psi

**Diámetro (D)** = 8 in

**Radio (r)** = 4 in

**Longitud (l) = 9,84 in**

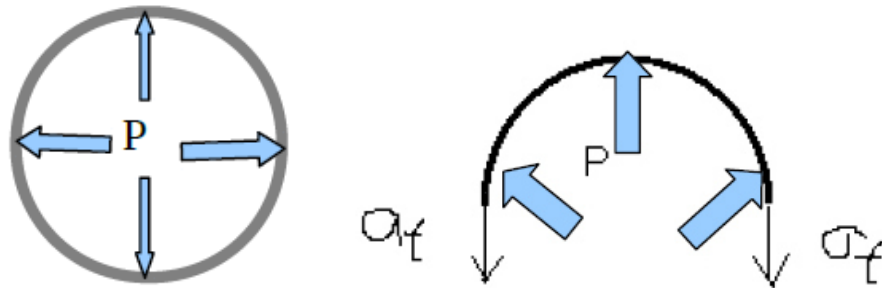
**Espesor (t) = 0,141 in**

Fuerza vertical ejercida por la presión (F) = P·D = 204 lb/in<sup>2</sup> X 8 in = 1632 lb

Área en cada lado = (t)·(l) en los dos lados es:

$$2 \cdot t \cdot l = 2 \times 0,141 \text{ in} \times 9,84 \text{ in} = 2,77 \text{ in}^2$$

**Figura 10. Esfuerzos en recipientes cilíndricos.**



*Fuente: Mecánica aplicada a recipientes de presión. Rafael D'Aiello.*

$$\text{Esfuerzo tangencial } (\sigma_t) : \sigma_t = \frac{P \cdot d}{2t} = \frac{204 \text{ psi} \times 8 \text{ in}}{2(0,141 \text{ in})} = 5787 \text{ psi}$$

Comparado el valor del esfuerzo tangencial obtenido con la resistencia del material 304 a una temperatura de 300°C (570°F) se observa que la resistencia según la tabla del código ASME es de 12500psi lo que arrojó un factor de seguridad de 2,1.

### 5.3 Cálculos por Presión Interna para las Paredes de Recipientes Cilíndricos Horizontales.

En esta sección se procede a realizar los cálculos pertinentes para el diseño de los recipientes sometidos a presión interna según el código ASME Sección VIII División 1. Para esto, se utilizará la definición de las características del generador según su geometría, orientación y tipo de presión sometida antes mencionado y poder utilizar las ecuaciones pertinentes, es decir las ecuaciones para cilíndricos horizontales sometidos a presión interna. Dentro de este análisis se tienen en cuenta la resistencia de las paredes que componen el cilindro, el diseño de las tapas, diseño de las orejas y el diseño de las silletas.

Los parámetros a tener en cuenta en el cálculo de espesores en recipientes sometidos a presión externa son los siguientes:

- **D** = Diámetro interno en pulgadas. = 7,716 in
- **P<sub>o</sub>** = Presión de operación = 174 psi
- **t** = Espesor mínimo requerido en pulgadas
- **R** = Radio interior del cilindro en pulgadas. = 3,858 in
- **E** = Eficiencia de las soldaduras (Se evaluarán con valores de 0.7, 0.85 y 1)
- **S** = Esfuerzo máximo permisible a tensión del material seleccionado para fabricar el domo a la temperatura de diseño = 12500 psi
- **L** = Radio de abombado de las tapa en pulgadas
- **r** = Radio de esquina o de nudillos en pulgadas
- **L<sub>1</sub>** = Longitud entre líneas de tangencia del recipiente = 9,84in
- **T** = Temperatura de diseño = 576°F
- **P** = Presión de diseño, en lb/pulg<sup>2</sup> = 204 psi

Conociendo el concepto de las variables a utilizar en para este cálculo, se procede a realizar el procedimiento para verificar el espesor del cilindro del recipiente mediante la ecuación:

$$t = \frac{PR_i}{SE - 0.6P}$$

La evaluación se realizará teniendo en cuenta tres valores para la eficiencia de la soldadura que son 0,7; 0,85 y 1 respectivamente. Entonces:

**Para  $E=0,7$**

$$t = \frac{204psi * 3,858in}{12500 psi (0,7) - 0.6(204psi)} = 0,0912in (2,31mm)$$

**Para  $E=0,85$**

$$t = \frac{204psi * 3,858in}{12500 psi (0,85) - 0.6(204psi)} = 0,074in (1,87mm)$$

**Para  $E=1$**

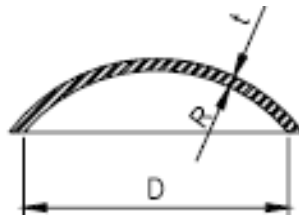
$$t = \frac{204psi * 3,858in}{12500 psi (0,7) - 0.6(204psi)} = 0,0635in (1,61mm)$$

En cualquiera de los tres casos el espesor de lámina utilizado mantiene un factor de seguridad superior a 1,5 en el caso más crítico con una eficiencia en la soldadura de 0,7. Entre más alto es el espesor de lámina menos gastamos en radiografías pero el costo por material es superior. Sin embargo el calibre que vamos a utilizar es comercial y acorde a las especificaciones de trabajo del domo.

#### **5.4 Cálculo de las Tapas para Recipientes Sometidos a Presión.**

El factor importante, después de haber calculado si el espesor del cilindro es permisible para el diseño del recipiente, es el cálculo de las tapas que estarán sometidas a presión. Debemos aclarar de antemano que el Domo de condensados utiliza tapas del tipo Únicamente Abombadas.

**Figura 11. Esquema de tapas únicamente abombadas.**



*Fuente: Diseño y cálculo de recipientes sometidos a presión, capítulo 1.*

En el libro Diseño y Cálculo de Recipientes Sometidos a presión, el autor cita textualmente: *“Las tapas únicamente Abombadas son empleadas en recipientes a presión manométrica relativamente baja, su costo puede considerarse bajo, sin embargo, si se usan para soportar presiones relativamente altas, será necesario analizar la concentración de esfuerzos generada al efectuar un cambio brusco de dirección”*<sup>11</sup>

Para el diseño de tapas únicamente abombadas se tienen las siguientes ecuaciones:

$$t = \frac{P R}{2 S E - 0,2P} \quad \text{(Ecuación 28)}$$

Dónde:

- **E** = Eficiencia de las soldaduras (evaluaremos con el valor más bajo 0,7)
- **P** = Presión de diseño en lb/pulg<sup>2</sup> (204 psi)
- **R** = Radio interior de la tapa semiesférica, en pulgadas (4,92in)
- **S** = Esfuerzo máximo permisible, del material de la tapa a tensión y temperatura de diseño en lb/pulg<sup>2</sup> (12500 psi)

---

<sup>11</sup> Diseño y cálculos de recipientes sometidos a presión, JUAN MANUEL ESTRADA, Cap1, Pág 15

- **T** = Espesor mínimo requerido en la tapa, sin corrosión en pulgadas

Conociendo los conceptos de cada una de las variables, procedemos a realizar los cálculos pertinentes:

**Para E = 0,7**

$$t = \frac{204psi (4,92in)}{2 (12500psi)(0,7) - 0,2(204psi)} = \frac{1003,68psi in}{17459,2psi} = 0,057in (1,5mm)$$

Para una presión de operación de 204 Psi, de acero inoxidable y para las dimensiones del recipiente, el valor mínimo del espesor de la pared de las tapas es de 1,5mm.

## 6. DISEÑO DE PIEZAS Y COMPONENTES

Para realizar el diseño de una pieza mecánica deben tenerse en cuenta las consideraciones necesarias dependiendo de la función, el ensamble y el entorno en el cual está trabajando.

Se aplican diferentes teorías, métodos y herramientas matemáticas que ayudan al diseño de piezas, principalmente, para estimar su resistencia a los esfuerzos a los que puedan estar sometidos durante su operación.

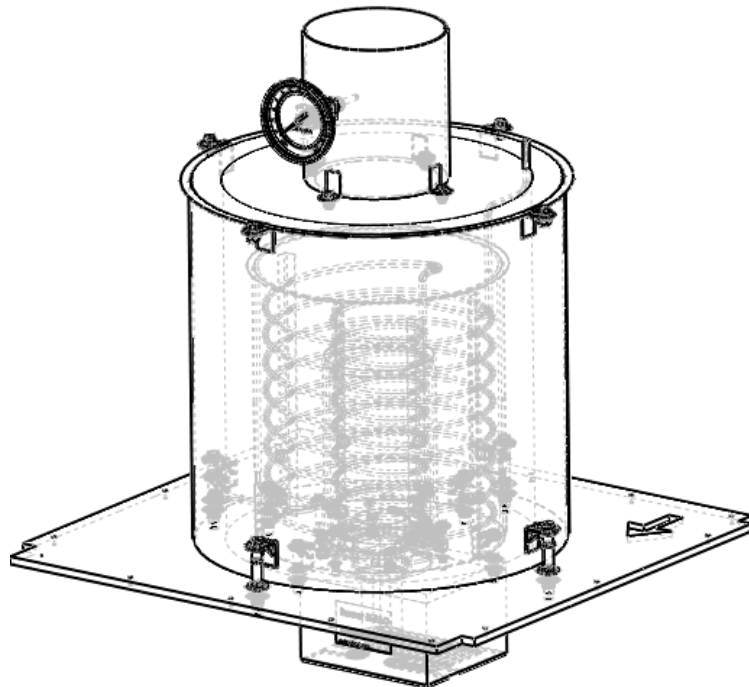
Anteriormente se realizó una descripción de los componentes de cada uno de los 4 sistemas del Generador de Vapor, realizando descripciones, funcionalidad de las piezas y algunos requerimientos a tener en cuenta en su diseño o selección. Lo que se presenta a continuación es el diseño de cada una de estas piezas con las dimensiones reales de fabricación y materiales.



Cabe resaltar que junto con la información suministrada en este capítulo, también como anexo se entregan los planos mecánicos de construcción, descripción y ensamble de cada componente y sistema del generador.

## 6.1 DISEÑO DEL GENERADOR DE VAPOR

*Figura 12. Sistema Generador de Vapor*



### a. Recipiente Primario, Secundario, Principal y Chimenea

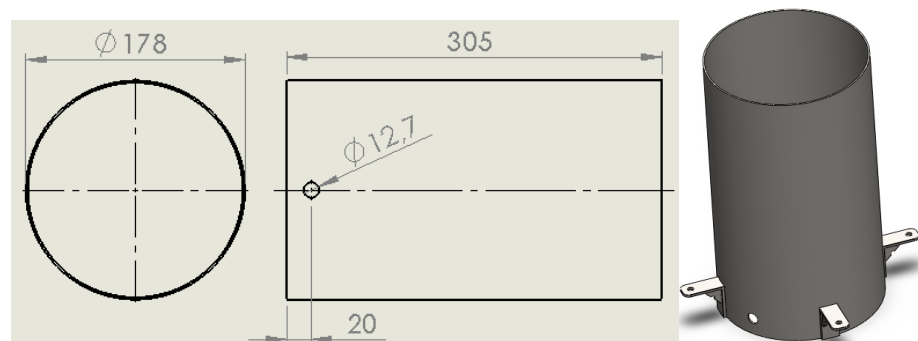
Los recipientes primario, secundario y principal están fabricados de una lámina de acero inoxidable A-304 calibre 16 (1,651mm). Por ser cilindros formados de láminas de acero roladas y soldadas están definidos por las siguientes dimensiones:

Es necesario conocer la masa de cada uno de los componentes del horno para al final determinar el peso total de este. Para determinar la masa de cada componente utilizaremos el volumen suministrado por el software Solidworks® y

multiplicando por la densidad del material del que esté constituido. Al final se anexará una tabla con todas las masas tabuladas de cada componente y la total.

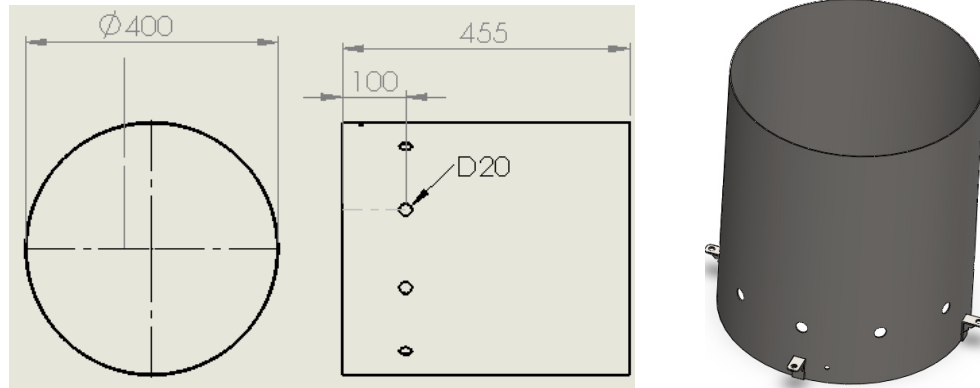
- El recipiente primario tiene un diámetro externo de 178mm, y una longitud de 305mm. Posee un agujero de 1/2" en su superficie para permitir la entrada del tubing que conecta los serpentines primario y secundario. Se encuentra unido por soldadura a 4 orejas para fijarlo a la base del generador.

**Figura 13. Dimensiones del recipiente primario e isométrico con orejas de fijación.**

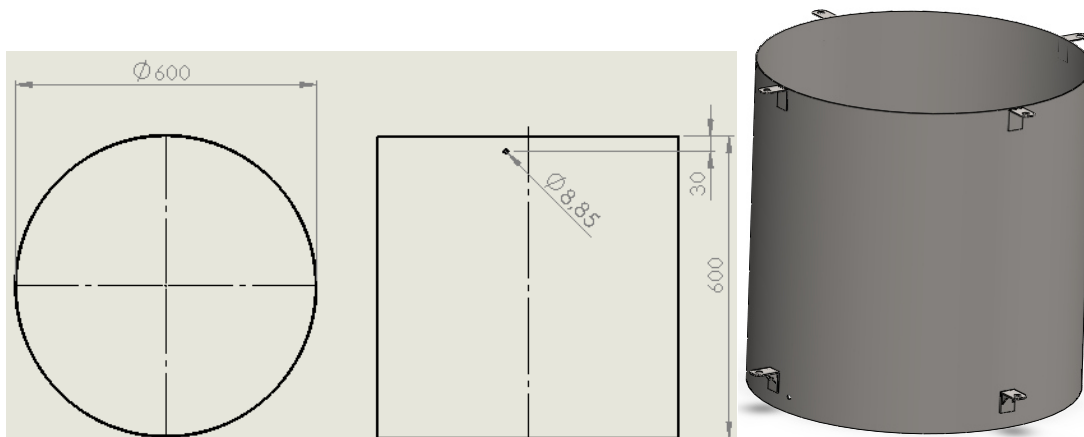


- El recipiente Secundario tiene un diámetro externo de 400mm, y una longitud de 455mm. Posee 10 agujeros de 20mm en su superficie que permiten escapar los gases productos de la combustión hacia el recipiente principal. Posee un agujero de 7mm que permite la entrada del tubing que viene de la línea de entrada de fluido de trabajo. Se encuentra unido por soldadura a 4 orejas para fijarlo a la base del generador.

**Figura 14. Dimensiones del recipiente secundario e isométrico con orejas de fijación.**

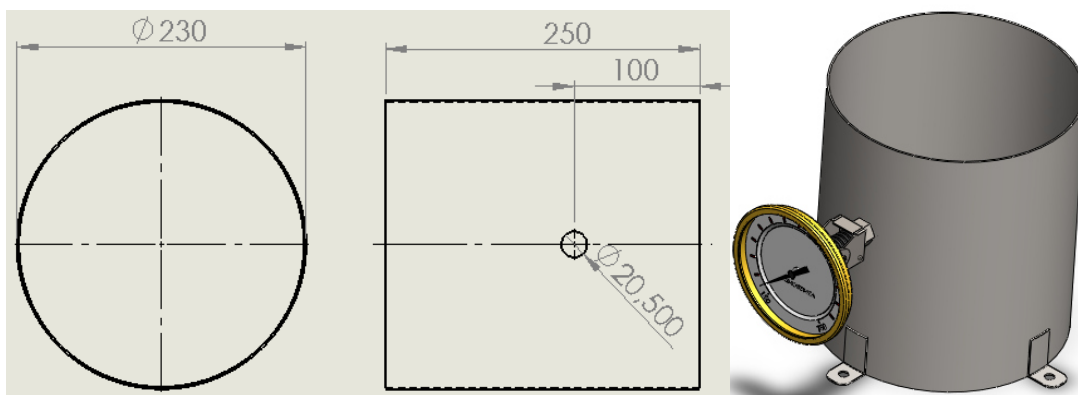


- El recipiente Principal tiene un diámetro externo de 600mm y una longitud de 600mm. Posee un agujero roscado de 8,8mm donde se conecta un racor que permite la entrada del tubing que viene de la línea de entrada de fluido de trabajo. Se encuentra unido por soldadura a 4 orejas para fijarlo a la base del generador y otras 4 para unirlo con la tapa principal.
- **Figura 15. Isométrico con orejas de fijación del recipiente principal y dimensiones.**



- La Chimenea está fabricada de lámina rolada y soldada de acero inoxidable A-3.4 del mismo calibre de los recipientes anteriores. Posee un agujero para acoplar el termómetro análogo y esta fijado por soldadura a 4 orejas para acoplar con la tapa del recipiente principal.

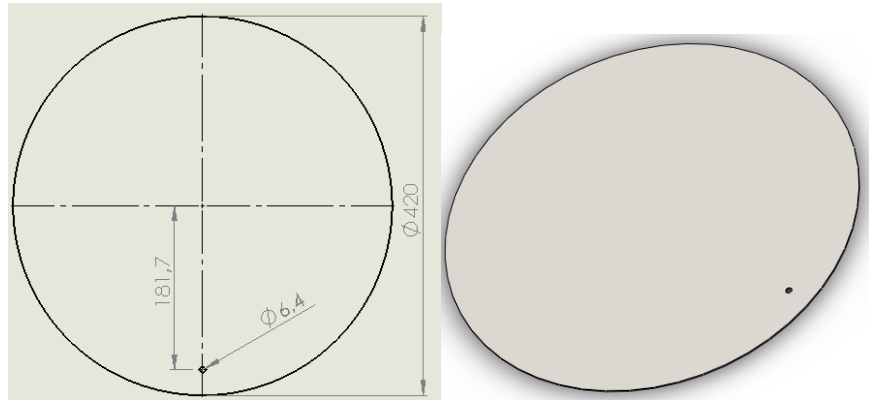
**Figura 16. Dimensiones del recipiente secundario e isométrico con orejas de fijación y termómetro.**



#### **b. Tapas de Recipientes Secundario y Principal**

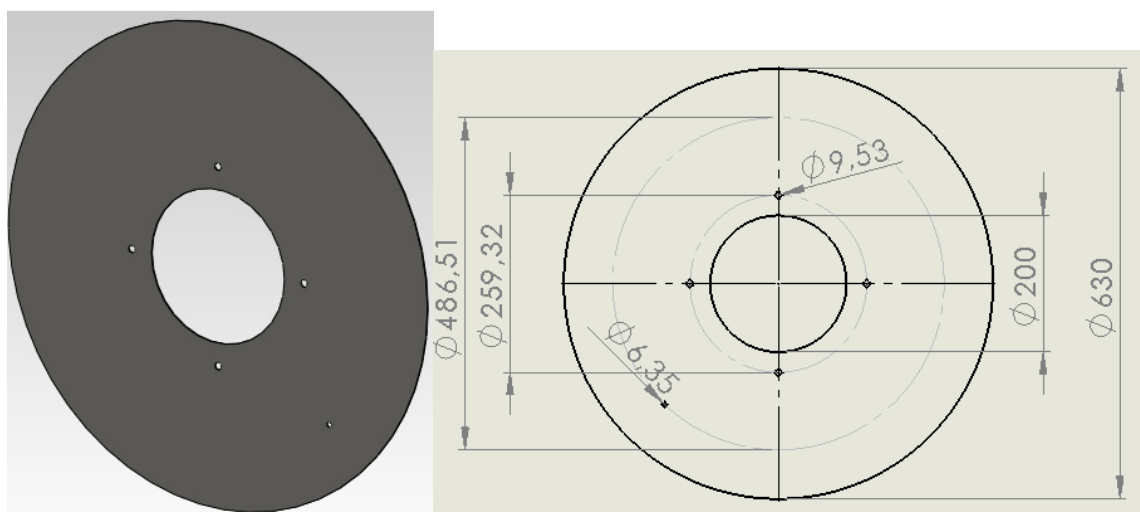
- La tapa del recipiente Secundario está fabricada en lámina de acero inoxidable A 304 calibre 10. Es una circunferencia plana que posee un pequeño agujero que permite la salida del tubing que va del serpentín primario hasta el domo de condensados.

**Figura 17. Plano de la tapa del recipiente secundario e isométrico.**



- La tapa del recipiente principal está fabricada en el mismo material y calibre que la tapa del recipiente secundario. Posee 1 agujero en el centro donde se acopla la chimenea que permite el escape de los gases producto de la combustión. Posee 4 agujeros para unir la chimenea mediante pernos y 1 agujero pequeño por donde pasa el tubing que va hasta el domo de condensados. Están soldadas las 4 orejas perforadas para ensamblar con el recipiente principal.

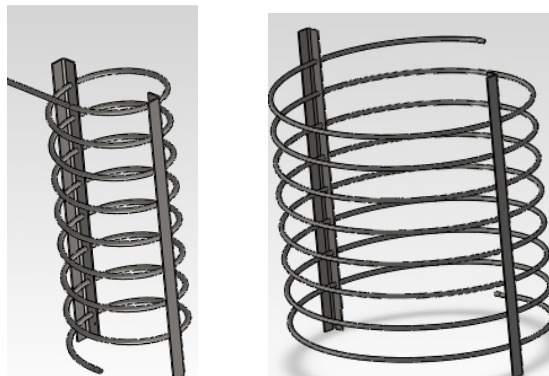
**Figura 18. Plano de la tapa del recipiente Principal e isométrico.**



### c. Serpentín Primario, Secundario y Soportes

- Las especificaciones del Serpentín Secundario son diámetro de 370.2mm, con una altura de 373,1mm, con un total de 8 vueltas y una inclinación de 10°. Se utilizará tubería de acero inoxidable con diámetro exterior de ¼" y un espesor de pared de 0,035". Se utilizarán 12m de tubing para construirlo. Es necesario utilizar una roladora de tubos para su fabricación.
- El Serpentín primario es igual al secundario en fabricación y materiales, varía solo en sus dimensiones. Sus especificaciones son Diámetro de 152,4mm con una altura de 358,7mm con un total de 8 vueltas y una inclinación de 10°. Se utilizarán 6m de tubing para construir este serpentín.
- Para soportar los serpentines se usarán ángulos de acero al carbón cortados. Los ángulos llevarán ranuras que permitirán darle la inclinación de 10° a los serpentines. Una vez que los serpentines pasen por su respectivo soporte se fijarán con alambre. Estos soportes se encuentran fijos a la base del generador.

**Figura 19. Isométricos de serpentines con soportes.**

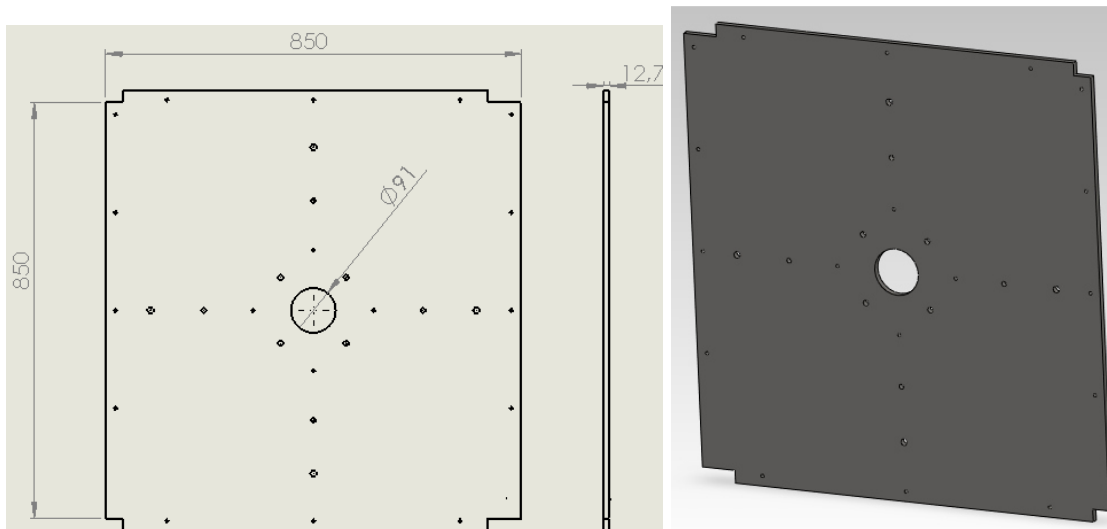


### d. Base del Generador

Fabricada en lámina de acero estructural A-36 con un espesor de ½" con dimensiones de 850 X 850 mm. Posee 14 agujeros cerca de sus extremos

para fijarla al sistema base del generador completo. Posee 16 agujeros simétricos para el acople de los recipientes y otros componentes. Posee un agujero mayor en el centro para permitir la entrada de la boca del quemador. En los planos anexos se especifican mejor las dimensiones totales.

**Figura 20. Plano de la base del generador e Isométrico.**



#### **e. Quemador**

Se propone utilizar un quemador Riello 40 GS que tiene una capacidad de flujo de calor de 35Kw/hr y es de tipo ventilación forzada. El ciclo de funcionamiento se considera un período de precalentamiento de la cámara de combustión, el servomotor activa la mariposa de aire dejándola abierta. Durante este período la electroválvula de gas está cerrada. Después de este paso, con la mariposa de aire y la mariposa del dosificador de gases posicionados en un valor mínimo, se acciona la electroválvula y el transformador que prevé el encendido de gas de mínimo consumo. En este punto, aparece la chispa del electrodo, se acciona el servomotor que provee la mezcla aire-gas que lleva el quemador, en este momento es cuando se produce la flama.

**Figura 21. Quemador Riello 40**



Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/riello/quemadores-fuel-ligero-26924-455084.html>

**c. Otros Componentes y Accesorios**

Entre los accesorios del generador de vapor se encuentran uniones de tubing de 1/4" para conectar las tuberías de los serpentines, un termómetro para la chimenea, algunos pernos y ángulos de acero inoxidable.

**Figura 22. Accesorios del sistema Generador de Vapor.** A la izquierda unión de tubing en acero inoxidable, a la derecha termómetro de chimenea.

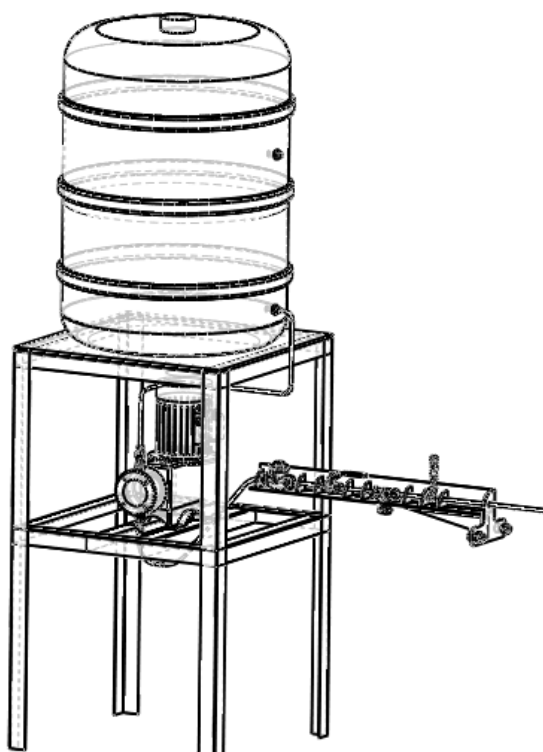


Fuente: [http://www.wika.com.mx/52\\_es\\_es.WIKA](http://www.wika.com.mx/52_es_es.WIKA)



## 6.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE ENTRADA

*Figura 23. Sistema de entrada*



### **a. Tanque Contenedor de Agua**

Como se había mencionado en la descripción de cada componente, es un simple tanque polimérico. Debe ser de unos 100 litros aproximadamente. El tanque tendrá 2 agujeros de  $\frac{1}{4}$ ", uno inferior para conectar la línea por donde sale el fluido de trabajo y uno en la parte superior para la entrada de los condensados.

**Figura 24. Tanque plástico contenedor.**



Fuente: [http://kr.made-in-china.com/co\\_apollomachine/product\\_200L-250L-HDPE-Drums-Making-Machine\\_heieieuhy.html](http://kr.made-in-china.com/co_apollomachine/product_200L-250L-HDPE-Drums-Making-Machine_heieieuhy.html)

#### **b. Bomba Alimentadora de Agua**

Se recomienda utilizar una bomba de agua de marca Milton Roy® puede ser de la serie R que pueden manejar presiones entre 60 y 190psi.

#### **Datos técnicos:**

- Temp. Máxima líquido bombeado: +2°C a +250°C.
- Temp. ambiente: 0°C a +40°C.
- Presión sistema: máx. 18 bares.
- Caudal máximo de 66L/h
- Diámetro succión: de 5 a 35mm
- Diámetro descarga: de 5 a 30mm

Fuente: <http://grupocasamonroy.mx/catalogo/index.php?cPath>

### **Aplicaciones:**

- Circulación de agua caliente o fría en:
- Recirculación de agua caliente sanitaria.
- Sistemas de calefacción.
- Sistemas de agua caliente sanitaria.
- Sistemas de refrigeración y aire acondicionado.

**Figura 25. Bomba de agua Milton Roy®**

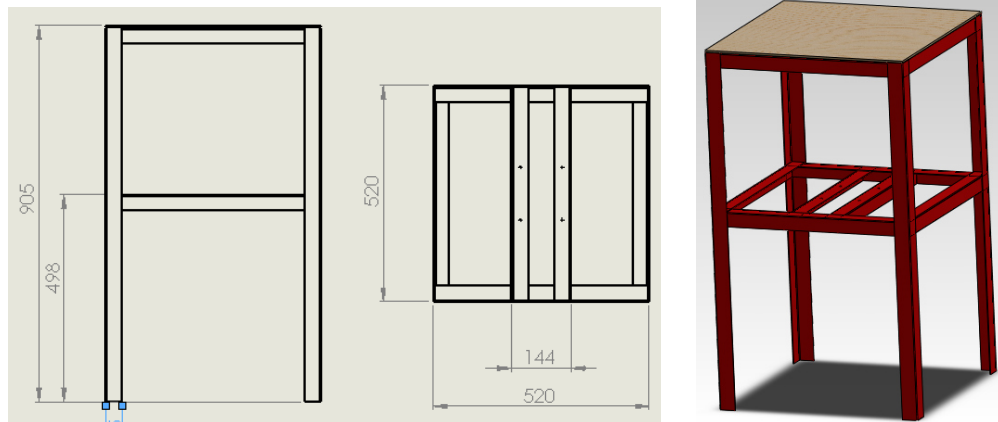


Fuente: <http://www.edie.net/products/MILTON-ROY-INDUSTRIAL-DOSING-PUMPS/5458>

### **c. Mesa del Tanque de Agua**

La mesa que soporta el tanque de agua y la bomba dosificadora está fabricada en ángulos de acero estructural. Sus dimensiones son 52 X 52 cm con una altura de 90 cm.

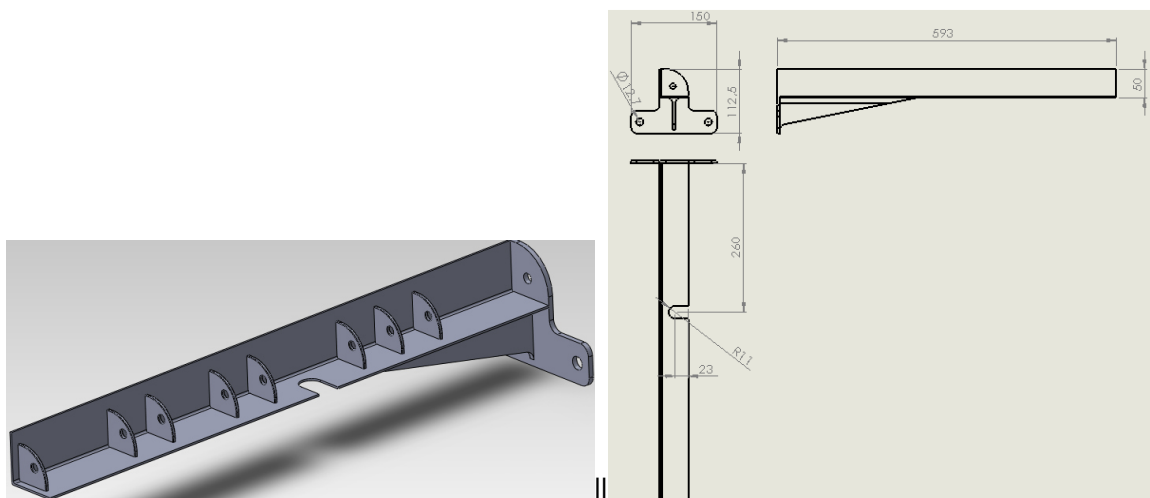
**Figura 26. Mesa del tanque de agua, plano e isométrico.**



#### **d. Base para línea de entrada**

Está fabricada en ángulo y platinas de acero estructural de 2mm de ancho. Es un retazo de ángulo soldado a una platina con agujeros donde se acopla la línea de entrada con el banco del generador de vapor. También posee orejas de platina soldadas por donde pasa el tubing de la línea de entrada. En una de sus superficies, posee una ranura para la salida de la mariposa de la válvula de aguja.

**Figura 27. Base para línea de Entrada.**



### e. Accesorios de la línea de Entrada

Como se describió anteriormente, la línea de entrada posee una serie de válvulas y sensores que permiten medir y controlar variables como presión y caudal de la entrada del fluido de trabajo al sistema. Entre las válvulas tenemos tipo Check, de globo y de diafragma. También posee un sensor de presión.

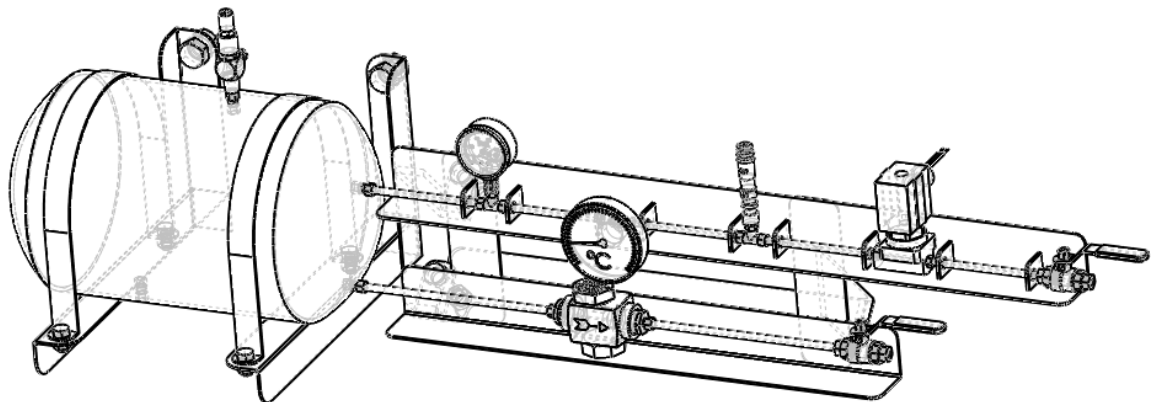
**Figura 28. Válvulas y sensor del sistema de entrada.** De izquierda a derecha, válvula tipo check, de globo, de diafragma y un sensor de presión digital.



Fuente: <http://www.o-digital.com/supplier-catalogs/2226/2232/Sensor-1.html>

## 6.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE SALIDA

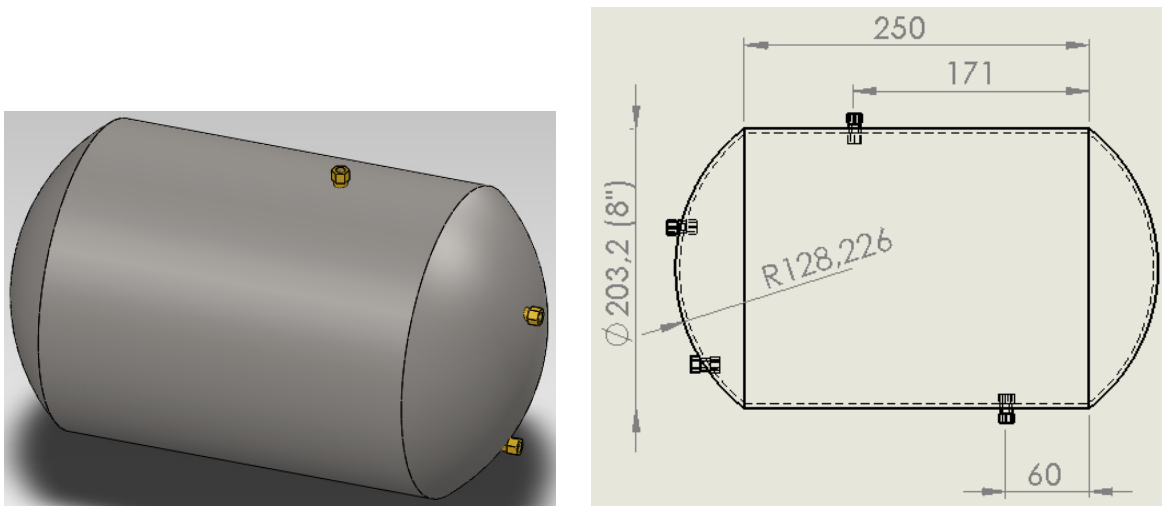
**Figura 29. Sistema de Salida**



**a. Domo de condensados**

El diseño del domo de condensados está basado en los cálculos realizados previamente bajo teorías de diseño de recipientes sometidos a presión, definiéndolo como recipiente sometido a presión horizontal de pared delgada con tapas abombadas apoyados en el código ASME Sección VIII División 1. Para su fabricación se necesitan tres tipos de máquinas, una abombadora, una cejadora y una roladora. Se debe fabricar en lámina de acero inoxidable del tipo 304 calibre 10 (3.6mm) con un diámetro de 8 pulgadas y una presión de trabajo de 10 bares. Posee 4 acoples de acero inoxidable 304 de ¼" NPT localizados dos en una de las tapas de los cuales; uno superior para la línea de salida de vapor y uno inferior para la salida de la línea de condensados; uno en la parte superior del domo para conectar la válvula de seguridad de presión y uno inferior por donde entra el fluido de trabajo desde los serpentines.

**Figura 30. Domo de condensados, plano e isométrico.**



**Figura 31. Válvula de seguridad de presión.**



<http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/valvula-seguridad-72051.html>

### **b. Línea de Salida de Vapor**

La línea de salida de vapor consta de una serie de elementos de control y medición interconectados que permiten la salida del fluido de trabajo en forma de vapor. Entre sus componentes se encuentran, en orden de secuencia de salida del fluido: Un manómetro, un termómetro de flujo, un sensor de presión digital, una válvula solenoide y finalmente una válvula de globo.

**Figura 32. Componentes de la línea de Salida de Vapor.** De izquierda a derecha, manómetro, termómetro, sensor de presión, válvula solenoide y válvula de bola.



Fuente: <http://www.o-digital.com/supplier-catalogs/2226/2232/Sensor-1.html>

### c. Línea de Salida de Condensados

Al igual que la línea de salida de vapor, la línea de salida de condensados es una serie de elementos interconectados que permiten el drenaje del fluido de trabajo en forma de líquido del Domo de Condensados. Estos elementos son una válvula tipo check y una válvula tipo globo.

**Figura 33. Componentes de la Línea de Salida de Vapor. Válvula tipo check y válvula tipo globo.**



Fuente: <http://www.o-digital.com/supplier-catalogs/2226/2232/Sensor-1.html>

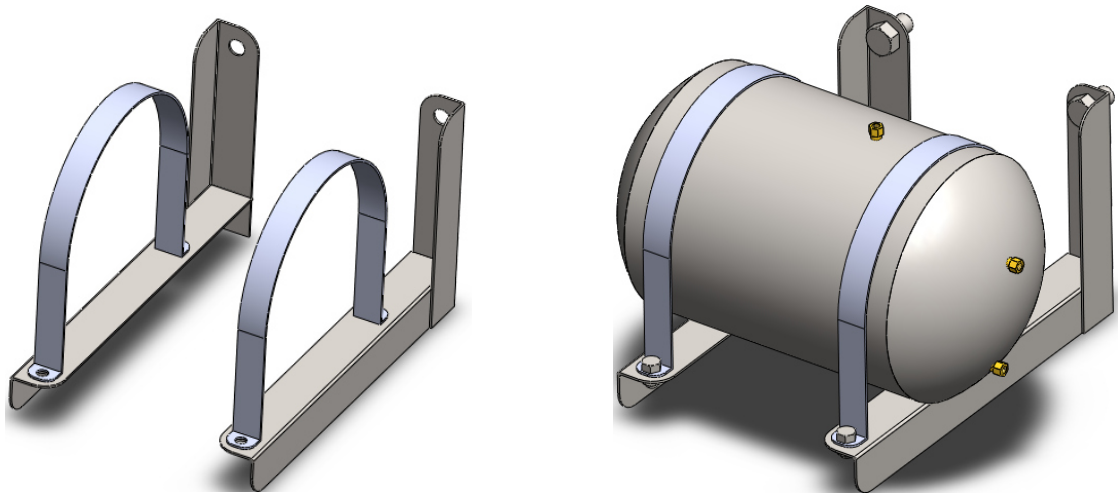
### d. Estructuras de soporte

Las estructuras de soporte son 2. La primera es la estructura que soporta al domo de condensados, la segunda corresponde a la estructura que soporta la línea de salida de vapor y la línea de salida de condensados.

La estructura que soporta el domo de condensados está fabricada principalmente en ángulos de acero tipo A-36 de 4cm X 4cm. Estas estructuras forman unos ángulos rectos con unos agujeros donde descansa el domo y se aseguran con vinchas fabricadas con lámina delgada de acero. Las estructuras de ángulos poseen perforaciones de media pulgada para sujetarse al banco del generador de vapor.

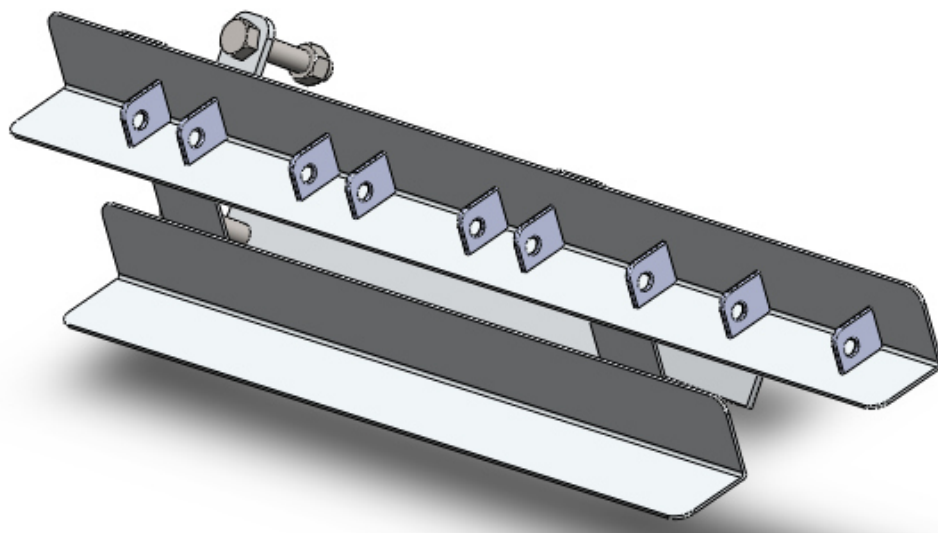


**Figura 34. Estructura de soporte del Domo de Condensados.**



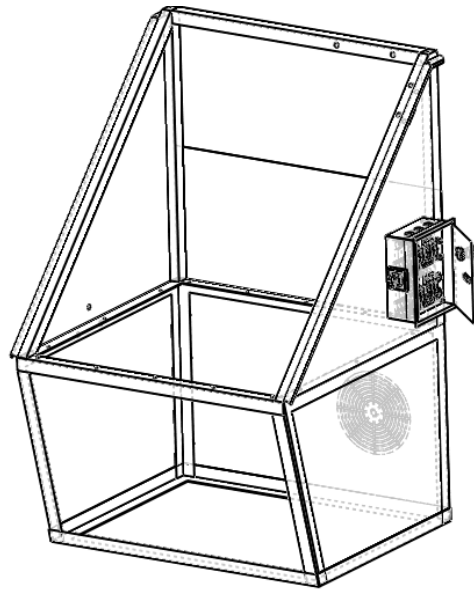
La estructura que soporta las líneas de salida de vapor y condensados está fabricada en ángulo de acero de 4 X 4cm y láminas de acero de 2mm de espesor. Posee perforaciones de 1/4" para fijarse a la base del generador.

**Figura 35. Estructura de soporte de líneas de salida.**



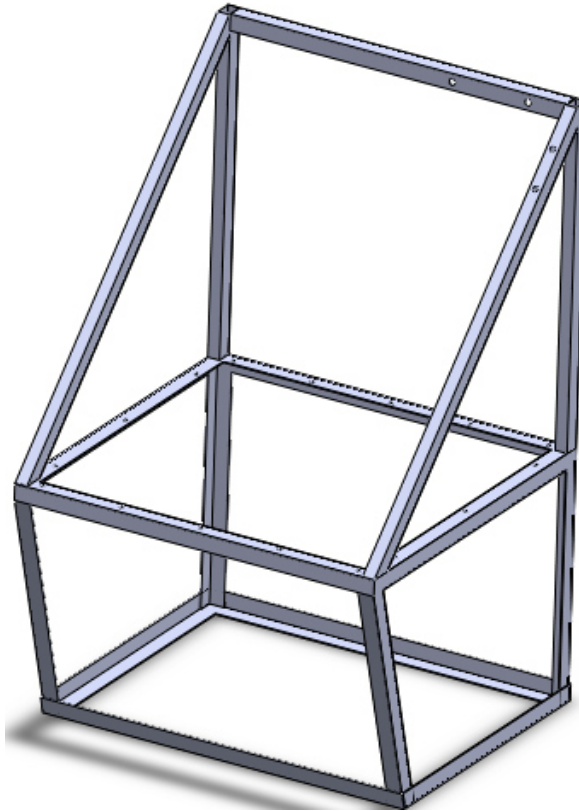
## 6.4 DISEÑO DE LA BASE DEL GENERADOR DE VAPOR

*Figura 36. Sistema Base del Generador de Vapor*



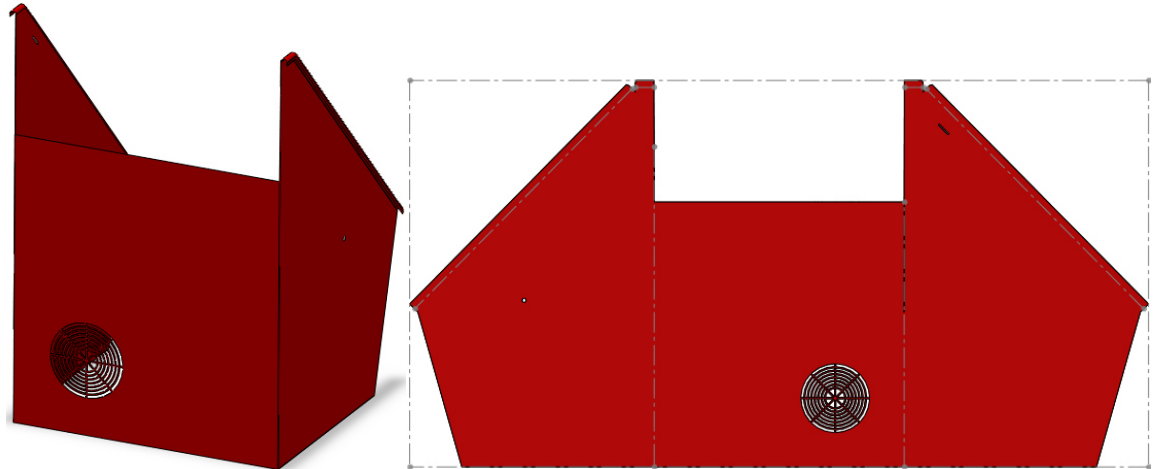
La base del generador de vapor se divide en el chasis que es la estructura de soporte fabricada en tubería de acero cuadrada de 3 X 4cm y ángulos de acero de 4 X 4 cm soldadas que forman el marco de la base donde se apoyan y sujetan mediante pernos todas las estructuras de apoyo y la placa base del generador.

**Figura 37. Chasis de la base del generador.**

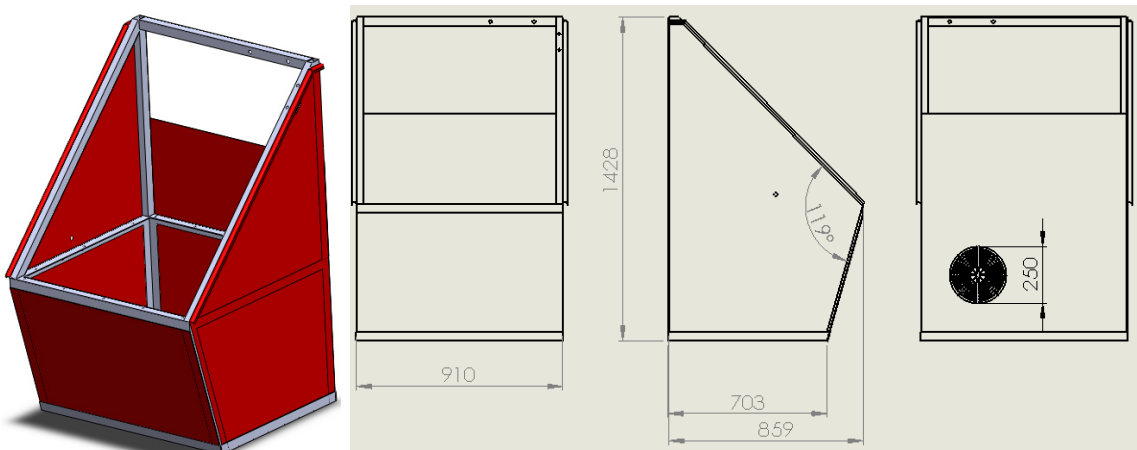


El segundo componente de la base del generador es la superficie metálica que forma la carcasa de la base. Esta carcasa está fabricada en lámina de acero delgada plegada para dar forma de hogar. Posee una rejilla en la parte posterior para permitir la ventilación para el quemador. Adicionalmente tiene una tapa frontal que se ajusta con pernos al chasis de la base que permite ser desmontada para revisar o realizar mantenimiento en el quemador.

**Figura 38. Carcasa de la base del generador. A la derecha chapa metálica desplegada.**



**Figura 39. Dimensiones Base del generador de vapor.**



### **Software libre usado para el cálculo de las variables termodinámicas**

Para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua se utilizó el software libre CHEMICALOGIC STEAM TAB ® Companion V1.0 basado en la formulación IAPWS-95 tomado de <http://www.chemicalogic.com/>

## **7. SIMULACIONES COMPUTACIONALES DE RESISTENCIA**

Las simulaciones fueron realizadas con el software SolidWorks® utilizando la herramienta Simulation Xpress®. Este software utiliza el teorema de Von Mises para simular las tensiones en la pieza y desplazamiento estático. Gracias a esta herramienta se puede determinar el factor de seguridad de resistencia a la deformación dependiendo del material, los apoyos, las magnitudes, direcciones y sentidos de las cargas y por supuesto de la geometría de la pieza.

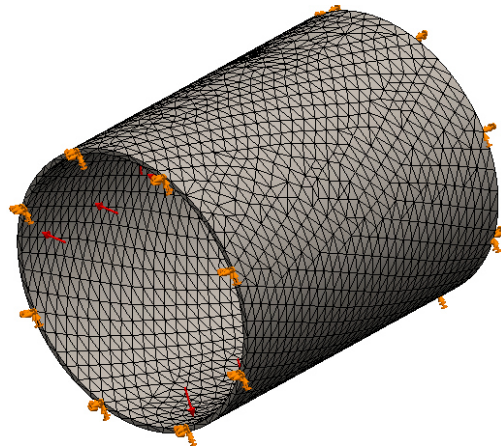
En el caso del Generador de Vapor, para el domo de condensados, se evalúan las piezas sometidas directamente a esfuerzos de presión ejercidos por la presión de vapor durante el proceso. Estas piezas sometidas a esfuerzos de presión son el cilindro que conforma el cuerpo del domo de condensados y las tapas abombadas. También se evalúa la resistencia de la estructura de la base del generador simulando el peso del equipo.

El software permite evaluar las deformaciones, representando gráficamente cómo se espera que fallen las piezas. A pesar de las simulaciones, los expertos recomiendan realizar de igual manera el análisis analítico de resistencia por modos de falla, si es posible, y comparar resultados. Este análisis fue realizado bajo el código ASME Sección VIII División 1 en el capítulo 5.

### **7.1. SIMULACIÓN DE ESFUERZOS POR PRESIÓN INTERNA EN LAS PAREDES DEL DOMO.**

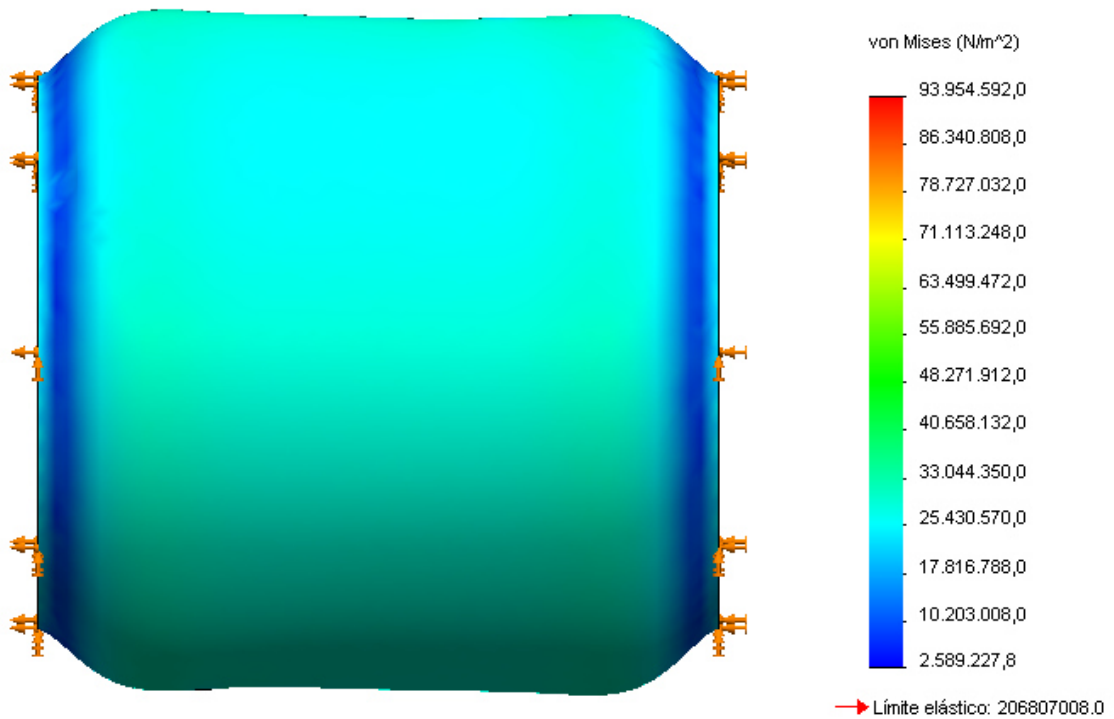
El primer paso para realizar una simulación por elementos finitos en software es realizar el mallado del sólido. Este mallado permite realizar un análisis de cada uno de los componentes de la malla. Entre más fina es la malla más precisos son los resultados pero a su vez se hace más largo el tiempo de cálculo debido al aumento en el número de ecuaciones.

**Figura 40. Mallado del cuerpo del Domo de Condensados**



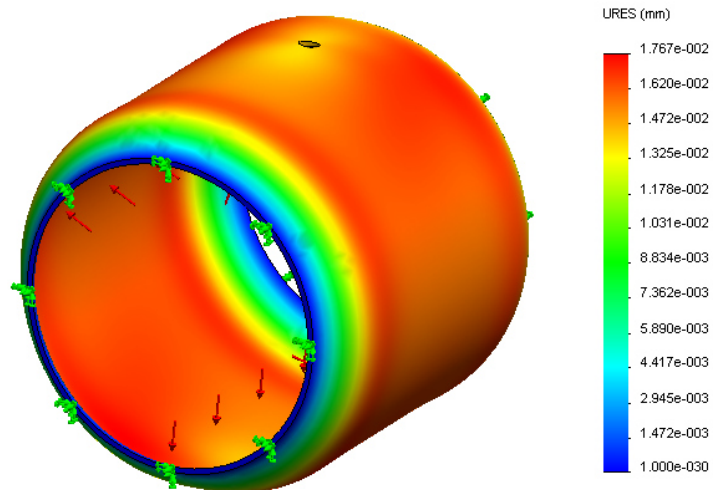
El siguiente paso es definir el material del cuerpo, en este caso acero AISI 304. También se definen los apoyos y los esfuerzos a los que está sometido. En este caso se aplicará una presión de 1,2MPa.

**Figura 41. Tensión de Von Mises en cuerpo del Domo de condensados.**



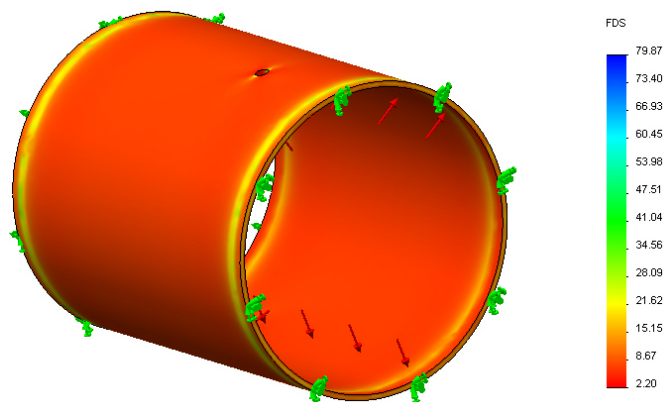
Al realizar la simulación asistida por software de esfuerzos y deformación del domo de condensados se observa que las zonas críticas de tensión bajo el teorema de Von Mises son las zonas donde el domo queda totalmente expuesto sin apoyos; sin embargo, estos valores críticos están muy por debajo del límite elástico del material.

**Figura 42. Desplazamiento estático en cuerpo del Domo de condensados.**



El desplazamiento estático se produce en las superficies del domo sobre su superficie describiendo un desplazamiento máximo de 0,0175mm lo que resultaría insignificante frente a la resistencia en el límite elástico del material antes de pasar a la zona plástica.

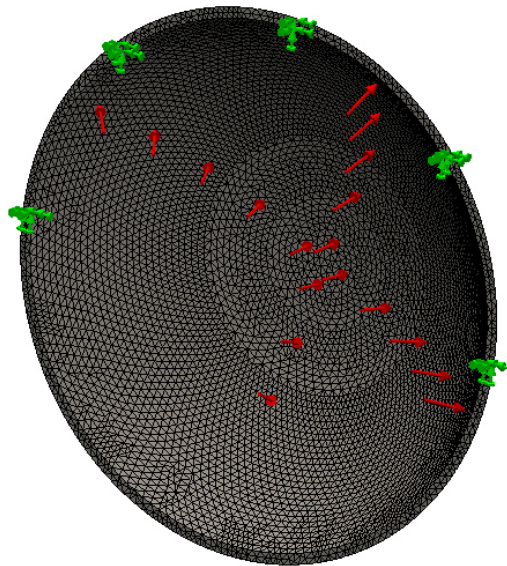
**Figura 43. Distribución del factor de Seguridad.**



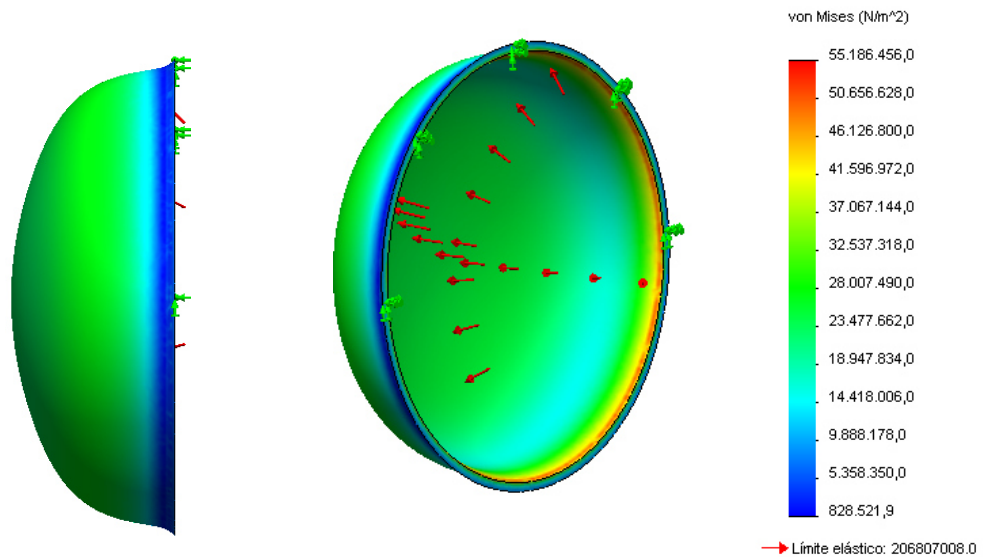
Se concluye que para una presión de 1,2MPa, el cuerpo del domo de condensados tendrá un factor de seguridad de 2,2.

## 7.2. SIMULACIÓN DE ESFUERZOS POR PRESIÓN INTERNA EN LAS TAPAS DEL DOMO

*Figura 44. Mallado de las tapas del Domo.*

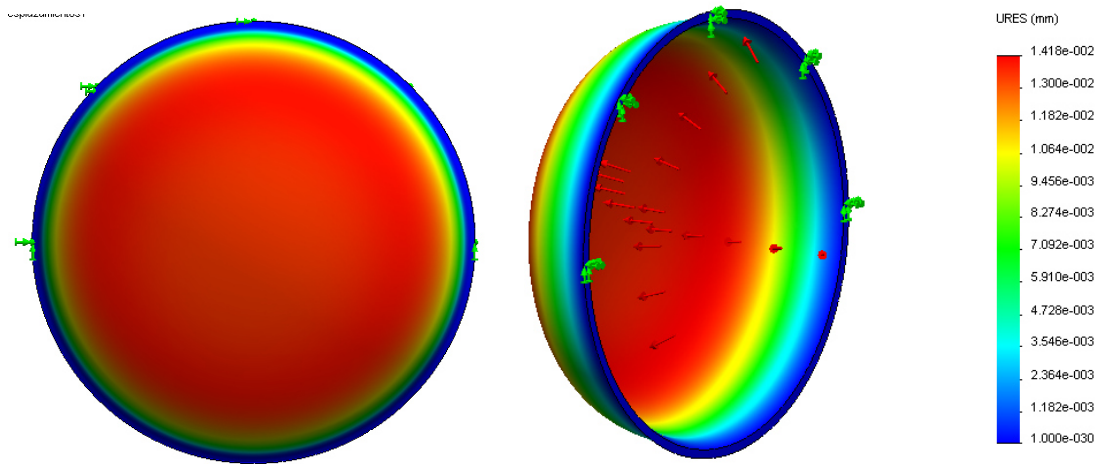


*Figura 45. Tensión de Von Mises en las tapas del Domo de condensados.*



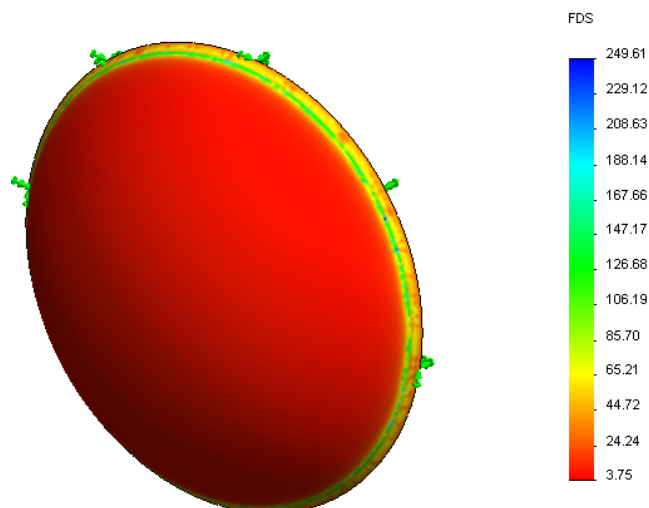


**Figura 46. Desplazamiento estático en las tapas del Domo de condensados.**



Con estas simulaciones podemos determinar que las tapas, a una presión de 1,2MPa, presenta un esfuerzo máximo de 55MPa siendo 206 MPa el límite máximo. También determinamos que el desplazamiento máximo es de 0,0141mm lo que es insignificante y no presenta deformación plástica en el sólido.

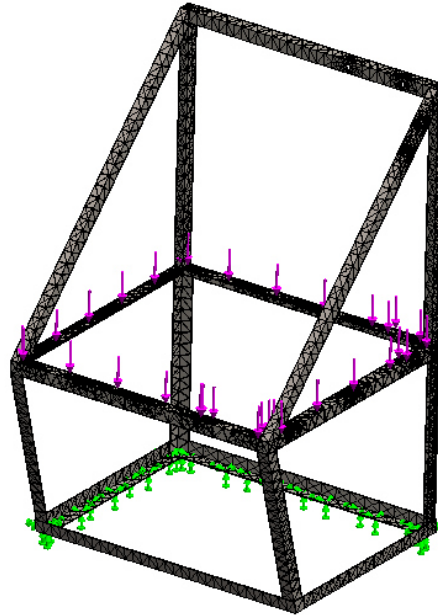
**Figura 47. Distribución del factor de Seguridad de las tapas del Domo.**



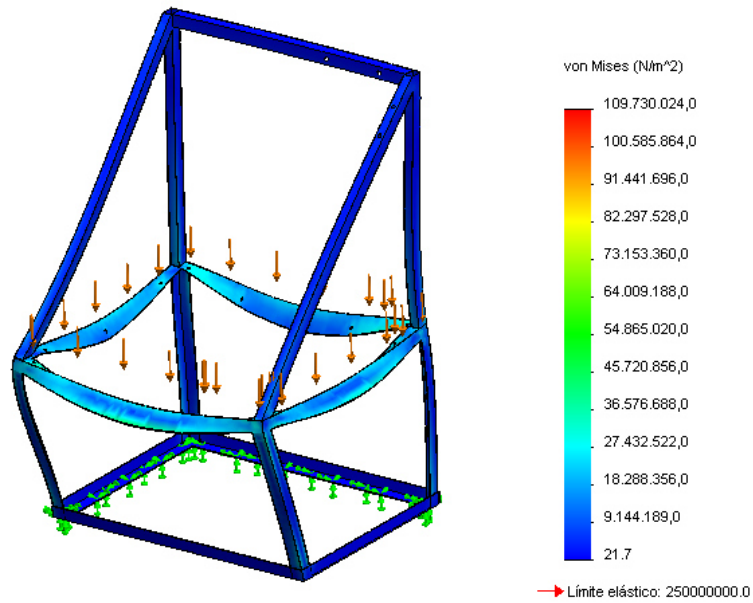
Se concluye que para una presión de 1,2MPa, las tapas del domo de condensados tendrá un factor de seguridad de 3,75.

### 7.3. SIMULACION DE ESFUERZOS EN LA BASE DEL GENERADOR

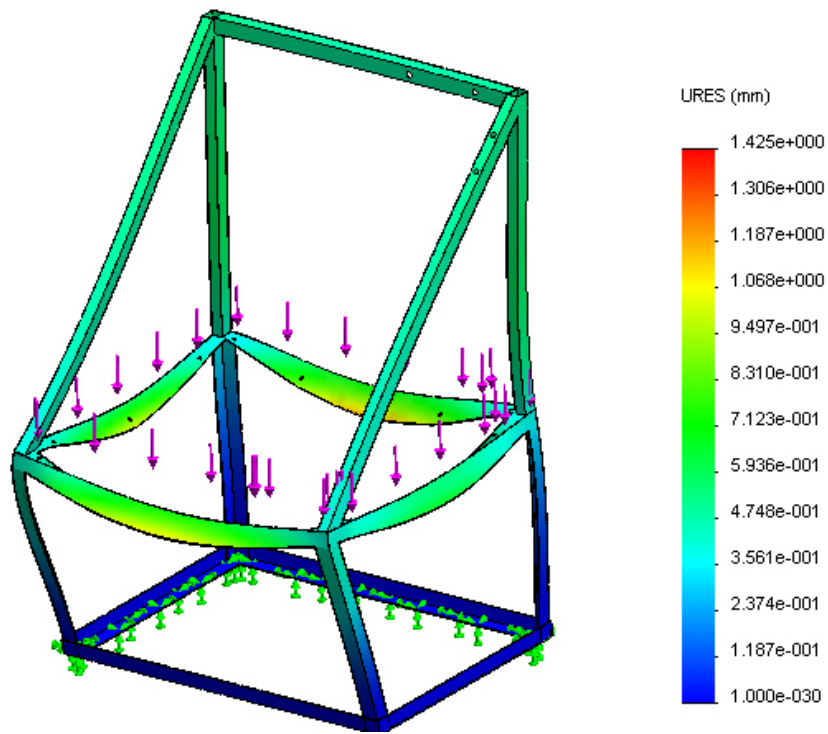
*Figura 48. Mallado de la estructura de la base del generador de vapor.*



*Figura 49. Tensión de Von Mises en la estructura de la base.*

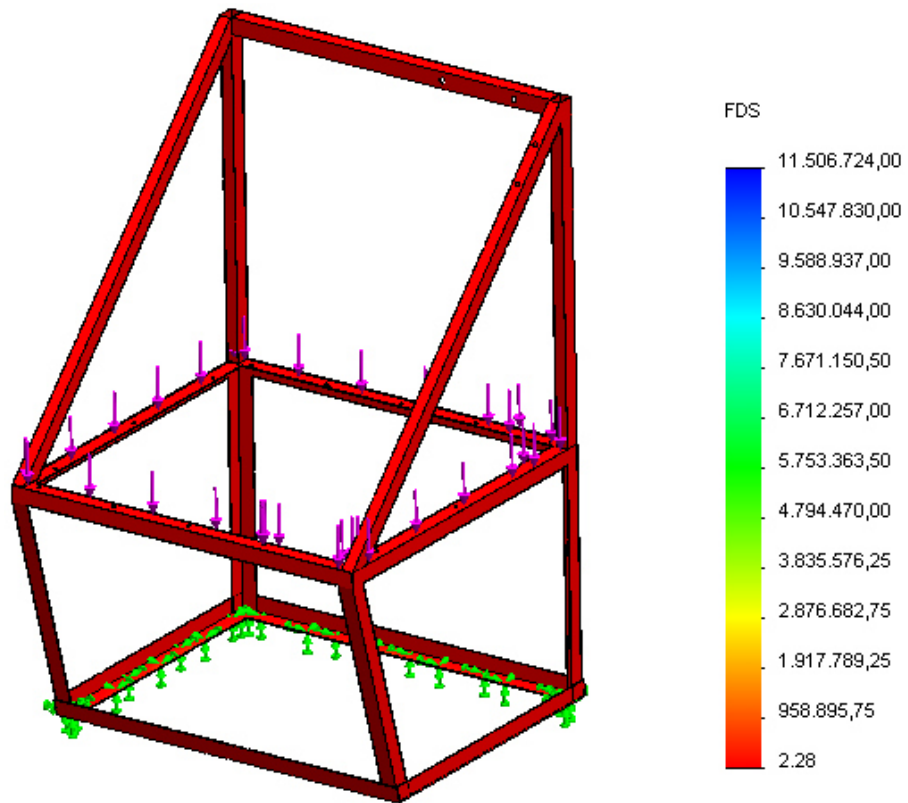


*1. Figura 50. Desplazamiento estático en la estructura de la base.*



Podemos determinar del estudio que el esfuerzo máximo, suponiendo un peso máximo del generador de 200 Kg, es de 109 MPa y el desplazamiento máximo es de 1,4mm. Esto indica que la estructura base es capaz de resistir más del doble del peso supuesto del prototipo y el desplazamiento al que está sometido es insignificante.

**Figura 51. Distribución del factor de Seguridad de la estructura de la base del generador.**



Se concluye que para un peso de 200kg, la estructura de la base del generador tendrá un factor de seguridad de 2,28.

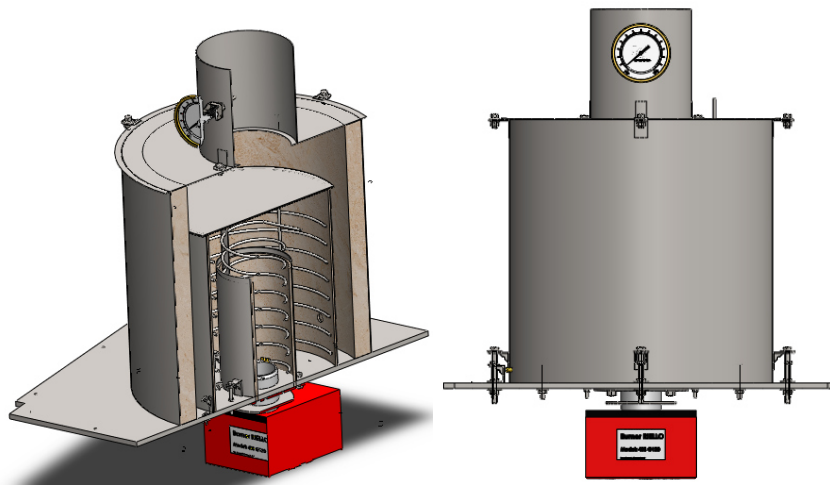
## **8. ENSAMBLAJE**

### **8.1. ENSAMBLAJE DEL SISTEMA GENERADOR DE VAPOR**

Para el sistema Generador de vapor el ensamblaje es el siguiente. Primero se toma la placa base como punto de referencia y en ella se perna el quemador de tal forma que la boca del exosto se sitúe en forma vertical ascendente. Se toma el serpentín

primario debidamente colocado en las guías y se fijan las guías fabricadas en ángulos a la placa base. Luego se coloca el recipiente primario y se fija con pernos a la placa base. Este recipiente primario se le aplica un recubrimiento con el lodo refractario y se deja secar. Seguido se fija a la placa base el serpentín secundario y se conecta al serpentín primario y a la línea de entrada. Se coloca el recipiente secundario con su respectivo recubrimiento interno de mezcla refractaria y se fija con pernos a la placa base. Se fija la tapa del recipiente secundario al recipiente secundario y se aplica de igual forma recubrimiento refractario. Después se coloca el recipiente principal con una capa más gruesa de mezcla refractaria. Se fija la tapa al recipiente principal y a esta se fija la chimenea. Por último se coloca en la chimenea el termómetro.

**Figura 52. Ensamble sistema generador con corte.**

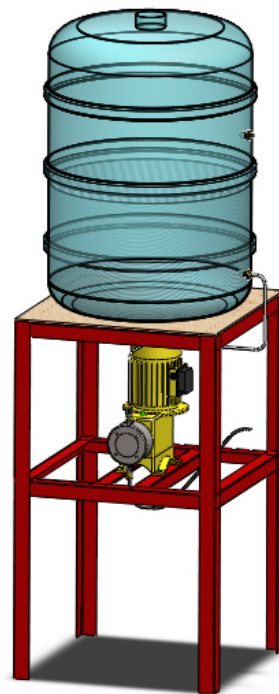


## 8.2. ENSAMBLAJE DE LA LINEA DE ENTRADA

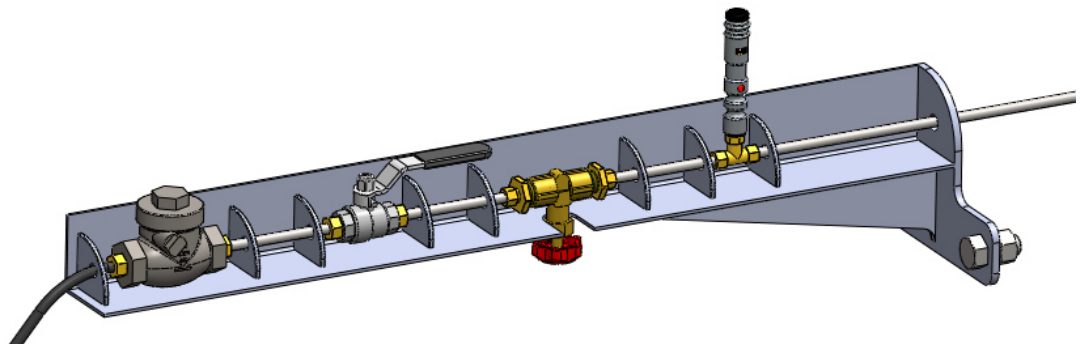
Para la línea de entrada se toma al tanque contenedor de fluido y se le conectan un par de niples para las líneas de entrada de condensados y salida de agua. Se fija el tanque en la parte superior de la mesa de tanque y se fija la bomba en la superficie inferior de la mesa. De la bomba alimentadora sale una manguera que se conecta a la línea de entrada de fluido. Esta línea está formada, en orden de sentido de flujo del

agua, por una válvula tipo check, una válvula tipo globo, una válvula de aguja y un sensor de presión. Estos componentes están debidamente montados y sujetos a la estructura de soporte la cual está fijada por pernos a la base del generador. Al final se conecta por medio de tubing al sensor de presión con el punto de entrada de fluido del generador que va hasta los serpentines.

**Figura 53. Ensamble de tanque contenedor y bomba en mesa soporte.**



**Figura 54. Ensamble línea de entrada en soporte.**

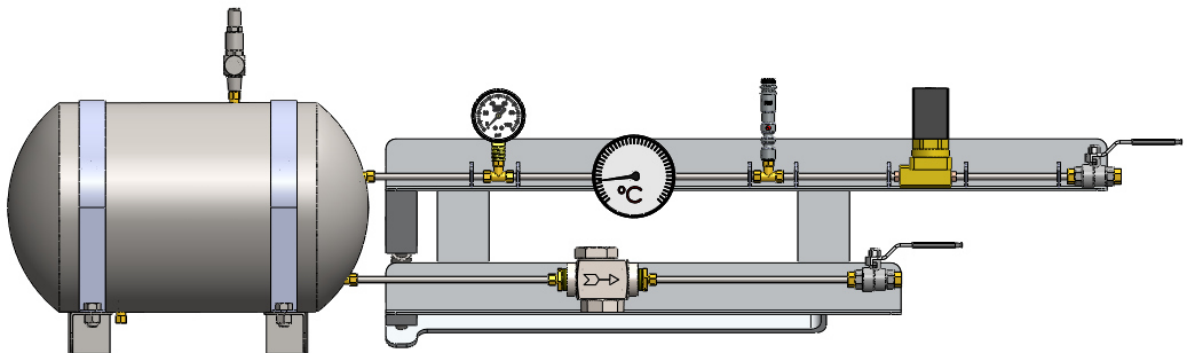


### 8.3. ENSAMBLAJE DE LA LÍNEA DE SALIDA

Para la línea de salida, al domo de condensados se le conecta en la parte superior la válvula de seguridad de alivio de presión ajustada a 1,2 MPa. El domo de condensados se ajusta a la estructura soporte y se fija con las vinchas uniéndolas con pernos de 1/2" a los ángulos de acero. En la parte inferior del domo se conecta el tubing que viene desde el serpentín primario. En la conexión superior de la tapa del domo se conecta la línea de salida de vapor la cual comprende primero un manómetro que se conecta por medio de tubing al termómetro de flujo, luego el sensor de presión, la válvula solenoide y por último la válvula de globo.

Todos estos componentes debidamente fijados a la estructura que soporta las líneas de salida. Esta estructura está fijada con pernos a la base del generador. En la conexión inferior de la tapa del domo se conecta por tubing la línea de salida de condensados. Esta línea está formada por una válvula tipo check y una válvula de globo debidamente ajustadas a la estructura de soporte.

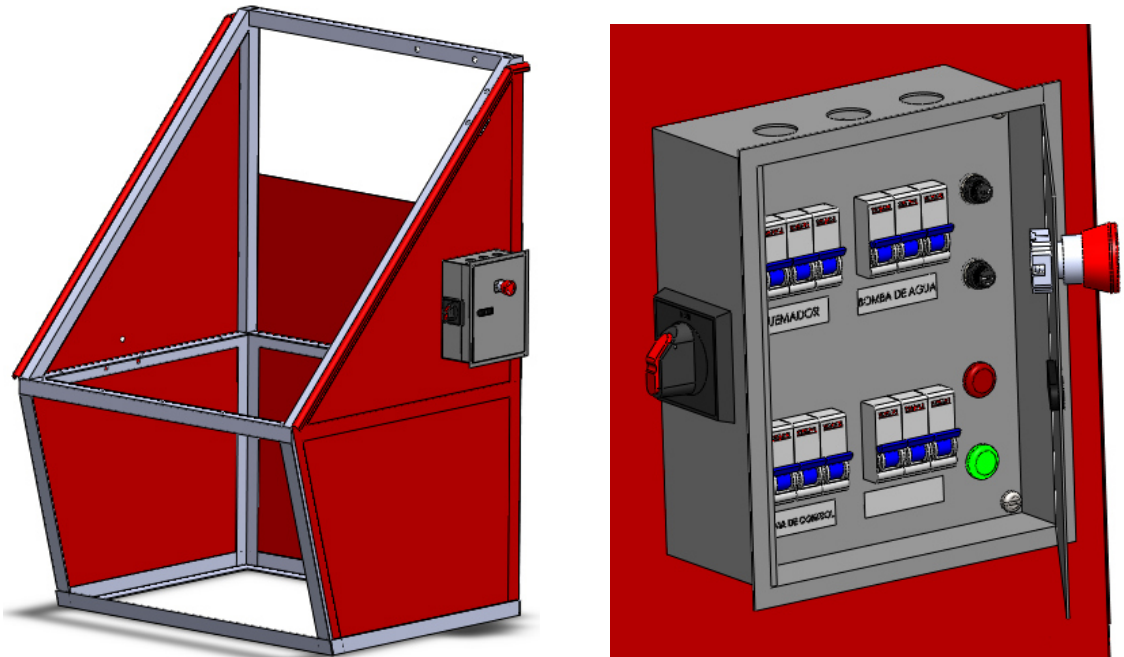
**Figura 55. Ensamble línea de salida**



#### 8.4. ENSAMBLAJE DE LA BASE DEL GENERADOR Y SISTEMAS ELÉCTRICO Y DE CONTROL

El ensamblaje de la base del generador consta en unir el chasis con la carcasa de la base. Esto se realiza por medio de tornillos avellanados. El sistema eléctrico consta de una caja de brakers que energizan la válvula solenoide, la bomba de agua y el quemador. Esta caja de brakers se coloca al costado derecho de la base del generador. El sistema de control consta de displays donde se observa datos arrojados por los sensores de presión y temperatura.

*Figura 56. Ensamble base del generador y sistema eléctrico.*

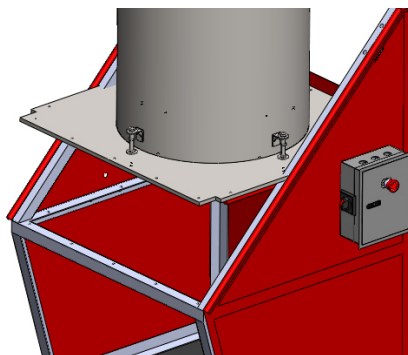




## 8.5. ENSAMBLE TOTAL DE SISTEMAS

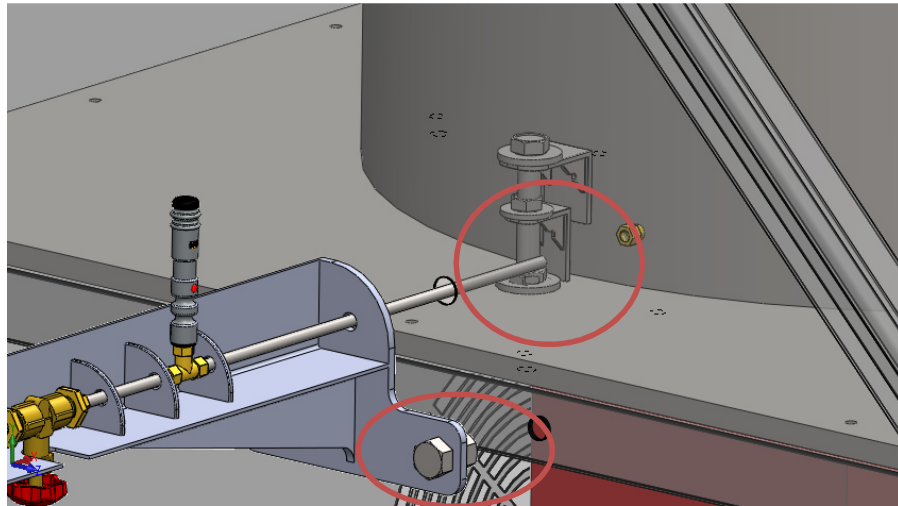
Los sistemas en conjunto debidamente ensamblados permiten la total funcionalidad del equipo completo. Lo primero es ensamblar la base del generador a la placa que sirve como base de la caldera. Esto se hace mediante pernos de  $\frac{1}{2}$ ".

***Figura 57. Unión base del generador con base de la caldera.***



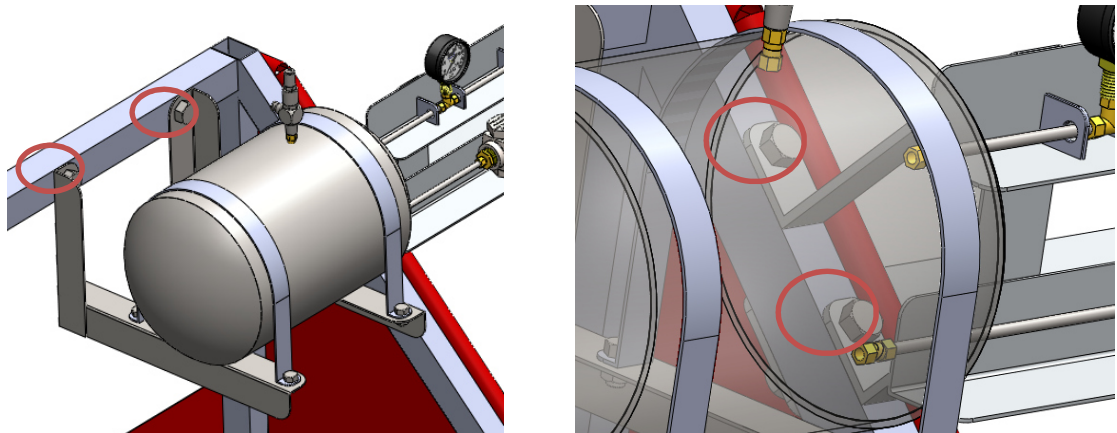
Luego se ensambla la línea de entrada a la caldera. Esto se hace mediante el acople ubicado al costado izquierdo de la caldera donde se conecta el tubing que viene del sensor de presión de la línea de entrada. Este tubing pasa por un agujero que se hizo al costado izquierdo del mueble justo en frente del acople de la caldera. La línea de entrada también se acopla mediante la estructura de soporta fabricada en ángulos de acero a la estructura de la base del generador mediante 2 pernos.

**Figura 58. Acople línea de entrada con la caldera.**



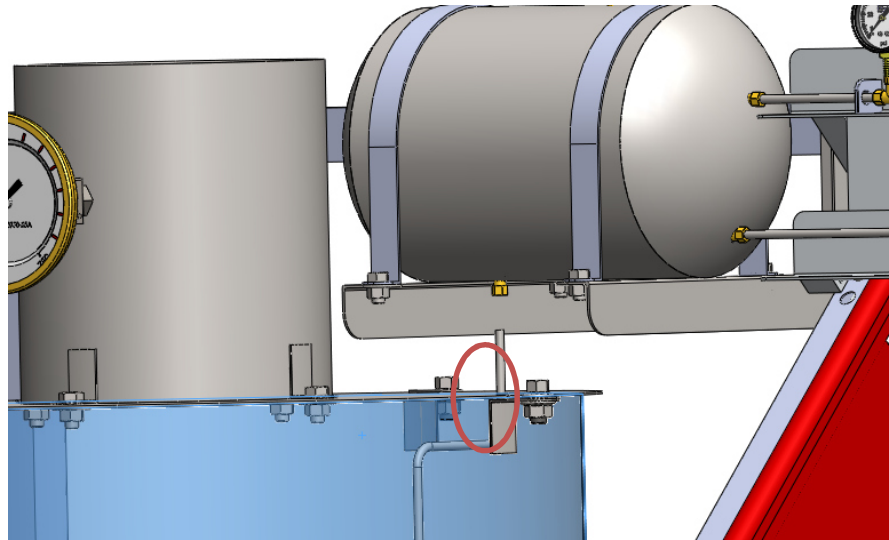
El paso siguiente es acoplar la estructura que soporta al domo generador y la estructura que soporta a las líneas de entrada a la estructura de la base del generador.

**Figura 59. Unión línea de salida - base del generador**



Finalmente se conecta el serpentín primario al domo de condensados mediante unión tipo hembra ubicada en la parte inferior del Domo de condensados.

**Figura 60. Unión Serpentin primario – domo de condensados.**



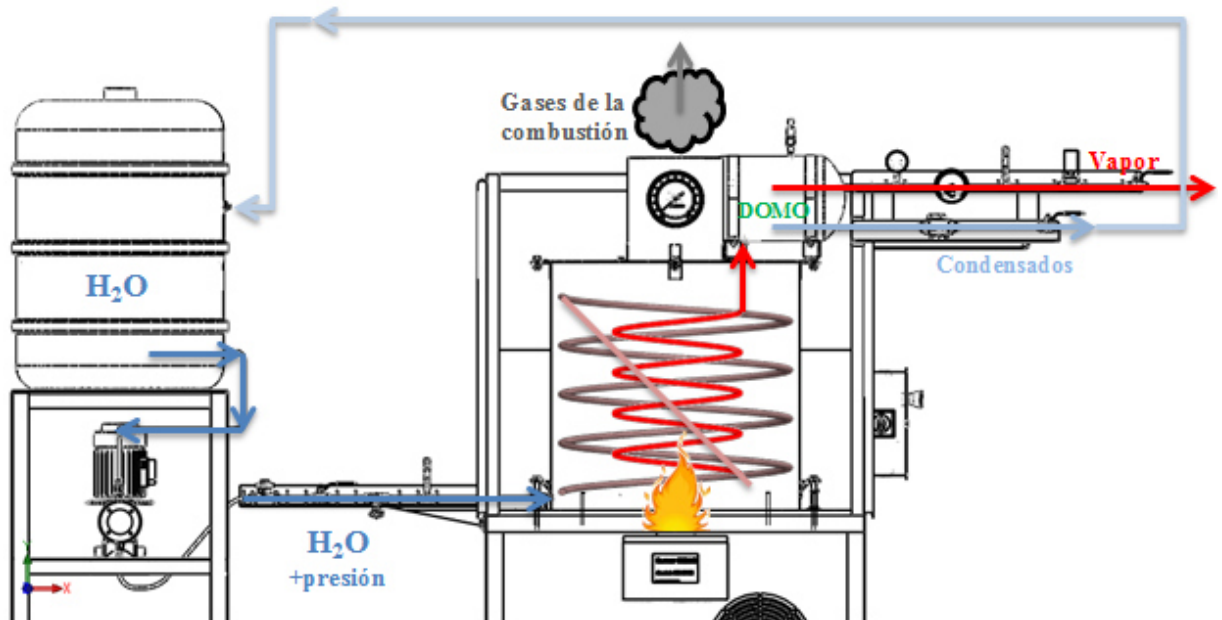
## **9. BREVE DESCRIPCION DEL PROCESO DE TRABAJO**

El proceso de trabajo es el siguiente. Primero se da encendido en la caja de brakers y se energiza el sistema. Se procede a encender la bomba alimentadora de agua, el quemador y la válvula solenoide. Inmediatamente se procede a succionar con la bomba el agua, se abren todas las válvulas de la línea de entrada y pasarla por los serpentines, se enciende el quemador y se deja correr el fluido de trabajo. En los primeros minutos solo se generará condensados que retornaran al tanque contenedor de fluido de trabajo.

Al transcurrir un  $\Delta$  tiempo, se empieza a producir vapor, este se contiene dentro del domo; cuando el sensor de presión detecte una presión de 1MPa y la válvula solenoide una temperatura mayor a los 200°C entonces la electroválvula procede a abrirse. En ese momento se puede abrir la última válvula de bola y permitir la salida de vapor a alta presión.

En todo momento durante el proceso se puede observar en la chimenea, la temperatura de los gases producto de la combustión. En los displays se puede analizar la temperatura y presión del fluido en la línea de entrada y salida.

**Figura 61. Esquema de proceso del generador.**



## 10. CONCLUSIONES

- Al realizar el diseño del prototipo del generador de vapor de presión subcrítica, se determinó que los parámetros más importantes que influyen dentro del prototipo son la funcionalidad, ergonomía y uno de los más importantes en la viabilidad del proyecto el de la economía. Se tuvo en cuenta la influencia de cada uno de los subsistemas entre si y para esto se realizaron algunos cálculos previos de resistencia de materiales Principalmente se evaluó, basado en teorías de diseño de recipientes sometidos a presión interna, el diseño del domo de condensados del generador que es posiblemente el componente más vulnerable debido a las presiones internas a la que está sometido. Los análisis computacionales arrojaron un factor de seguridad mínimo de 2,2 en el cuerpo cilíndrico del domo y 3,75 en las tapas, con un esfuerzo máximo de 93,9 MPa contra una resistencia de 206 MPa.
- La simulación de esfuerzos se realizó con el software Solidworks® y la herramienta Simulation Xpress® por elementos finitos bajo teorías de esfuerzos de Von Mises. Los componentes sometidos a esfuerzos fueron principalmente el domo de condensados sometido a presión interna y la estructura o chasis de la base del generador sometida al peso del equipo completo.
- Las simulaciones demostraron que para el domo de condensados, en las paredes del cilindro se espera un esfuerzo mayor de 93,9 MPa y en las tapas del domo un esfuerzo máximo de 55,2MPa. El acero 304 tiene una resistencia de 206 MPa. Esto revela un FS de 2,2 en el cilindro y 3,7 en las tapas únicamente abombadas lo que indica que la resistencia de

ambos componentes es óptima. En estos mismos componentes el software arroja, para la deformación, un desplazamiento máximo de 0,0176mm en el cilindro y 0,01418mm lo que resultaría insignificante frente a la resistencia en el límite elástico del material antes de pasar a la zona plástica.

- En la base que soporta todo el equipo generador, se simuló el esfuerzo en la estructura chasis debido al peso soportado. El generador ensamblado totalmente y en operación tendrá una masa aproximadamente de 150kg, sin embargo se realizó la simulación con una masa de 200kg para ser conservativos en el diseño. El resultado fue un factor de seguridad de 2,3 lo que indica que el diseño e la estructura es correcto.
- Los planos están diseñados bajo las normas UNE básicas de entrega de planos y acotación. Están fabricados en tamaño de papel normalizado formato A1 con su cajetín perfectamente rotulado. Estos planos se encuentran anexos al trabajo acompañados por un documento que se presenta al taller de manufactura para hacer claridad en la fabricación del trabajo. Es un paquete de planos que contienen planos demostrativos, planos de construcción en detalle y planos de ensamblaje. Cada plano especifica los materiales de construcción, acotaciones con tolerancias, isométricos y vistas proyectadas todas bajo el esquema de identificación ISO-E.

## 11. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

**Tabla 4. Cronograma de actividades**

ACTIVIDAD / TAREA	TIEMPO (MESES)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Consulta Bibliográfica e Investigación Teórica												
Establecimiento de Requerimientos de diseño												
Selección de Materiales y subsistemas												
Diseño del Prototipo												
Cotización de Componentes y Materiales												
Simulación de Esfuerzos												
Elaboración de Planos												
Elaboración del Informe Final												

El cronograma de actividades está subdividido en las tareas asignadas para el cumplimiento de los objetivos específicos desde el inicio del proyecto hasta la entrega del informe final.

## 12. PRESUPUESTO

Por ser simplemente el diseño del prototipo de un equipo, el proyecto no requiere dineros inmediatos para su realización, sin embargo como el diseño del generador conlleva consigo una propuesta de construcción se hace necesario establecer un presupuesto que demuestre la viabilidad de la construcción del prototipo. Este presupuesto será en su mayoría para la compra de los materiales, los procesos de construcción, la compra de subsistemas y el pago de los investigadores. Hasta esta etapa solo puedo justificar el pago de los investigadores, pues incluso las herramientas que son netamente software de diseño se encuentran de manera gratuita en la Universidad.

**Tabla 5. Presupuesto del Proyecto.**

PRESUPUESTO GLOBAL	
RUBROS	FINANCIADOS
Bibliografía	\$ 200.000,00
Consultoría especializada	\$ -
Materiales y equipos	\$ -
Insumos	\$ 400.000,00
Personal científico	\$ 3.000.000,00
Personal de apoyo	\$ 2.000.000,00
Software*	\$ 12.500.000,00
Viáticos	\$ 50.000,00
TOTAL	\$ 18.150.000,00

\*Los rubros destinados al software son para la adquisición de las licencias de los softwares Autodesk Inventor y Solidworks, por si decide realizarse este proyecto en una institución que no cuente con las licencias gratuitas.



## 12.1 Presupuesto de construcción

<b>Sistema de entrada</b>		<b>\$ 780.000,00</b>
tanque contenedor		\$ 50.000,00
bomba de agua		\$ 250.000,00
manguera de media		\$ 30.000,00
tubería de un cuarto		\$ 20.000,00
estructura base		\$ 100.000,00
conectores niples		\$ 30.000,00
valvulas		\$ 120.000,00
presostato		\$ 60.000,00
base para la linea de salida		\$ 120.000,00
<b>Caldera</b>		<b>\$ 6.355.000,00</b>
Base chimenea		\$ 150.000,00
recipiente principal		\$ 300.000,00
serpentín primario		\$ 300.000,00
serpentín secundario		\$ 400.000,00
recipiente primario		\$ 180.000,00
recipiente secundario		\$ 200.000,00
tapa del recipiente secundario		\$ 150.000,00
chimenea		\$ 120.000,00
base del generador		\$ 650.000,00
quemador		\$ 3.150.000,00
recubrimientos aislantes		\$ 200.000,00
Tubing de uniones		\$ 85.000,00
uniones de tubing		\$ 100.000,00
ángulos de acero (orejas para uniones)		\$ 200.000,00
pernos		\$ 70.000,00
termómetro análogo		\$ 100.000,00
<b>Sistema de salida</b>		<b>\$ 1.120.000,00</b>
domo de condensados		\$ 400.000,00
válvulas		\$ 350.000,00
ángulos niples		\$ 100.000,00
manómetro de diafragma		\$ 60.000,00
termómetro análogo		\$ 60.000,00
sensor digital de presión		\$ 120.000,00
manguera de media		\$ 30.000,00
<b>Estructura base</b>		<b>\$ 1.180.000,00</b>
estructura en tubo cuadrado		\$ 380.000,00
lámina chapa metálica		\$ 600.000,00
sistema eléctrico		\$ 200.000,00
<b>Mano de obra</b>		<b>\$ 6.750.000,00</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 16.185.000,00</b>

## BIBLIOGRAFÍA

- 2007 AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler & Pressure Vessel Code. II Part D, Properties (Customary) Materials. N.Y., USA. 2009.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Código A.S.M.E. Sección VIII División 1. Edición 1995, más adendas.
- BABCOCK & WILCOX CO., *Steam. Its generation and use*, 40<sup>th</sup> ed., 1992
- D'IAELLO, Roberto. Mecánica Aplicada a Recipientes a Presión. Disponible en: <http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/mecaplic/teorico/RecipientesAPresion.pdf>. 5 p.
- GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, Procesos y Sistemas. 4ta Edición. U.S.A. 2010. 1014 p.
- L.A. MOLINA y J.M ALONSO: *Calderas de Vapor en la Industria.*, Ed. Cadem-Eve, Bilbao, 1996.
- LEÓN ESTRADA, Juan Manuel. Diseño y Cálculo de Recipientes Sujetos a Presión. Ingeniería León, México, D.F. 2001. 175 p.
- LLORENS, M.: *Calefacción*, Grupo Editorial CEAC, Barcelona, 1994.
- MILES, DEGLER J. La producción de energía mediante vapor de agua. Primera Edición. 1978. Editorial Reverté. México.
- MOLINA, L. A. y MOLINA, G.: *Manual de Eficiencia Energética Térmica en la Industria*, CADEM, Bilbao, 1993.
- PARKER. Parker O-Ring Handbook. ORD 5700. Lexington, KY. USA. 292 p.

RITE: *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*, R.D 1751/1998 y 1218/2002, BOE, 1998 y 2002.

RODRIGUEZ MINTES, Julián, CASTRO MARTINEZ, Lucas y DEL REAL ROMERO, Juan Carlos. *Procesos Industriales para materiales metálicos*, 2<sup>da</sup> edición, Editorial Visión Net. Madrid, España. 2006. 294 p.

SELMEC. *Manual de generadores de vapor*. Equipos Industriales S.A. de C.V.


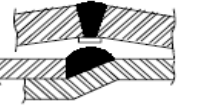




VAZQUEZ ORTEGA, Alfonso. *Generadores de Vapor*. Primera Edición. 1975.

W.H. Severns. *La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases*. Reverté S.A.

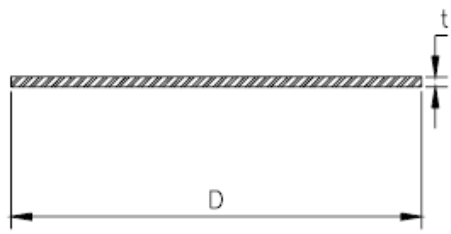
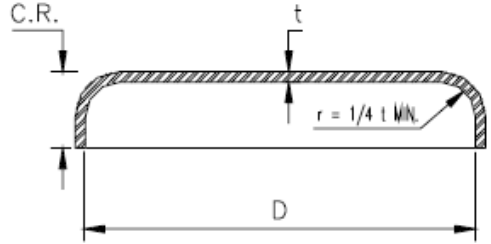
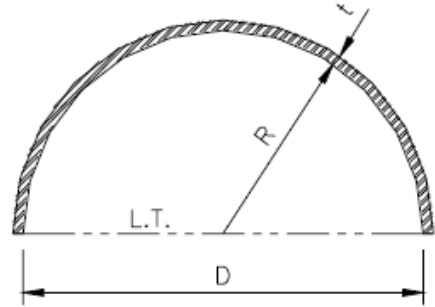
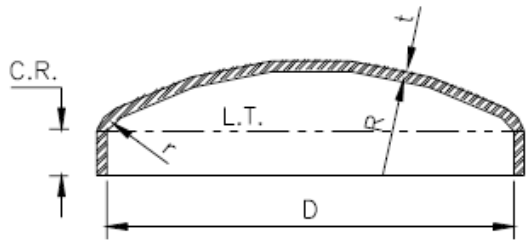
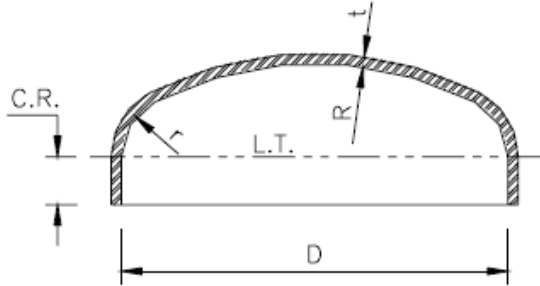
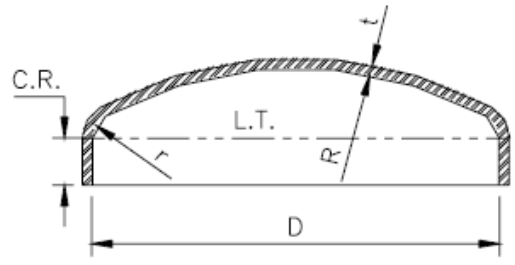
### 13.ANEXOS

**NOTA:** Todos los anexos aquí incluidos provienen del libro “*Diseño y Cálculo de Recipientes Sujetos a Presión*” de la autoría del Ingeniero Juan Manuel León Estrada.

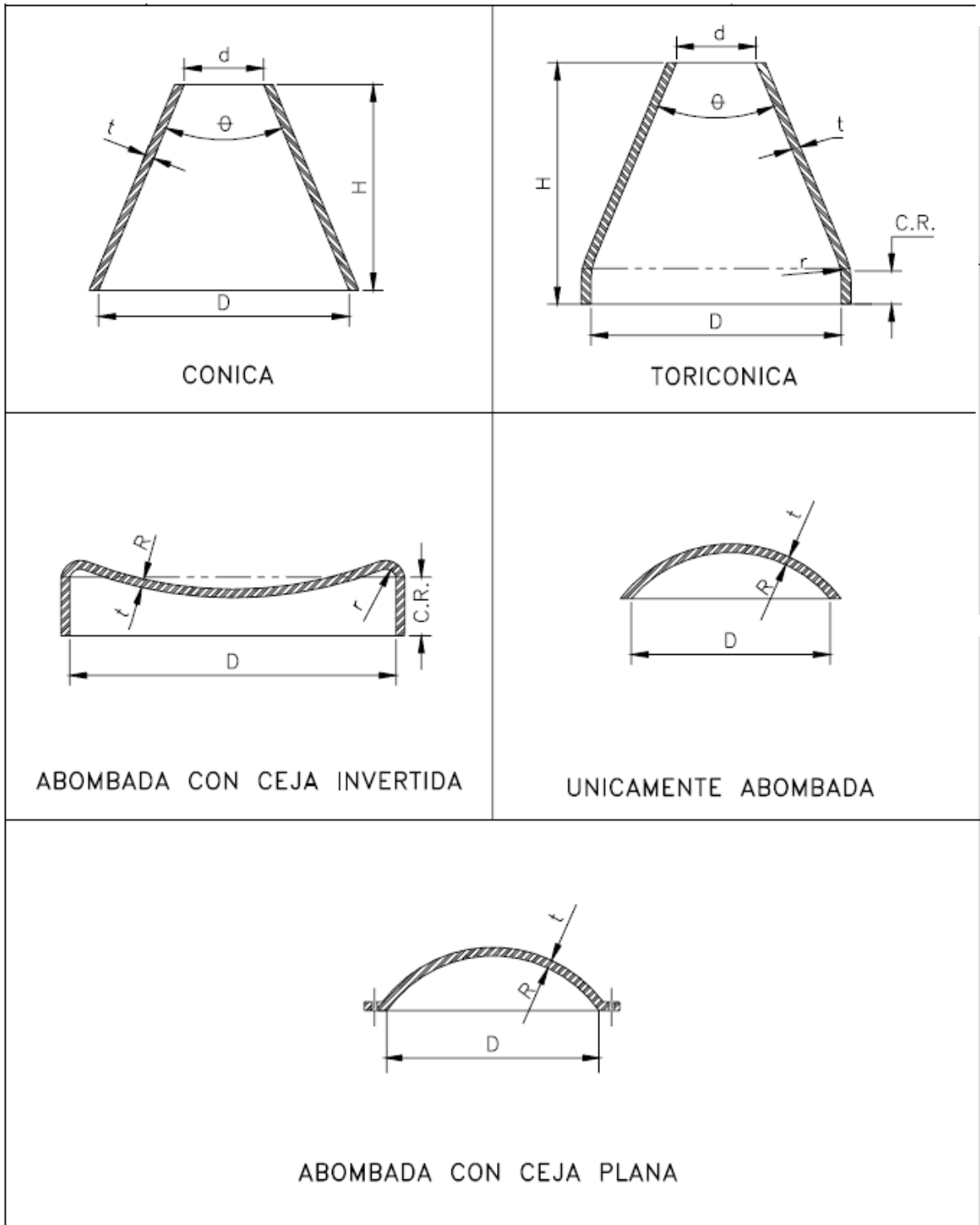
#### Anexo A. Eficiencia de las Soldaduras

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

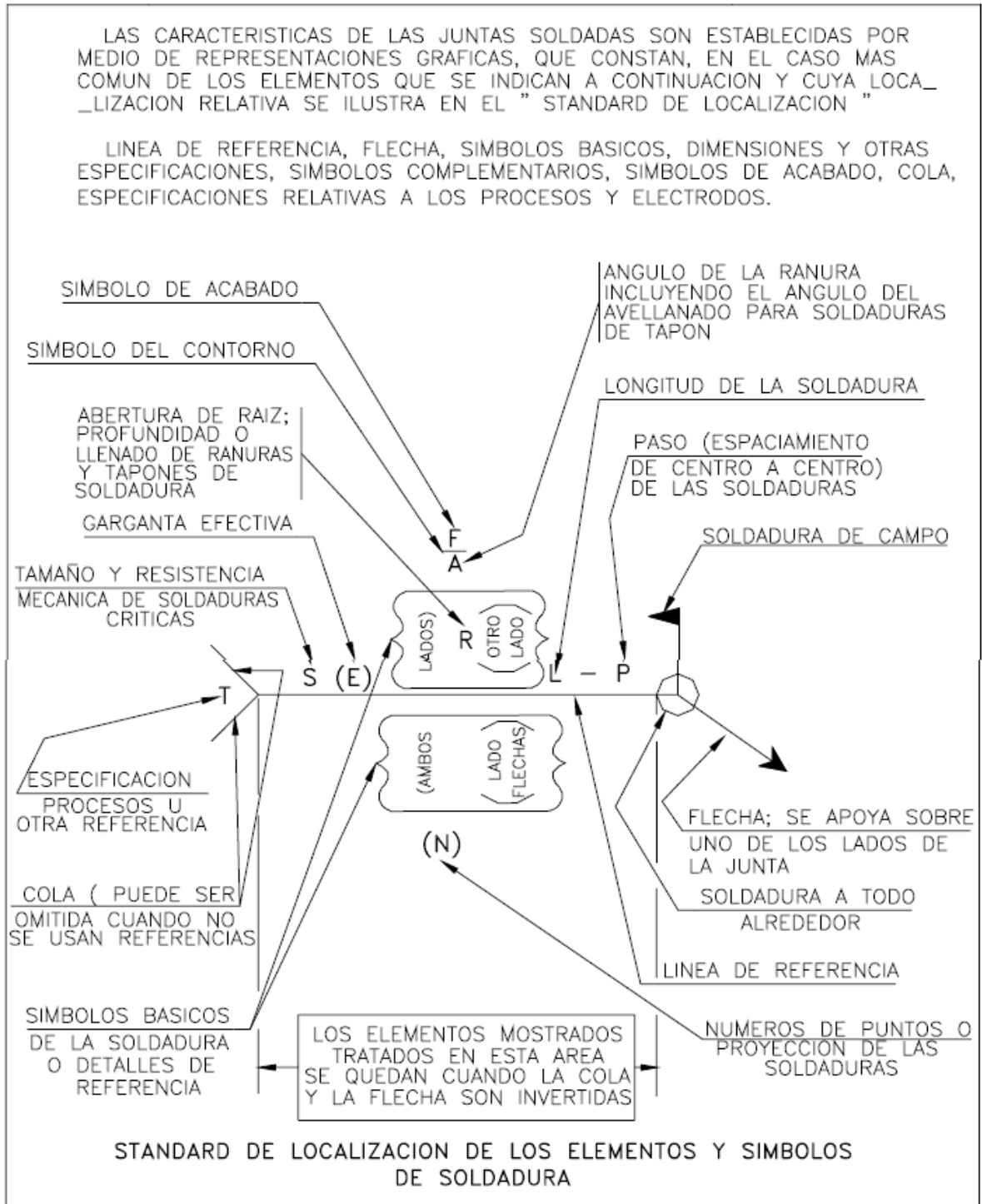
## Anexo B. Tipos de Tapas Para Recipientes Sometidos a Presión

 <p style="text-align: center;">PLANA</p>	 <p style="text-align: center;">PLANA CON CEJA</p>
 <p style="text-align: center;">SEMIESFERICA</p>	 <p style="text-align: center;">80 : 10</p>
 <p style="text-align: center;">SEMIELIPTICA</p>	 <p style="text-align: center;">TORIESFERICA</p>

Anexo B. Tipos de Tapas Para Recipientes Sometidos a Presión página 2.



## Anexo C. Símbolos Básicos Para La Representación Gráfica De Soldaduras



## Anexo C. Símbolos Básicos Para La Representación Gráfica De Soldaduras Pagina2.

LA LINEA DE REFERENCIA, QUE PREFERENTEMENTE SE TRAZARA PARALELA A LOS CANTOS DEL PAPEL Y ES LA CONSTRUCCION QUE SIRVE DE BASE PARA EL ORDENAMIENTO DE LOS SIMBOLOS Y ESPECIFICACIONES.

LA " FLECHA " SE COLOCA EN LA PROLONGACION DE UNO DE LOS EXTREMOS DE LA LINEA DE REFERENCIA, Y SIRVE PARA SEÑALAR LA JUNTA POR SOLDAR, LA PUNTA DE LA FLECHA RESPECTIVA SE APOYARA, AL EFECTO, PRECISAMENTE SOBRE UNO DE LOS LADOS DE LA JUNTA POR LO QUE DE UNA MANERA GENERAL, EN TODA CONEXION SOLDADA SE ESTABLECERA UN LADO MARCADO POR LA FLECHA Y UN LADO CONTRARIO A LA FLECHA.

LOS SIMBOLOS BASICOS DEFINEN EN DETALLE, LAS CARACTERISTICAS DE LA CONEXION, EL TIPO DE SOLDADURA Y LAS RANURAS O CAJAS QUE DEBAN HACERSE A LOS MIEMBROS DE LA JUNTA, MISMOS QUE SE INDICAN A CONTINUACION.

TIPO DE SOLDADURA	LADO FLECHA	LADO OPUESTO	AMBOS LADOS	SIGNIFICADO CUANDO NO ESTA DEFINIDO EL LADO DE LA DERECHA	
FILETE				SIN USO	
RANURA O TAPON			SIN USO	SIN USO	
PROYECCION POR PUNTOS			SIN USO		
COSTURA			SIN USO		
RANURA	RECTANGULAR O CUADRADA				
	V				SIN USO
	BISEL				SIN USO
	U				SIN USO
	J				SIN USO
	ACAMPANADO EN " V "				SIN USO
	BISEL ACAMPANADO				SIN USO
DE RESPALDO			SIN USO	SIN USO	
DE RECUBRIMIENTO		SIN USO	SIN USO	SIN USO	
UNION	CANTO			SIN USO	SIN USO
	ANGULAR			SIN USO	SIN USO





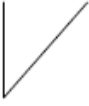


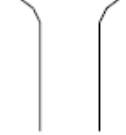




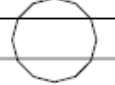
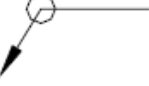
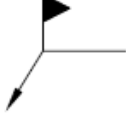








**Anexo C. Símbolos Básicos Para La Representación Gráfica De Soldaduras**  
**Página 3.**

LAS DIMENSIONES ESTABLECIDAS EN CONCORDANCIA CON EL SIMBOLO BASICO, EL ESPESOR DEL CORDON DE SOLDADURA, LA LONGITUD DEL MISMO, EL PASO CUANDO SE TRATA DE FILETES NO CORRIDOS SINO DE SOLDADURA A PUNTOS, LA SEPARACION EN LA RAIZ DE LAS CAJAS O RANURAS, EL ANGULO ABARCADO POR ESTAS Y EL ESPESOR DE UN TAPON. (EN TODOS LOS CASOS LAS ACOTACIONES SERAN EN MM. O EN PULGADAS)

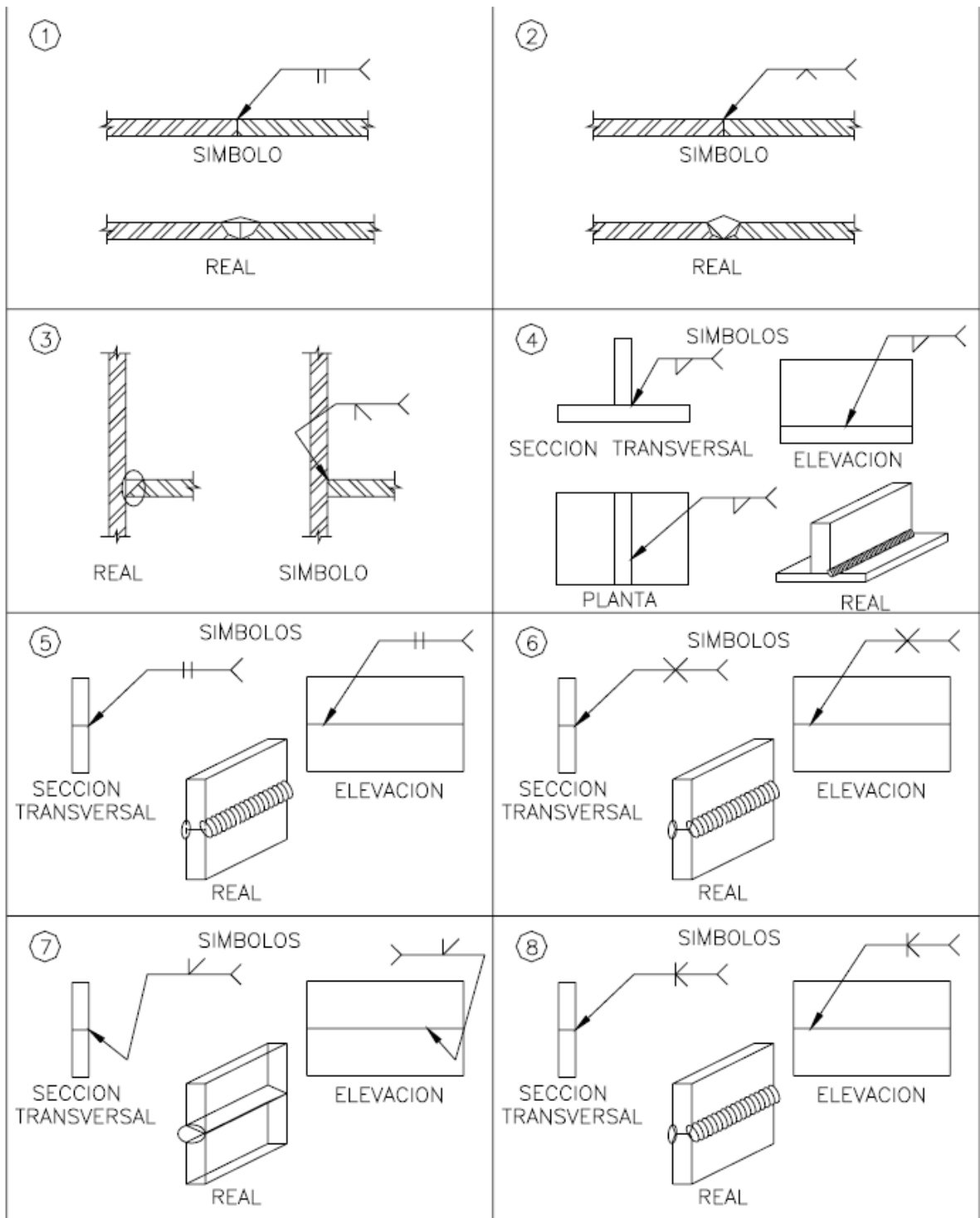
LOS SIMBOLOS COMPLEMENTARIOS QUE SE USAN COMO ADICIONES AL SIMBOLO BASICO SE INDICAN A CONTINUACION:

RESPALDO SEPARADOR	SOLD. A TODO AL REDEDOR	SOLD. DE CAMPO	PENETRACION COMPLETA	CONTORNO (SUPERFICIE)		
				ENRASADA	CONVEXA	CONCAVA
SIMBOLO DE SOLDADURA DE CAMPO				EL SIMBOLO DE SOLDADURA DE CAMPO INDICA QUE LA JUNTA POR SOLDARSE, NO DEBERA SER HECHA EN TALLER O EN EL LUGAR EN QUE SE EJECUTEN LAS FASES INICIALES DE LA FABRICACION.		
SIMBOLO DE SOLDADURA EN TODO AL REDEDOR				EL SIMBOLO DE SOLDADURA TODO AL REDEDOR INDICA QUE LA SOLDADURA SE EXTIENDE COMPLETAMENTE AL REDEDOR DE LA JUNTA.		
EL SIMBOLO DEL CONTORNO CONVEXO INDICA QUE LA CARA DE LA SOLDADURA DEBERA SER ACABADA CON UN CONTORNO CONVEXO				SIMBOLO DE ACABADO (STANDARD DEL USUARIO) INDICAR EL METODO PARA OBTENER EL CONTORNO ESPECIFICADO PERO NO EL GRADO DE ACABADO.		
EL SIMBOLO DEL CONTORNO AL RAS INDICA QUE LA CARA DE LA SOLDADURA DEBERA SER HECHA AL RAS. CUANDO NO ES USADO UN SIMBOLO DE ACABADO, INDICA QUE LA SOLDADURA DEBERA SER EJECUTADA AL RAS SIN ACABADO SUBSIGUIENTE.				SIMBOLO DE ACABADO (STANDARD DEL USUARIO) INDICAR EL METODO PARA OBTENER EL CONTORNO ESPECIFICADO PERO NO EL GRADO DE ACABADO.		
EL SIMBOLO DEL CONTORNO CONCAVO INDICA QUE LA CARA DE LA SOLDADURA DEBERA SER ACABADA CON UN CONTORNO CONCAVO				SIMBOLO DE ACABADO (STANDARD DEL USUARIO) INDICAR EL METODO PARA OBTENER EL CONTORNO ESPECIFICADO PERO NO EL GRADO DE ACABADO.		
SIMBOLO DE PENETRACION COMPLETA				EL SIMBOLO DE PENETRACION COMPLETA NO ES DIMENSIONADO (EXCEPTO LA ALTURA)		
SI NO HAY UNA INDICACION EXPRESA TODAS LAS SOLDADURAS SE ENTENDERAN CONTINUAS						

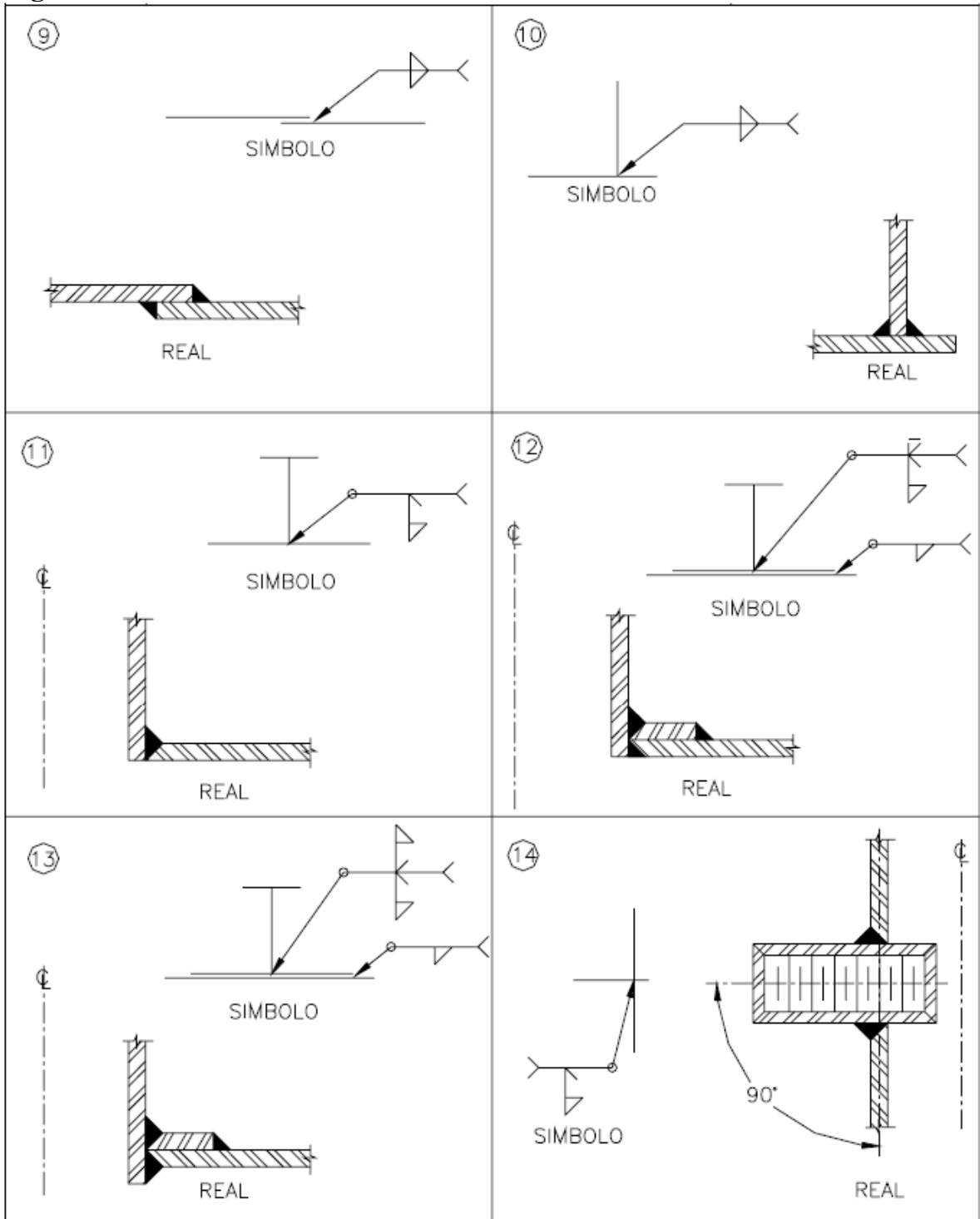
**Anexo C. Símbolos Básicos Para La Representación Gráfica De Soldaduras**  
**Página 3.**

RANURA						
RECTANGULAR	" V "	BISEL	" U "	" J "	ACAMPANADO EN " V "	BISEL ACAMPANADO
						
FILETE	TAPON O RANURA	POR PUNTOS	COSTURA	TODO ALREDEDOR	DE CAMPO	PENETRACION COMPLETA
						
DE RESPALDO	RECUBRIMIENTO	UNION		CONTORNO		
		CANTO	ANGULAR	A RAS	CONVEXO	CONCAVO
						

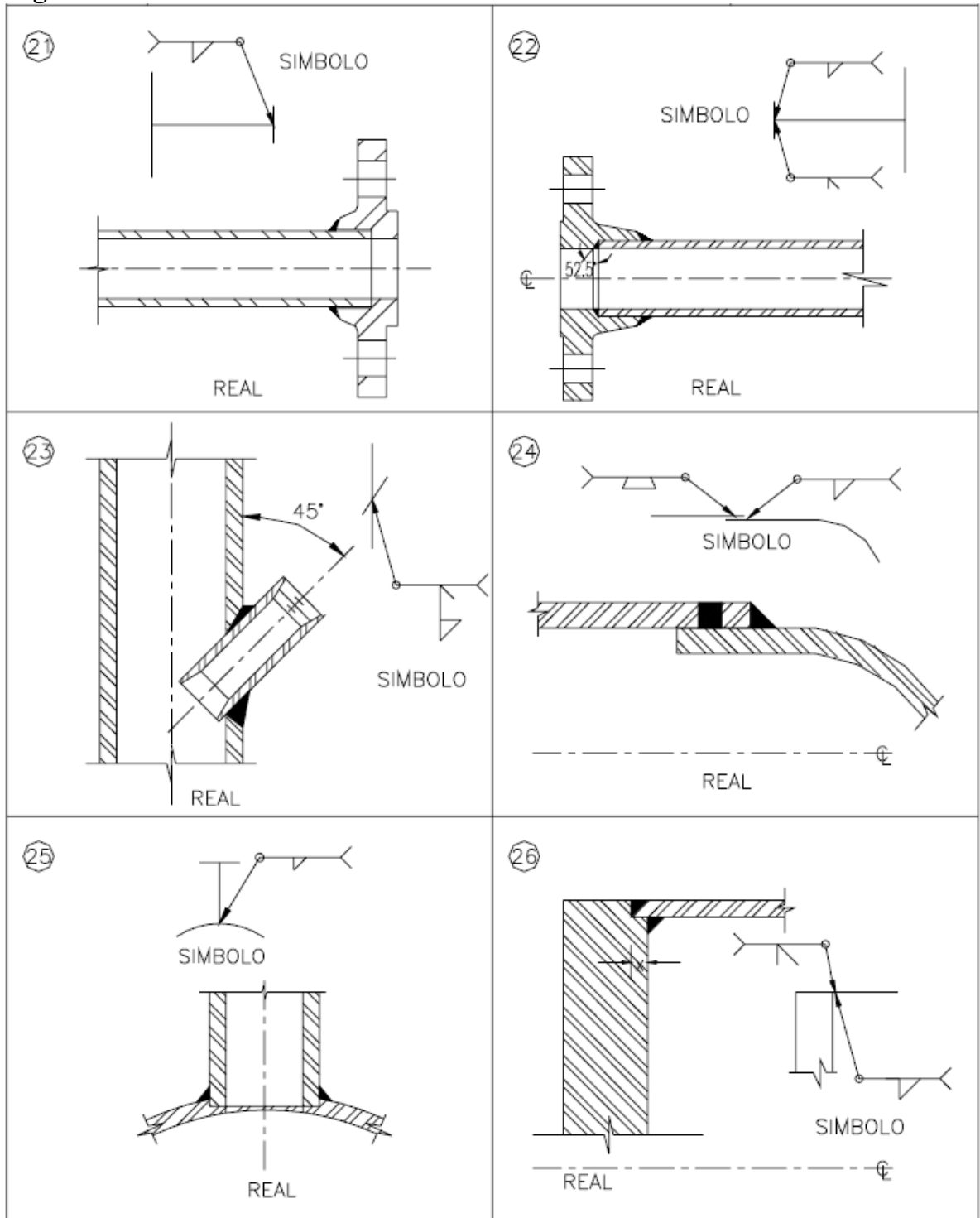
**Anexo C. Símbolos Básicos Para La Representación Gráfica De Soldaduras**  
**Página 4.**



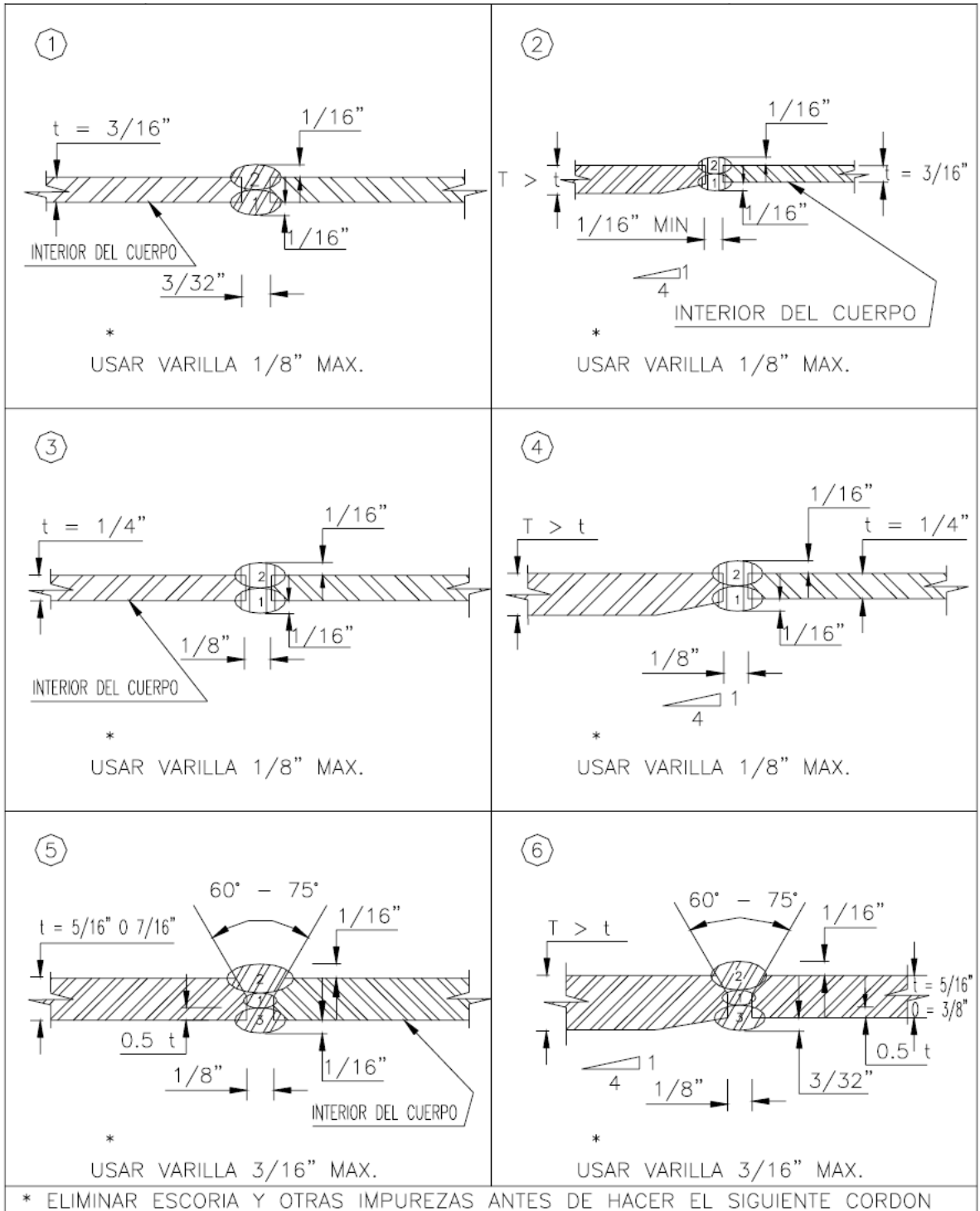
**Anexo C. Símbolos Básicos Para La Representación Gráfica De Soldaduras**  
**Página 5.**



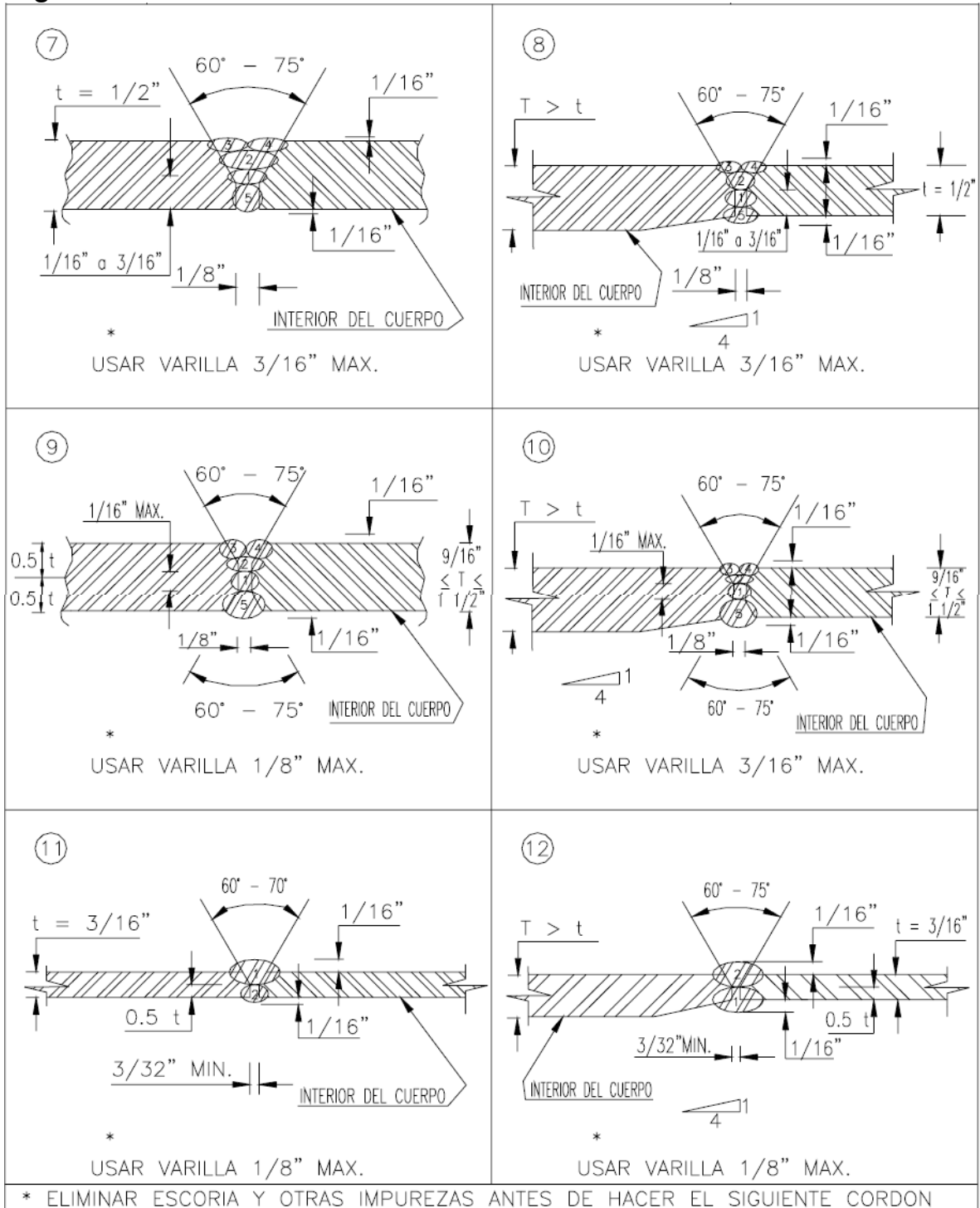
**Anexo C. Símbolos Básicos Para La Representación Gráfica De Soldaduras**  
**Página 6.**



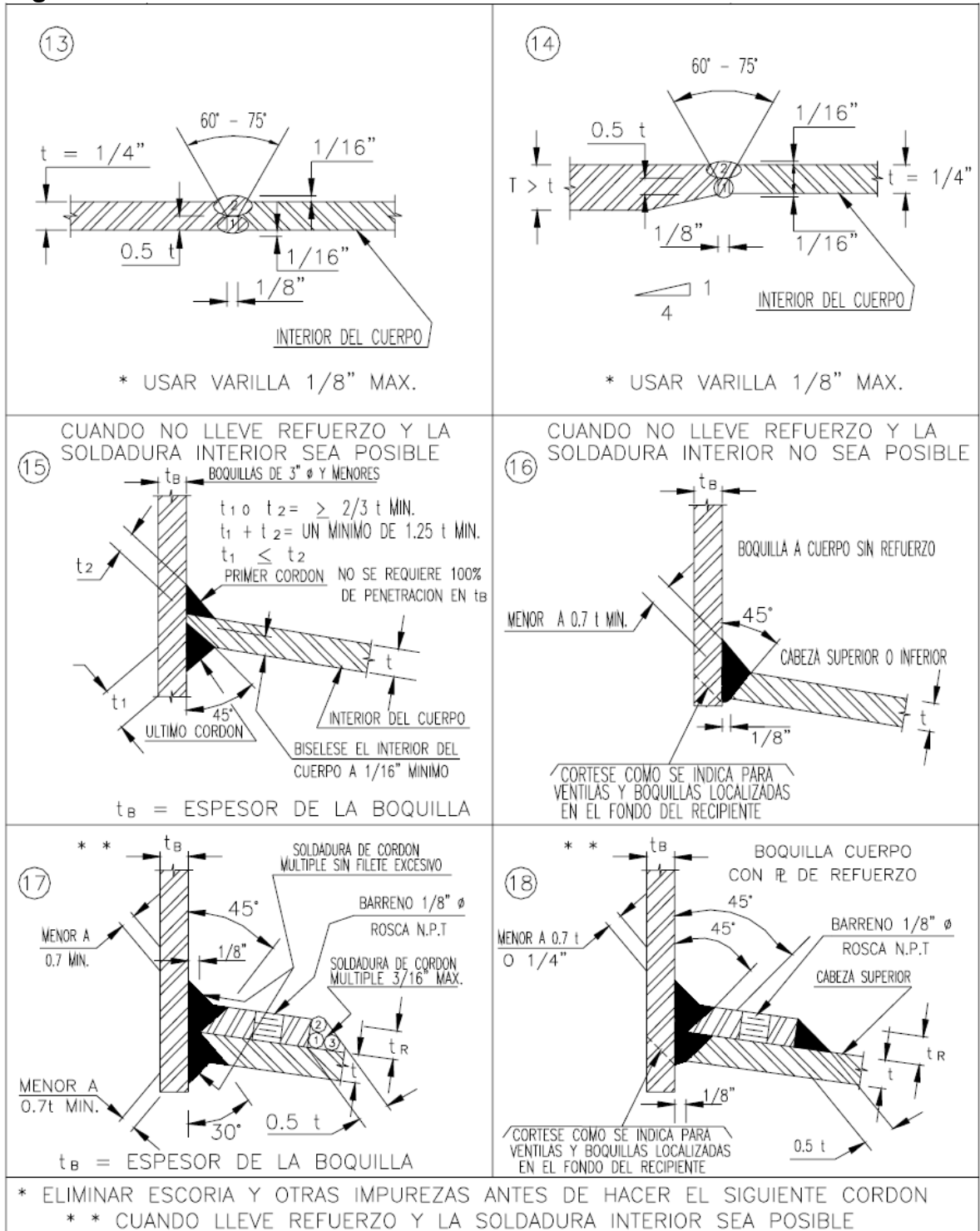
**Anexo D. Procedimientos de Soldaduras para Placas de Acero Inoxidable.**



**Anexo D. Procedimientos de Soldaduras para Placas de Acero Inoxidable.  
Pagina2.**



**Anexo D. Procedimientos de Soldaduras para Placas de Acero Inoxidable.  
Pagina3.**





**Anexo D. Procedimientos de Soldaduras para Placas de Acero Inoxidable.  
Pagina4.**

