

# **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL**

**Facultad Regional La Plata**



**2017**

## **PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA**

**REDISEÑO DEL CUERPO PRINCIPAL DE UNA  
BOMBA DE ALTO VACÍO POR DIFUSION DE ACEITE**

**Alumno responsable:**

**Zovich, Diego**

**Docente Tutor:**

**Dr. Demian Slobinsky**



## **Índice**

- 1. Presentación general**
  - 1.1. Introducción**
  - 1.2. Planteo del problema**
  - 1.3. Objetivo**
- 2. Desarrollo**
  - 2.1. Dimensiones**
  - 2.2. Materiales**
  - 2.3. Transferencia de calor**
  - 2.4. Caldera**
  - 2.5. Resistencia calefactora**
    - 2.5.1. Calculo**
      - 2.5.1.1. Datos**
      - 2.5.1.2. Planteo**
      - 2.5.1.3. Resolución**
      - 2.5.1.4. Conclusiones**
  - 2.6. Verificación del espesor del cilindro**
- 3. Anexo**
  - 3.1. Plano del cuerpo principal**
  - 3.2. Plano de la caldera**
- 4. Bibliografía**



## 1. Presentación general

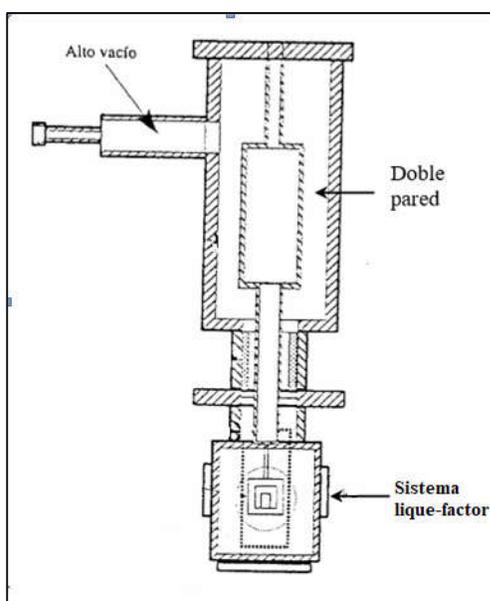
### 1.1. Introducción

En la actualidad, en el laboratorio de criogenia del departamento de mecánica de la UTN FRLP, se encuentran operando un equipo de criogenia compuesto por 3 dispositivos:

○ Crióstato:

Es un dispositivo diseñado para operar a bajas temperaturas, mediante un sistema que se enfría gracias a un gas criogénico generado en sistema auxiliar lique-factor.

El crióstato disponible en el laboratorio contiene un termo aislado del ambiente por una doble pared en la que se hace vacío mediante una bomba de alto vacío por difusión de aceite.



*Diagrama esquemático de corte de criostato*

○ Bomba de vacío por difusión de aceite:

Se encuentra entre el criostato y la bomba de vacío mecánica y consiste en un calentador situado en la parte inferior del dispositivo que calienta el fluido de trabajo (un aceite especial), el cual se vaporiza y se eleva a lo largo de la chimenea para luego ser desviado hacia abajo nuevamente por un conjunto de orificios colocados de tal forma que generan un chorro anular, el cual genera el impulso necesario para orientar las moléculas del gas, que se mueven en forma aleatoria, hacia la salida de la bomba difusora para que ellas sean removidas por la bomba mecánica. El chorro de vapor se condensa en las paredes y regresa a la caldera

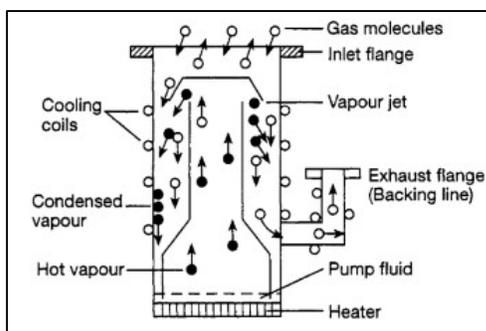


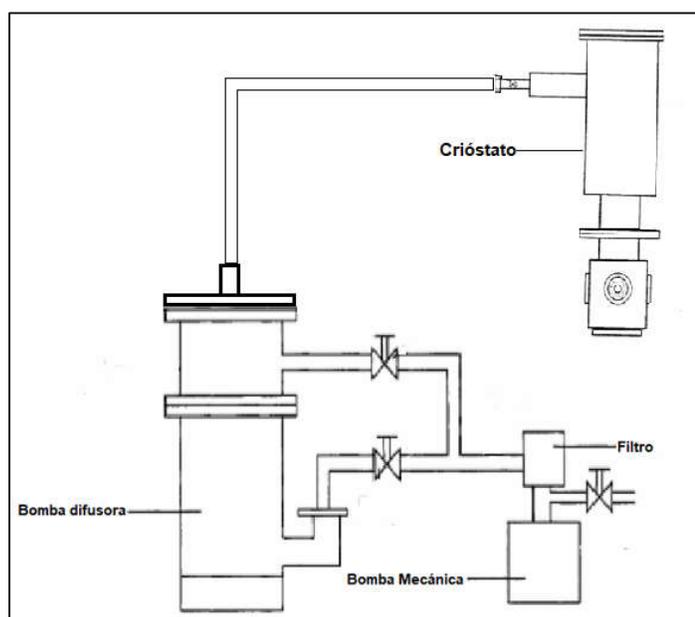
Diagrama esquemático de corte de una bomba difusora-Basic Vacuum Technology

Específicamente se trata de una Bomba difusora de la marca Agilent modelo VHS-4

o Bomba mecánica

Es la encargada de generar un flujo de aire continuo desde el criostato que pase por la bomba difusora, para que la misma pueda realizar su función.

Específicamente es una Bomba de vacío Dosivac modelo DVRII Dvp 2A, de tipo rotativa a paletas en 2 etapas.



Esquema del equipo de criogenia



## 1.2. Planteo del Problema

La bomba de vacío por difusión de aceite Agilent Modelo VHS-4 presenta una fisura en el cuerpo principal, lo que afecta su funcionamiento. Este inconveniente se solucionaría simplemente con el reemplazo de dicha pieza; sin embargo, la misma no se encuentra disponible en el mercado debido a que ya no se fabrica, por lo que el camino para solucionar este problema y que el equipo de criogenia pueda continuar con su funcionamiento es el de fabricar un nuevo cuerpo principal.

## 1.3. Objetivo

Fabricar un cuerpo principal que cumpla con los mismos requisitos básicos del cuerpo principal fisurado:

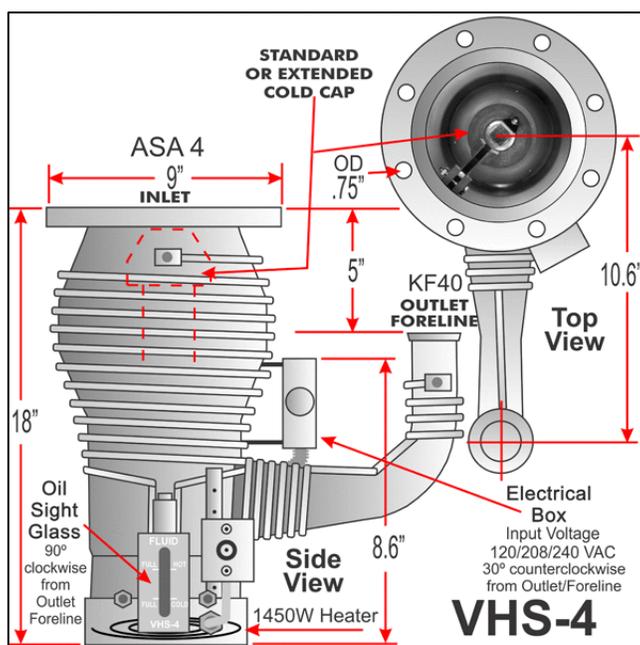
- Dimensiones, teniendo en cuenta los materiales y dimensiones disponibles en el catálogo de productos del Proveedor de acero inoxidable FAMIQ.
- Metalurgia, sabiendo por manual de fabricante que es acero inoxidable ASTM A312 TIPO 304
- Capacidad de transferencia de calor, ya que esta pieza debe mantenerse a una temperatura de 13 a 26 °C para asegurar que cuando el vapor de aceite este en contacto con la cara interna de la pared se condense. Para esta característica la variable a tener en cuenta es el área externa de la pared del cuerpo principal.
- Potencia necesaria de la nueva resistencia para el calentamiento del aceite en la nueva caldera.
- Capacidad de no abollarse debido al vacío generado o lo que es equivalente a presiones externas. Verificando bajo el Código ASME II



## 2. Desarrollo

### 2.1. Dimensiones

Las medidas del cuerpo principal de la bomba de difusión de aceite del fabricante AGILENT modelo VHS-4 se extraen del manual de instrucciones, que el fabricante suministra en su página web, y una imagen con las medidas principales exteriores; a partir de las cuales se comienza a diseñar teniendo en cuenta los materiales y dimensiones disponibles en el mercado nacional, siguiendo los catálogos de la empresa FAMIQ que se dedica a la venta de productos de acero inoxidable de diversas calidades.



	ASA	
	in	mm
Height	18.05	458
Centerline to Centerline	10.62	270
Flange Face to Flange Face	5.03	128
Electrical Box Height	8.63	219
Sight Glass, Degrees from Foreline	90° clockwise	
Electrical Box, Degrees from Foreline	30° counterclockwise	
Inlet Flange, Nominal Size	4" ASA	
Inlet Flange, OD	9.00	229
Inlet Flange, ID	5.91	150
Inlet Flange, Thickness	0.50	13
Inlet Flange, Bolt Circle	7.50	191
Inlet Flange, Number of Holes	8	
Inlet Flange, Hole Size	0.69	18
O-ring Groove ID	6.06	154
O-ring Groove Width	0.18	4
Foreline Flange, Nominal Size	KF40	
OD	2.16	55
ID	1.38	35
Thickness	0.20	5

Debido a lo complejo y costoso que sería fabricar una pieza con ese ensanchamiento y reducción en la parte superior se decidió usar un diseño cilíndrico considerando que:

- Como el diámetro interior debe ser de 150 mm, se seleccionó el inmediato superior en el catálogo de FAMIQ, resultando ser uno de 168,3 mm de diámetro exterior y 3,4 mm de espesor, de manera que el diámetro interior será de 161,5mm. Por lo que hay una variación de 11,5 mm con respecto al diámetro interior original.
- El diámetro del orificio lateral debe ser el mismo que el cuerpo principal fisurado, ya que luego se soldará el mismo codo.

$$D_{\text{orificio}} = 60 \text{ mm}$$

El plano de la misma se encuentra adjunto en el anexo sección 1



## 2.2. Materiales

El cuerpo principal de la bomba, será fabricado en acero inoxidable austenítico ASTM A312 TIPO 304, con las siguientes propiedades:

<b>Propiedades Eléctricas</b>	
Resistividad Eléctrica ( $\mu\text{Ohmcm}$ )	70-72
<b>Propiedades Físicas</b>	
Densidad ( $\text{g cm}^{-3}$ )	7,93
Punto de Fusión ( C )	1400-1455
<b>Propiedades Mecánicas</b>	
Alargamiento ( % )	<60
Dureza Brinell	160-190
Impacto Izod ( $\text{J m}^{-1}$ )	20-136
Módulo de Elasticidad ( $\text{GPa}$ )	190-210
Resistencia a la Tracción ( $\text{MPa}$ )	460-1100
<b>Propiedades Térmicas</b>	
Coefficiente de Expansión Térmica @20-100C ( $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	18,0
Conductividad Térmica a 23C ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	16,3

*Propiedades de ASTM A312 tipo 304*

La especificación ASTM A312 abarca las tuberías de acero inoxidable austenítico sin costuras y acabadas en frío destinadas a servicios de alta temperatura y corrosivos e indica los requerimientos químicos, de templado, tensión y otros requerimientos para diferentes grados de tuberías, incluidas aquellas que cumplen con el American Society of Mechanical Engineers (Código de recipientes a presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ASME)

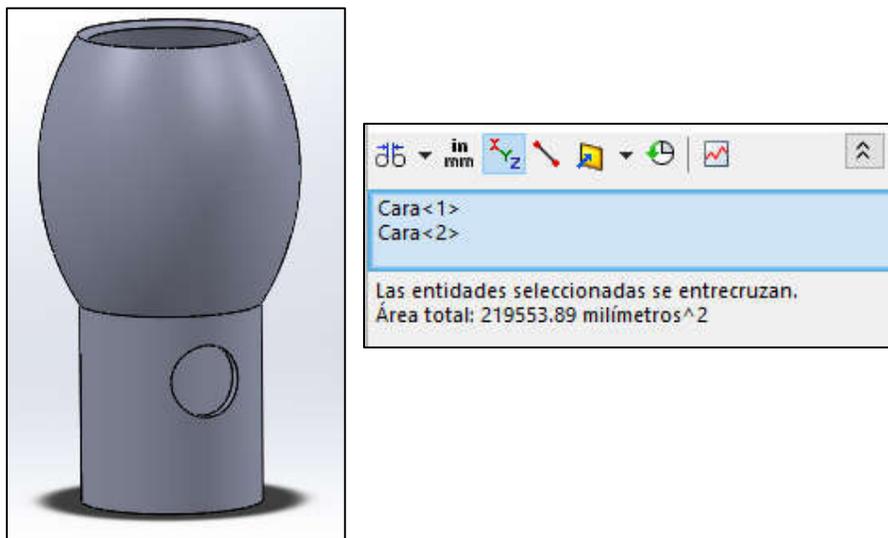
En cuanto a la terminación superficial, ni la pared externa ni la pared interna del cilindro precisan ningún tipo de tratamiento especial, ya que el fabricante asegura una superficie lisa y libre de rebabas.



### 2.3. Transferencia de calor

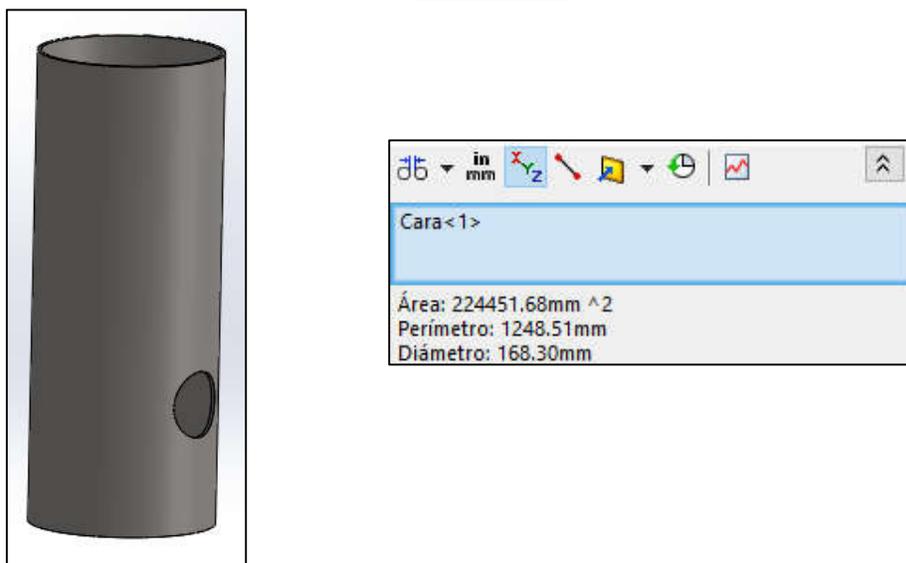
El área de transferencia de calor que proporciona la pared del cilindro debe ser igual o mayor que el cuerpo principal fisurado.

Modelando el cuerpo principal en el Software SolidWorks y midiendo sus propiedades dimensionales se obtiene que el área exterior de la pared sea de  $219553 \text{ mm}^2$  o  $2195,53 \text{ cm}^2$ .



Vista 3D del cuerpo principal fisurado

De la misma manera, modelando la pieza de reemplazo y midiendo sus propiedades dimensionales, se obtiene que el área de la pared del cilindro sea de  $224451 \text{ mm}^2$  o  $2244,51 \text{ cm}^2$ .



Vista 3D del nuevo cuerpo principal

Por lo tanto la nueva pieza cumple con el requisito de que el área de la pared externa sea igual o mayor a la del cuerpo principal fisurado.



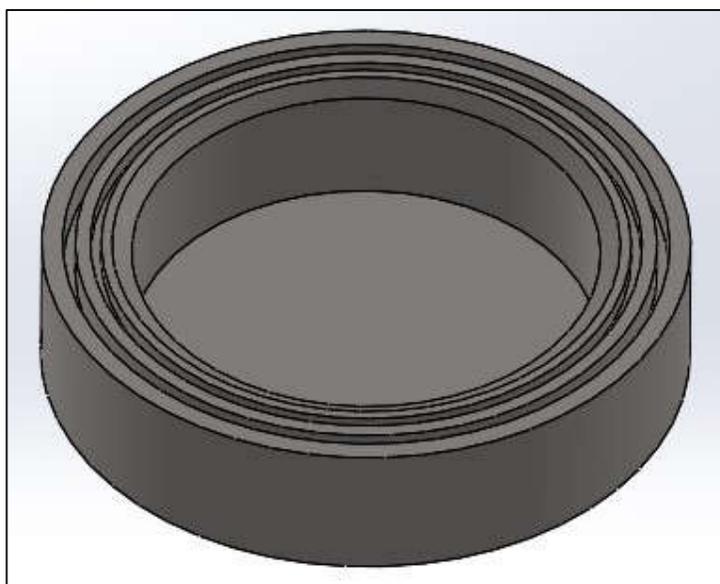
## 2.4. Caldera

Debido a que se alteró el diámetro exterior del cuerpo principal se deberá fabricar una nueva caldera teniendo en cuenta que:

- Debe, como mínimo, ser capaz de contener un volumen de 300 cm<sup>3</sup> de aceite, ya que es la cantidad necesaria de fluido para el proceso.
- Adaptarse a las nuevas dimensiones del cuerpo principal.
- Respetar las medidas necesarias para que la chimenea se apoye en la caldera.

En cuanto al material es acero inoxidable austenítico ASTM A276 TIPO 304.

La especificación ASTM A276 abarca barras redondas, cuadradas y hexagonales de acero inoxidable formadas en caliente laminados o extruidos.



*Vista 3D de la nueva caldera*

El plano de la misma se encuentra en el anexo sección 2

En cuanto a la terminación superficial, corresponde a una superficie común de pieza mecanizada del orden de 2,5 a 4 micrones, debido al fresado.



## 2.5. Resistencia calefactora

Se deberá recalcular la misma debido al cambio de dimensiones de la caldera.

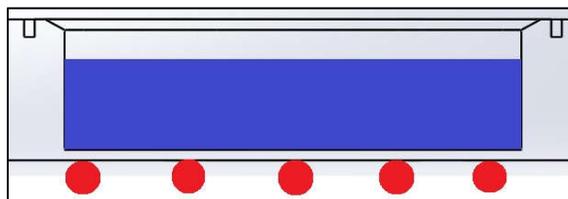
### 2.5.1. Cálculo

#### 2.5.1.1. Datos

Datos del fluido	
Nombre comercial	Santovac 5
Punto de ebullición	275°C a 0.5 torr
Calor latente de vaporización	49,2 cal/g
Calor específico	0.35 cal/gr°C
Conductividad térmica	0.133 W/m K
Densidad	1.2
Volumen que requiere la bomba	300 cm <sup>3</sup>
Datos de la caldera	
Material	Acero Inox 304
Diámetro	130 mm
Altura	34mm
Volumen	450 cm <sup>3</sup>
Conductividad térmica del material	14.9 W/m K
Calor específico	0.1139 cal/gr°C
Espesor del piso	3 mm
Espesor de las paredes	35 mm

#### 2.5.1.2. Planteo del problema

La caldera del esquema consiste en un recipiente cilíndrico donde se cargan 300 cc de aceite para bombas difusoras Santovac 5, teniendo en cuenta las características del mismo y las del material de la caldera, se requiere saber la potencia necesaria para lograr evaporar una cierta cantidad de aceite mediante una resistencia eléctrica que está en contacto directo con la cara opuesta del piso de la caldera.



#### 2.5.1.3. Resolución

El fluido debe superar su temperatura de ebullición por lo que se considera la temperatura final unos 10 °C más del mismo, siendo  $T_f=285^\circ\text{C}$  y como temperatura inicial la ambiente  $T_i=20^\circ\text{C}$ .



- Calentamiento del aceite: se consideran los 300 cc, debido a que todo el fluido parte de la temperatura ambiente.  
La energía necesaria se calcula con la siguiente ecuación

$$Q_A = m \times C_e \times (T_f - T_i)$$

Dónde:  $Q_A$  es el calor para el aceite;  $m$  es la masa y  $C_e$  es el calor específico

$$m = \rho \times V$$
$$m = \rho_f \times \rho_{H_2O} \times V$$
$$m = 1.2 \times 1 \text{ gr/cc} \times 300 \text{ cc}$$
$$m = 360 \text{ gr}$$

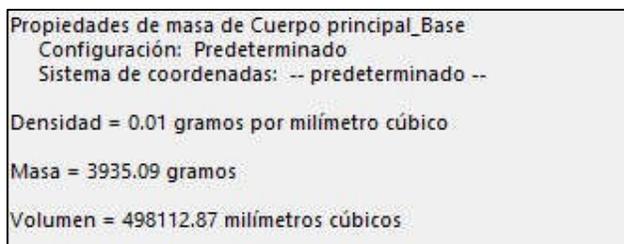
$$Q_A = 360 \text{ gr} \times 0.35 \text{ cal/ gr } ^\circ\text{C} \times (285^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$
$$Q_A = \text{cal/ 1000}$$
$$Q_A = \mathbf{33, 39 \text{ Kcal}}$$

- Calentamiento de la caldera:  
La energía necesaria se calcula con la siguiente ecuación

$$Q_C = m \times C_e \times (T_f - T_i)$$

Dónde:  $Q_C$  es el calor para la caldera;  $m$  es la masa y  $C_e$  es el calor específico

La masa de la caldera se obtiene mediante la información que suministra el programa Solidworks en el apartado de propiedades físicas de la pieza “base”



$$Q_C = 3935 \text{ gr} \times 0.1139 \text{ cal/ gr } ^\circ\text{C} \times (285^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$
$$Q_C = 118775 \text{ cal/ 1000}$$
$$Q_C = \mathbf{118.77 \text{ Kcal}}$$

Sumando el calor necesario para calentar el aceite y la caldera se obtiene un total de:

$$Q_{\text{cal}} = Q_A + Q_C$$
$$Q_{\text{cal}} = 33.39 \text{ Kcal} + 11877 \text{ Kcal}$$
$$Q_{\text{cal}} = \mathbf{152 \text{ Kcal}}$$



- Teniendo en cuenta el tiempo para realizar el calentamiento se obtiene valores de potencias necesarias

Tiempo	Potencia [Kcal/h]	Potencia [W]
60 min	152	176.8
30 min	304	353.6
25 min	365	424.5
20 min	456	530.3
15 min	608	707
<b>10 min</b>	<b>912</b>	<b>1060.6</b>

- Perdidas de calor por conducción  
Como la caldera no es más que un cilindro, el flujo de calor de pérdida por conducción se determina con la siguiente ecuación (extraída de Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor Universidad de Sevilla)

$$\frac{k\Delta T}{r \ln(r_2 / r_1)}$$

Dónde:

K= Coeficiente de transferencia de calor del material

R<sub>2</sub>= Radio exterior del cilindro

R<sub>1</sub>= Radio interior del cilindro

ΔT= Diferencia de temperatura entre las paredes internas y externas del cilindro

Para la caldera:

K= 14,9 W/m K

R<sub>2</sub>= 90mm = 0.09m

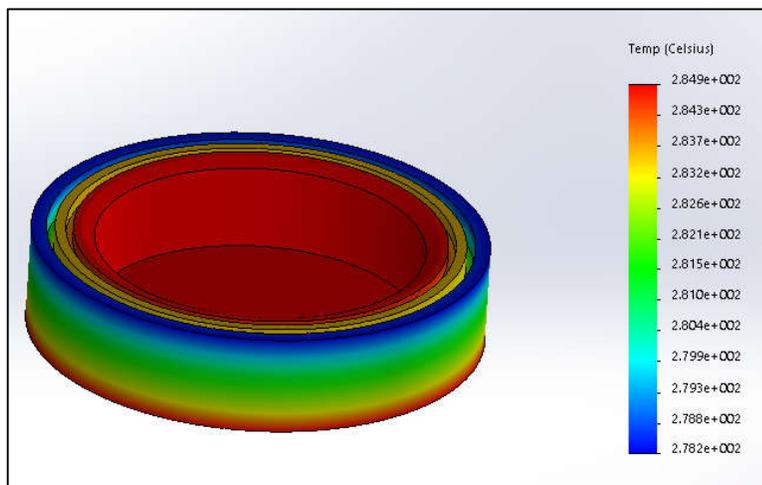
R<sub>1</sub>= 65mm = 0.065m

ΔT= La temperatura de la pared interna se toma 285°C que es la temperatura a la cual se estima que el aceite llegará; la temperatura de la pared exterior se determina con la ayuda de una simulación térmica realizada en el Software SolidWorks con las siguientes condiciones de borde:

Cargas térmicas: Temperatura de 285°C (558 K) en el interior y convección en el exterior con una temperatura ambiente de 20 °C y un coeficiente convectivo de 25 W/m<sup>2</sup>, el cual es un valor estándar para aire a convección natural.



Los resultados de la simulación se aprecian en la siguiente imagen



*Simulación térmica de caldera*

Como se puede ver el valor más bajo que toma la pared exterior es de 278.2°C (551 K)

El flujo de calor será entonces de:

$$Q_{\text{cond}} = 14.9 \text{ W/m K} \times (558 - 551) \text{ K} / 0.09 \text{ m} \times \ln(0.09 \text{ m} / 0.065 \text{ m})$$

$$Q_{\text{cond}} = 14.9 \text{ W/m K} \times 7 \text{ K} / 0.09 \text{ m} \times 0.325$$

$$Q_{\text{cond}} = 104.3 \text{ W/m} / 0.029 \text{ m}$$

$$Q_{\text{cond}} = 3596, 55 \text{ W/m}^2$$

$$A = 0.180 \text{ m} \times \pi \times 0.04 \text{ m}$$

$$A = 0.0226 \text{ m}^2$$

$$Q_{\text{cond}} = 3596.55 \text{ W/m}^2 \times 0.0226 \text{ m}^2$$

$$Q_{\text{cond}} = \mathbf{81.35 \text{ W}}$$

#### 2.5.1.4. Conclusion

El tiempo promedio de calentamiento en el que las bombas difusoras de aceite de la marca AGUILENT versión VHS-4 es de 10 min.

Teniendo en cuenta la potencia calorífica para calentar el aceite y el recipiente en 10 minutos y la potencia calorífica que se pierde por conducción se obtiene una potencia calorífica total de:

$$Q_T = Q_{\text{cal}} + Q_{\text{cond}}$$

$$Q_T = 1060.6 \text{ W} + 81.35 \text{ W}$$

$$Q_T = 1141.95 \text{ W}$$



Aplicando un coeficiente de seguridad del 25% considerando que se puede agregar más aceite y que si bien se va a instalar aislación debajo de la resistencia, el flujo de calor no es unidireccional.

$$Q_T = 1141.95 \text{ W} \times 1.25$$

$$Q_T = \mathbf{1427.43 \text{ W}}$$



## 2.6. Verificación del espesor del cilindro

La verificación del espesor del cilindro del cuerpo principal se llevó a cabo siguiendo el código ASME sección VIII división 1 subsección UG-28 “espesor de cascaras y tubos sometidos a presiones externas”, en la cual se debe seguir una serie de pasos:

- Paso 1: Determinar los cocientes  $D_0/t$  y  $L/D_0$ .

Donde

$D_0$  es el diámetro exterior del cilindro

$t$  es el espesor de la pared el cilindro

$L$  es la longitud del cilindro

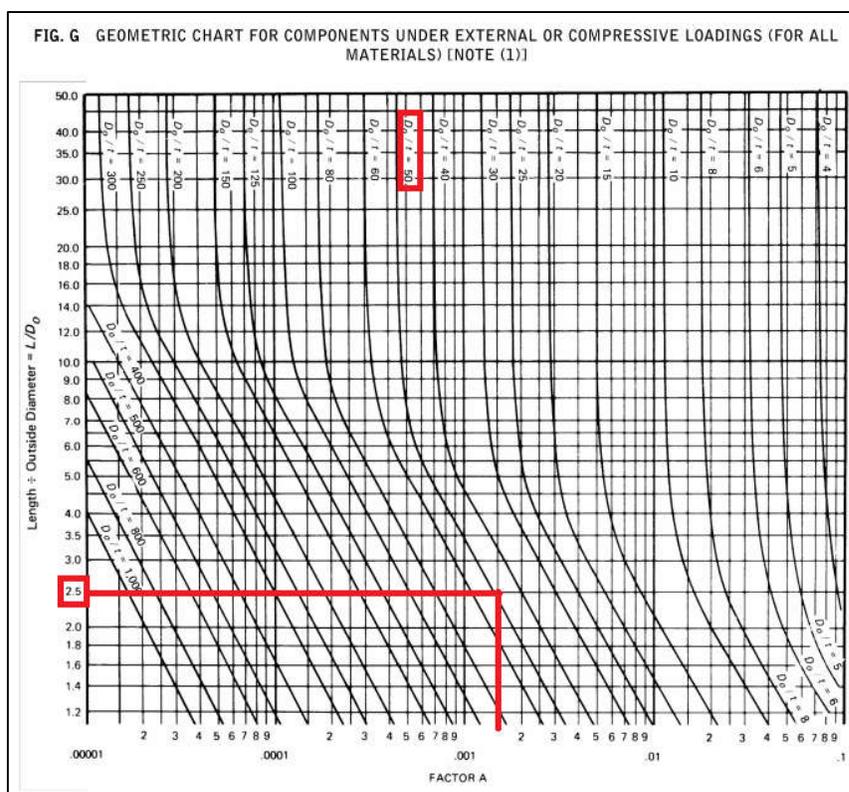
$$D_0/t = 168.3\text{mm}/3.4\text{mm} = 49.5$$

$$L/D_0 = 430\text{mm}/168.3\text{mm} = 2.55$$

- Paso 2: Entrar al Código ASME sección II subparte 3 figura G con los valores de los cocientes determinados en el paso 1 y determinar el Factor A

$L/D_0$  se ubican en el eje de las ordenadas

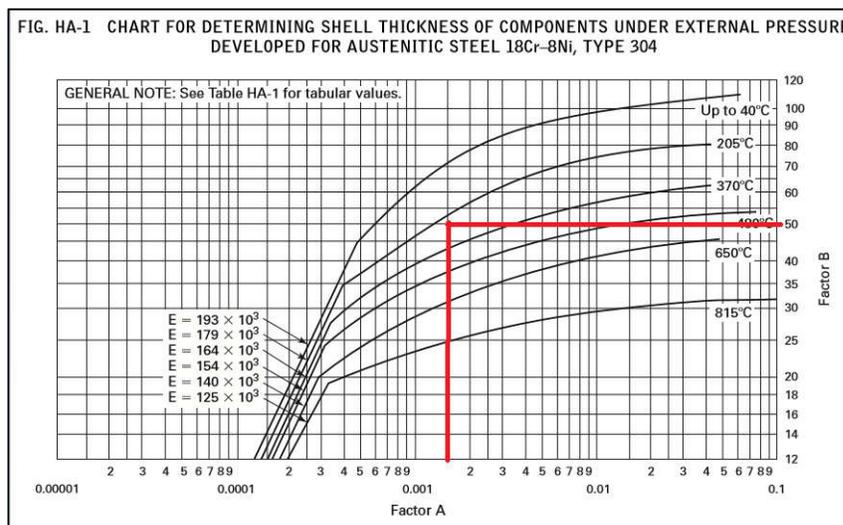
$D_0/t$  se ubican en curvas que descienden verticalmente





$$\text{Factor A} = 0.0015 = 1.5 \times 10^{(-2)}$$

- Paso 3: Entrar al Código ASME sección II subparte 3 figura HA-1 con el Factor A determinado en el paso 2 y obtener el Factor B en función del material y la temperatura de trabajo, que en el caso del cilindro es acero inoxidable austenítico AISI 304 sometido a una temperatura intermedia entre 205°C y 370°C.



Factor B= 50 Mpa

- Paso 4: Determinar la máxima presión externa admisible usando la siguiente ecuación suministrada por el código ASME

$$P_a = \frac{4B}{3(D_o/t)}$$

$$P_a = 4 \times 50 \text{ Mpa} / 3 \times 49.5$$

$$P_a = 1.346 \text{ Mpa}$$

- Paso 5: Compara la máxima presión externa admisible con la presión externa de trabajo y verificar que sea menor

$$P_T = \text{Presión atmosférica} = 0.1013 \text{ Mpa}$$

Se verifica que:

$$P_a > P_T, \text{ ya que } 1.346 \text{ Mpa} > 0.1013 \text{ Mpa}$$

Con esto se puede concluir que el cuerpo principal de la bomba de alto vacío por difusión de aceite no sufrirá deformaciones bajo las condiciones de trabajo preestablecidas.



### 3. Anexo

#### 3.1. Plano Cilindro

#### 3.2. Plano Caldera



#### 4. **Bibliografía**

- Basic vacuum technology, A. Chambers, R. K. Fitch and B. S. Halliday
- Experimental techniques for low-temperature measurements, Jack W. Erin
- Fundamentals of vacuum technology, Dr. Walter Umrath
- Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor Versión 3.6 (septiembre de 2016) Universidad de Sevilla
- Catalogo Santovac® 5 Diffusion Pump Fluid
- Código ASME II
- Código ASME VIII