

Diseño Del Sistema De Vacío Para Un Horno De Retorta De Pared Fría para Empresas Públicas de Medellín

Juan Camilo Nanclares Cárdenas¹, Camilo Andrés García Ochoa², María Eugenia Muñoz Amariles³

¹Grupo de investigación de Tribología y superficies, Departamento de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia. Email: jcnanclaresc@unal.edu.co

²Grupo de investigación de Tribología y superficies, Departamento de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia. Email: caagarciaoc@unal.edu.co

³Grupo de investigación de Tribología y superficies, Departamento de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia. Email: memunozam@unal.edu.co

Resumen

El sistema de vacío de un horno de retorta de pared fría que va a tratar térmicamente aleaciones base Níquel y aceros inoxidable refractarios, por medio de procesos tales como brazing (agresivo para el sistema de vacío), envejecido y temple, se selecciona, calcula y define junto con sus líneas de evacuación de aire. Se tienen en cuenta diferentes parámetros que influyen en la generación del vacío y se utilizan modelos de cálculo del tiempo de evacuación para las líneas de bajo y alto vacío, teniendo en cuenta presencia de infiltraciones y desorción de las paredes del horno. Los resultados del tiempo de evacuación para alcanzar presiones de 7×10^{-2} mbar y $1,33 \times 10^{-4}$ mbar en las líneas de bajo y alto vacío son 15 min y 43,93 min, respectivamente. Por último, se analizan y se comparan los cálculos analíticos encontrados con un software de cálculo de sistemas de vacío de la empresa Leybold.

Palabras clave: vacío, horno de retorta, bombas de vacío

Abstract

The vacuum system of a vacuum furnace that is going to heat treat Nickel-based alloys and refractory stainless steels, through processes such as brazing (aggressive for the vacuum pumps), aging and quenching, is selected, calculated, and defined along with the pipelines. Different parameters that influence vacuum generation are considered and pump down time models are used for the low and high vacuum lines, considering the presence of leaks and desorption of the furnace walls. The results of the evacuation time to reach pressures of 7×10^{-2} mbar and $1,33 \times 10^{-4}$ mbar in the low and high vacuum lines are 15 and 43,93 min, respectively. Finally, the analytical calculations are analyzed and compared with the results found with a vacuum system calculation software from Leybold company.

Keywords: vacuum, vacuum furnace, vacuum pumping system

1. Introducción

Actualmente la Universidad Nacional de Colombia se encuentra llevando a cabo mediante tecnologías de aspersión térmica y soldadura, el desarrollo e implementación de procesos de reparación y protección de componentes, que están sometidos a daño superficial en centrales de generación eléctrica de Empresas Públicas de Medellín. Dentro de este proyecto, se define la fabricación de un horno de retorta de pared fría que opera con un sistema de vacío cuyas especificaciones se ilustran en la tabla 1.

Este horno se divide en diferentes secciones, tales como, la estructura, la cual estará diseñada para soportar presiones desde $1,33 \times 10^{-4}$ mbar hasta 1 bar; la

zona caliente que se compone de una parrilla de carga, aislantes térmicos y resistencias eléctricas de grafito, que permiten calentar las piezas hasta la temperatura requerida por el tratamiento térmico; el sistema de vacío, por medio del cual se realiza la extracción del aire o Argón remanente en el horno y por último, el sistema de alimentación de Argón.

El horno cuenta con un volumen de 21 m^3 y va a operar a presiones entre $1,33 \times 10^{-4}$ mbar, 7×10^{-2} mbar y 1 bar, a una temperatura de 1200°C durante ciclos de 24 – 48 horas de operación, tal como se ve en la figura 1.

Cabe resaltar que a la hora de realizar un tratamiento térmico, es importante tener en cuenta que el aire que queda atrapado una vez la puerta del horno se ha

cerrado, debe ser extraído con el fin de evitar reacciones o decoloraciones perjudiciales que se puedan generar en la superficie de las piezas que son tratadas térmicamente. [1]

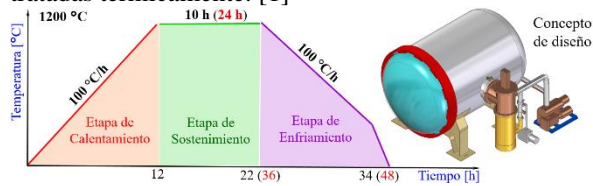


Figura 1. Ciclos de tratamiento térmico del horno de retorta de pared fría.

Tabla 1. Especificaciones iniciales del sistema de vacío del horno de retorta

Parámetro	Valor
Volumen	21 m ³
Presión de operación	$1,33 \times 10^{-4} - 7 \times 10^{-2}$ mbar
Temperatura del gas evacuado.	40 °C
Materiales de las piezas.	<ul style="list-style-type: none"> Acero inoxidable serie 300 Aleación Base Níquel

El término vacío es usado para definir el estado de trabajo de un gas que está a una presión por debajo de la presión atmosférica estándar [3]. Sabiendo esto, los sistemas de vacío utilizados en hornos de retorta son empleados para extraer el aire o Argón y a medida que este es extraído, la presión al interior del horno disminuye hasta el nivel requerido por el tratamiento térmico. Cabe resaltar que para cada nivel de vacío existen ciertos tipos de bombas con sus respectivas curvas características. En la tabla 2 se puede observar una clasificación de los diferentes niveles de vacío.

Tabla 2. Rangos de presión en sistemas de vacío

Nivel de vacío	Valor (torr)
Presión atmosférica	760
Bajo vacío	$760 - 1 \times 10^{-3}$
Medio vacío	$1 \times 10^{-3} - 10^{-5}$
Alto vacío	$1 \times 10^{-5} - 10^{-8}$
Ultra alto vacío	$1 \times 10^{-8} - 10^{-11}$

En este artículo, se selecciona, calcula y define el sistema de bajo y alto vacío junto con las líneas de evacuación de aire para un horno de retorta de pared fría que va a tratar térmicamente aleaciones base Níquel y aceros inoxidables refractarios. Para esto se tienen en cuenta parámetros geométricos tales como la longitud y el diámetro de los ductos de evacuación que interactúan en la generación del vacío, y se utilizan dos modelos para el cálculo del tiempo de evacuación del

horno de retorta, donde uno es empleado para la línea de bajo vacío, y el otro para la línea de alto vacío, el cual tiene en cuenta factores tales como presencia de infiltraciones y desorción de las paredes del horno. Por último, se muestran los cálculos analíticos encontrados.

2. Cálculo y selección de los componentes del sistema de vacío

El sistema de vacío proveerá las condiciones de presión requeridas en la cámara del horno de retorta para llevar a cabo el tratamiento térmico deseado. Este funcionará en dos escenarios diferentes, donde uno de ellos se da cuando al ingresar las piezas a tratar y al cerrar la puerta del horno, se deba extraer el volumen de aire remanente en la cámara de este, mientras que el otro escenario se da cuando se utiliza Argón como gas de protección a lo largo de todo el proceso de sostenimiento y enfriamiento de la pieza durante cierto tratamiento (figura 1), generando así que para abrir la puerta del horno primero se deba extraer este gas y luego, a través de una válvula de aireación, llenar el horno de aire atmosférico de tal forma que la puerta de este se pueda abrir y posteriormente se extraigan las piezas que fueron tratadas térmicamente.

Ahora, en aplicaciones donde el alto vacío es requerido, es necesario tener altas relaciones de compresión y grandes cantidades de flujo volumétrico para así obtener la mayor eficiencia posible. Además, se deben utilizar varias etapas de vacío, debido a que la cantidad de variables que se presentan en este tipo de sistemas donde se quiere llevar la presión interna del horno desde la presión atmosférica hasta un nivel de vacío medio (tabla 2), es técnicamente imposible con una sola bomba. Por tanto, las etapas de vacío están compuestas por la fase inicial, mejor conocida como etapa de bajo vacío, donde el gas de la cámara del horno es removido por medio de diferentes bombas mecánicas de desplazamiento positivo, conocidas como bombas primarias, entre las cuales están bombas de pistones, de paletas rotativas con aceite o de tornillo (en seco), llevando el horno desde una presión de 1 bar hasta una presión de 7×10^{-2} mbar. Posteriormente, en la etapa de alto vacío se utiliza una bomba de difusión junto con una bomba de paletas lubricadas (conocida como bomba de sostenimiento), que permite alcanzar la presión de trabajo deseada de $1,33 \times 10^{-4}$ mbar. [1]

Por otra parte, también existen otro tipo de configuraciones donde no solo se utiliza una bomba primaria (bomba mecánica) para obtener la presión de 7×10^{-2} mbar, sino que se dispone de un sistema en serie compuesto por una bomba de lóbulos y una bomba de mecánica, tal como se ve en la figura 2, donde la principal ventaja de esta configuración es el aumento de capacidad de la velocidad de bombeo del sistema y del rango de presión de vacío alcanzado. Por esta razón, se decidió tener este tipo de configuración para el sistema de bajo vacío del horno de retorta.



Figura 2. Bomba de tornillo más bomba de lóbulos conectadas en serie. [2]

Adicionalmente, los sistemas de vacío cuentan con diferentes válvulas, las cuales son componentes esenciales en este tipo de configuraciones. Su propósito principal es aislar la cámara del horno de las bombas de bajo o alto vacío. Su selección depende de los rangos de presión que van a ser empleados en el horno, de la temperatura del gas y de la aplicación del proceso, con el fin de poder elegir el juego adecuado. Para el caso del horno se eligieron tres válvulas de vacío de ángulo recto que cumplen con las exigencias especificadas en la tabla 1.

Por último, se seleccionaron medidores de vacío, los cuales son instrumentos de medición de presión que censan el nivel de vacío en una cámara. Así, debido a que el sistema trabaja a niveles de $1 \times 10^{-4} - 7 \times 10^{-2}$ mbar, se requieren diferentes medidores para determinar y / o controlar con precisión el nivel de presión de la cámara en cualquier momento dado.

Como resultado de esta selección de componentes se presenta la figura 3, la cual resume el montaje y configuración de los diferentes elementos que componen toda la línea de bajo y alto vacío del horno de retorta

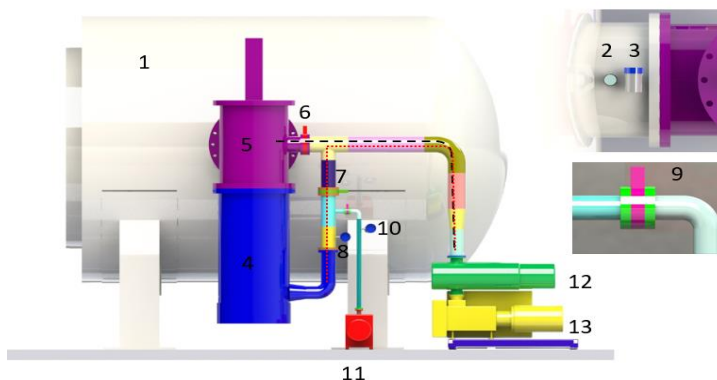
2.1. Cálculo del tiempo de evacuación de bajo vacío

El sistema de vacío del horno de retorta se divide en dos secciones, tal como se observa en la figura 3. Una de las líneas de tubería por donde el aire/Argón de la cámara es extraído se conoce como línea de bajo vacío (línea discontinua) y la otra tubería (línea punteada en rojo) es la línea de alto vacío donde el aire remanente es extraído por medio de la bomba de difusión con ayuda de la bomba de sostenimiento (bomba 11 en la figura 3).

Cabe resaltar que para llevar a cabo el cálculo del tiempo de evacuación de las líneas del horno, se debe conocer el régimen de flujo del aire, el cuál es función del número de Knudsen, que a su vez depende del camino medio libre molecular y del diámetro de la tubería. [4] Esto se realiza, debido a que parámetros tales como la conductancia dependen fuertemente del régimen en el que se encuentre el flujo [3-9].

Para llevar a cabo el cálculo del tiempo de evacuación de la cámara del horno de retorta, inicialmente se define el juego de bombas mecánicas (primaria y lóbulos) y se extrae la curva característica del juego de bombas del fabricante seleccionado. Luego, teniendo en cuenta la conexión de las bombas se obtienen los diámetros y longitudes iniciales de la línea de evacuación de aire que conecta el horno con estas. Esto se hace con el fin de determinar la conductancia de la línea, la cual permite obtener la velocidad de bombeo efectiva de las diferentes bombas del sistema, y a su vez permite calcular el tiempo de evacuación de la cámara del horno asumiendo que el sistema tiene volumen constante. Sabiendo que la región de bajo vacío comprende el rango de presiones desde $1013 - 1 \times 10^{-2}$ mbar, se realizan los siguientes pasos:

COMPONENTES DE LAS LÍNEAS DE VACÍO



Línea de bajo vacío - - - - - 1×10^{-2} Torr
 Línea de alto vacío ······ 1×10^{-4} Torr

1. Cámara
2. Medidor de alto vacío.
3. Medidor de bajo vacío.
4. Bomba de difusión
5. Válvula principal (Válvula de asiento)
6. Válvula de bajo vacío (Válvula mariposa)
7. Válvula de la línea frontal (Válvula mariposa)
8. Medidor de la línea frontal
9. Válvula de retención (Válvula de mariposa).
10. Medidor de la bomba de sostenimiento.
11. Bomba de sostenimiento.
12. Bomba de lóbulos.
13. Bomba mecánica.

Figura 3. Esquema del sistema de vacío. Fuente: elaboración propia

2.1.1. Definición de un sistema de bombeo inicial

Se define una combinación de una bomba de tornillo (bomba en seco) más una bomba de lóbulos (bomba mejoradora), el cual se denomina sistema en seco (no requiere lubricante para generar el vacío), siendo óptimo para ser utilizado en tratamientos que generen vapores o gases agresivos tales como brazing [10]. Normalmente esta combinación de bombas tiene una curva característica en forma de campana, tal como se ve en la figura 4.

Las bombas seleccionadas normalmente vienen con conexión bridada DN 100 ISO K, lo cual significa que el diámetro de la tubería es de 101,6 mm e inicialmente la línea tendrá una longitud de 2747 mm.

2.1.2. Obtención del régimen de flujo

Según [3] para determinar el régimen de flujo del sistema se puede utilizar el siguiente criterio, el cual tiene en cuenta la presión promedio del sistema (mbar) y el diámetro de la tubería (cm)

$$\begin{aligned} \bar{p} \cdot d &> 6 \times 10^{-1} \text{ mbar} \cdot \text{cm} && \text{Flujo viscoso} \\ 1,3 \times 10^{-2} < \bar{p} \cdot d < 6 \times 10^{-1} \text{ mbar} \cdot \text{cm} && \text{Flujo medio (1)} \\ \bar{p} \cdot d < 1,3 \times 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{cm} && \text{Flujo molecular} \end{aligned}$$

Para este caso, la presión promedio de la línea de bajo vacío es de:

$$\bar{p} = \frac{1013 \text{ mbar} + 0,01 \text{ mbar}}{2} = 506,505 \text{ mbar (2)}$$

Teniendo este valor y el diámetro, se utiliza el criterio de la ecuación (1) y se obtiene que el régimen de flujo de la línea de bajo vacío es viscoso, lo cual significa que el camino medio libre de las moléculas de aire es más pequeño que el diámetro de la tubería. [3]

$$\bar{p} \cdot d = 506,505 \cdot 10,16 = 5146,09 \text{ mbar} \cdot \text{cm (3)}$$

2.1.3. Cálculo de la conductancia de la línea de bajo vacío

Ahora, el cálculo de la conductancia del sistema, la cual se define como la facilidad que tiene un gas para fluir a través de una tubería u orificio o que puede ser pensada como el inverso de la resistencia al flujo [3] es de vital importancia, ya que de no tenerlo en cuenta, puede que el sistema de bombeo seleccionado se demore más de lo esperado para alcanzar la presión de vacío objetivo.

Este parámetro es controlado seleccionando tuberías y elementos utilizados en la línea de vacío que tengan el mayor diámetro y la menor longitud posible, con el fin de que éste sea maximizado y así la velocidad de bombeo efectiva del sistema sea similar a la velocidad teórica.

Así, para aire a 20°C en régimen viscoso, la conductancia de un ducto se calcula de la siguiente manera:

$$C_{ducto,bv} = 1,35 \frac{d^4}{l} \cdot \bar{P} \quad (4)$$

Posteriormente, para hallar la conductancia total se analizó si los ductos de tuberías, válvulas y demás componentes que aporten a este parámetro, están conectados en serie o en paralelo. En el caso de la línea de bajo vacío, existen cuatro elementos que están conectados en serie y por tanto se utiliza la siguiente fórmula para hallar la conductancia total.

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{Ah}} + \frac{1}{C_{Th}} + \frac{1}{C_{Tv}} + \frac{1}{C_{V6}} \quad (5)$$

Con base en las ecuaciones 4 y 5, se calculan las conductancias de los diferentes tramos de la línea de bajo vacío y de la válvula de ángulo recto que se trata como un codo (número 6 en la figura 3). Cabe resaltar, que en régimen viscoso, la conductancia depende de parámetros geométricos de la tubería, tales como el

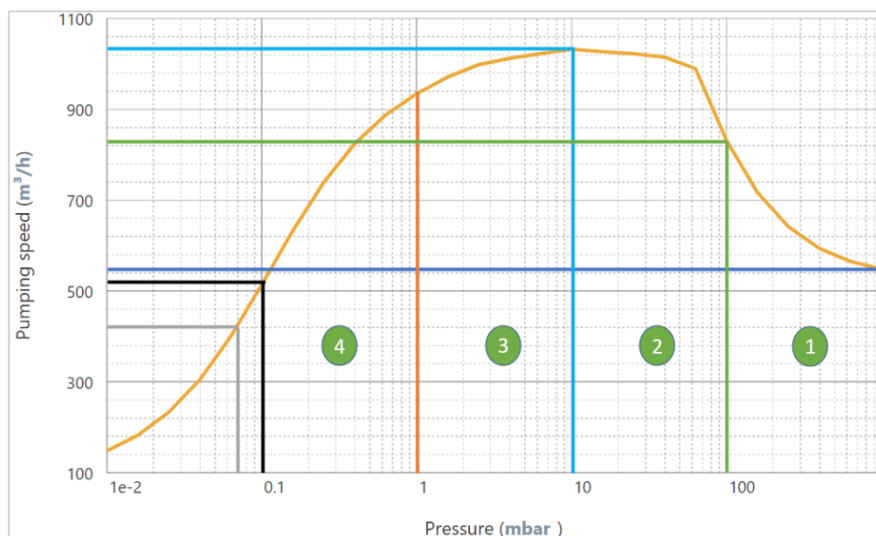


Figura 4. Tramos de presión obtenidos de la curva característica del sistema de bombeo seleccionado. Fuente: elaboración propia.

diámetro y la longitud y además, depende de la presión promedio que haya en la línea. A continuación, en la tabla 3 se presentan los resultados de las conductancias de la línea de bajo vacío.

Tabla 3. Conductancias de los componentes que están conectados en la línea de bajo vacío.

Conductancia para flujo viscoso	Valor	Unidad
Acople	2,45E+10	l/s
Tramo horizontal	4,62E+06	l/s
Tramo vertical	5,13E+06	l/s
Válvula de ángulo recto 6	6,03E+07	l/s
Válvula de ángulo recto 5	3,13E+04	l/s
Conductancia total	1,11E+05	m ³ /h

2.1.4. Cálculo velocidad de bombeo efectiva

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C_T} + \frac{1}{S_{bomba}} \quad (6)$$

Con base en la ecuación (6), se procede a despejar la velocidad de bombeo efectiva, la cual es función de la conductancia total del sistema y por tanto permite comparar su valor con la velocidad de bombeo teórica del conjunto de bombas seleccionado.

$$S_{eff} = \frac{S_{bomba} \cdot C_T}{S_{bomba} + C_T} \quad (7)$$

En el siguiente ítem se mostrará el cálculo de este parámetro teniendo en cuenta la forma de la curva característica del sistema de bombeo de bajo vacío.

2.1.5. Cálculo del tiempo de evacuación

Sabiendo que el sistema de bombas tiene una velocidad de bombeo máxima de 1032 m³/h alcanzada a una presión de 10 mbar y que la curva característica tiene forma de campana, se procede a realizar el cálculo con el siguiente procedimiento:

Para realizar el cálculo del tiempo de evacuación se divide la curva en tramos en los que la presión se disminuye por órdenes de magnitud, es decir, se extrae la velocidad de bombeo de la curva a una presión de 1013 mbar y luego a 101,3 mbar se vuelve a medir la velocidad, para así calcular el promedio de ésta, y luego, por medio de la conductancia total, calcular la velocidad de bombeo efectiva del tramo con la ecuación (7), para posteriormente hallar el tiempo que le toma al sistema disminuir la presión desde 1013 mbar hasta 101,3 mbar. Este proceso de división y cálculo se realiza hasta que se alcance la presión objetivo de 0,07 mbar. Tal división de los tramos se puede observar en la figura 4.

Con base en lo anterior, y teniendo el volumen de la cámara (21 m³), la conductancia total, la carga de gas y las presiones inicial y final del sistema de bajo vacío, se calcula el tiempo de evacuación de cada tramo por

medio de los modelos de tiempo de evacuación con y sin carga de gas, que se presentan en las ecuaciones (8) y (9), respectivamente. Posteriormente se suman tales tiempos calculados para obtener el tiempo de evacuación en bajo vacío (ecuación 10).

$$t_n = 2.3 \cdot \left(\frac{V}{S_{eff}}\right) \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{P_1}{P_2}\right), n = 1, \dots, 4 \quad (8)$$

$$t_n = \left(\frac{V}{S_{eff}}\right) \cdot \ln \left(\frac{(P_1 - P_{end}) - Q/S_{eff}}{(P_2 - P_{end}) - Q/S_{eff}}\right), n = 1, \dots, 4 \quad (9)$$

$$t_{bv} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (10)$$

En la tabla 4, se puede observar el resultado de los tiempos de evacuación de la línea de bajo vacío, donde en un modelo se asume que los efectos de la carga del gas son despreciables (ecuación 8) y en el otro se tienen en cuenta, sabiendo que la desorción de las paredes internas del horno y de las resistencias de la zona caliente son de 1x10⁻⁷ mbar·l/s·cm² para acero y de 1x10⁻⁶ mbar·l/s·cm² para grafito, respectivamente. [4]

Tabla 4. Tiempo de evacuación de la línea de bajo vacío utilizando el sistema de bombas de tornillo y lóbulos.

Parámetro	Unidad	Valor
Volumen de la cámara	21	m ³
Presión objetivo	0,07	mbar
Carga de gas asumida por el sistema de bombeo	0,1531	mbar·l/s
Tiempo de evacuación sin desorción	15,30	min
Tiempo de evacuación con desorción	15,41	min

Cabe resaltar que, a medida que la presión de operación disminuye, factores tales como las infiltraciones y la desorción de las paredes de la cámara del horno, de las resistencias y de las piezas de trabajo, empiezan a afectar la capacidad del sistema de bombeo para alcanzar la presión requerida. Sin embargo, se puede observar que para alcanzar la presión de 0,07 mbar, la cual se encuentra en la región de vacío medio, el efecto de la tasa de desorción en el horno no afecta considerablemente el tiempo que le toma al sistema de bombeo extraer el aire y alcanzar la presión requerida. Así, el tiempo de evacuación de la línea de bajo vacío, utilizando el sistema de bombas de tornillo y lóbulos, es del orden de 15 min.

Ahora, es importante notar que el tiempo de evacuación de la cámara de un horno es un factor importante a la hora de seleccionar las bombas, elementos y accesorios de la línea de bajo vacío, puesto que mientras más tiempo se tome en extraer el aire de

la cámara, más tiempo tomará el tratamiento térmico, lo cual tiene implicaciones económicas en términos de consumo energético, insumos y sobre todo en el valor final de la pieza que está siendo tratada.

2.2. Tiempo de evacuación de la línea de alto vacío

Cuando la presión en la cámara del horno de retorta se encuentre en bajo vacío (1×10^{-2} mbar) se procede con la entrada en operación de la bomba de difusión, la cual llevará a la cámara desde 1×10^{-2} mbar hasta $1,33 \times 10^{-4}$ mbar, que es la presión de operación del horno para llevar a cabo tratamientos tales como brazing.

La bomba de difusión tiene una velocidad de bombeo constante de 10800 L/s desde 1×10^{-3} hasta 1×10^{-7} mbar y su curva característica se puede observar en la figura 5.

Ahora, siguiendo los mismos pasos que en el cálculo del tiempo de evacuación de la línea de bajo vacío, se procede a calcular por medio de la ecuación (2) el régimen de flujo en el que se encuentra el sistema.

$$\bar{p} = \frac{1 \times 10^{-2} + 1,33 \times 10^{-4}}{2} = 5,06 \times 10^{-3} \text{ mbar} \quad (11)$$

Y multiplicando el resultado de la ecuación (11) por el diámetro de la tubería, se obtiene que el sistema de alto vacío se encuentra en un régimen de flujo medio, donde el camino medio libre de las moléculas de aire está alcanzando el diámetro de la tubería de la línea de alto vacío. Lo cual quiere decir que el cálculo de la conductancia de los diferentes tramos se realiza mediante la siguiente ecuación. [4]

$$C_{ducto,av} = 1,35 \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} + 12,1 \frac{d^3}{l} \cdot f \quad (12)$$

$$f = \frac{1 + 192 \cdot d \cdot \bar{p}}{1 + 237 \cdot d \cdot \bar{p}}$$

Con base en la ecuaciones (11) y (12) se procedió a calcular las conductancias de cada elemento de la línea de alto vacío del horno de retorta. Además, teniendo en cuenta que debido a la cercanía del valor del cálculo

encontrado por medio de la ecuación (11) con el valor del régimen de flujo molecular ($\lambda > d$), se decidió utilizar la conductancia en régimen molecular de las válvulas de alto vacío que se reportan en los catálogos de los fabricantes de estas.

Tabla 5. Conductancias de los elementos de la línea de alto vacío.

Conductancia elementos línea de alto vacío	Valor	Unidad
Cbranching	1066,09	L/s
Ctramo_horizontal	143780,67	L/s
C_tramo_vertical	101,92	L/s
Cválvula de asiento 7	440,00	L/s
Cválvula de asiento 5	20000,00	L/s
Cacople	59116,12	L/s
Conductancia total	76,36	L/s

Similarmente, se procede a calcular la velocidad de bombeo efectiva de la bomba de difusión por medio de la ecuación (7) y se obtiene tal velocidad de bombeo

$$S_{eff} = \frac{S_{bomba} \cdot C_T}{S_{bomba} + C_T} = \frac{10800 \cdot 76,36}{10800 + 76,36} = 72,84 \frac{L}{s} \quad (13)$$

Teniendo la velocidad de bombeo efectiva de la bomba de difusión y sabiendo que tal velocidad es constante en todo el rango de operación de ésta, se procede a realizar el cálculo del tiempo de evacuación del sistema sabiendo que la presión inicial no es la atmosférica, sino la presión de bajo vacío obtenida por medio de las bombas mecánicas.

$$t_{av} = 2,3 \left(\frac{V}{S_{eff}} \right) \text{Log}_{10} \left(\frac{P_{bv}}{P_f} \right) \quad (14)$$

Ahora, teniendo en cuenta que el volumen de la cámara es de 21 m^3 , la velocidad de bombeo efectiva de la bomba de difusión es de $72,84 \frac{L}{s}$ y que las presiones P_{bv} y P_f son 1×10^{-2} y $1,33 \times 10^{-4}$ mbar respectivamente;

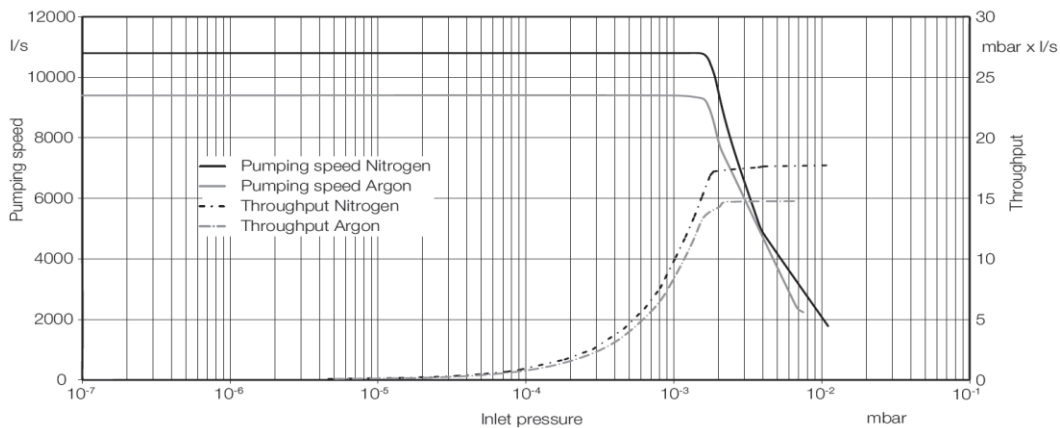


Figura 5. Curva característica de la bomba de difusión. [10]

se tiene que el tiempo de evacuación para alcanzar la presión de alto vacío es:

$$t_{av} = 2,3 \left(\frac{21000}{72,84} \right) \text{Log}_{10} \left(\frac{1 \times 10^{-2}}{1,33 \times 10^{-4}} \right) = 1244,06 \text{ s} \quad (15)$$

$$t_{av} = 20,73 \text{ min}$$

Cabe recalcar que a ese tiempo de evacuación se le debe añadir el tiempo que le toma a las bombas mecánicas disminuir la presión de la cámara desde 1013 mbar hasta 1×10^{-2} mbar, el cual es de 23,2 min. Así, el tiempo de evacuación para llevar la cámara desde presión atmosférica hasta $1,33 \times 10^{-2}$ mbar es de 43,93 minutos.

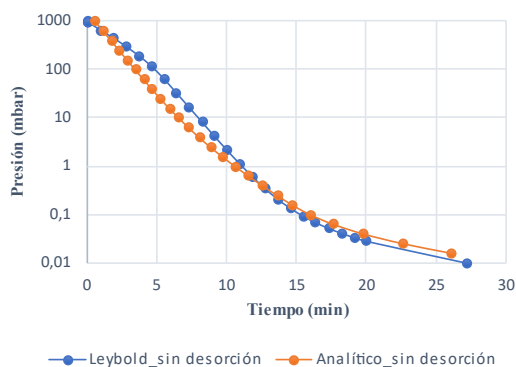


Figura 6. Curva de tiempo de evacuación de la cámara del horno de retorta desde presión atmosférica hasta 1×10^{-2} mbar

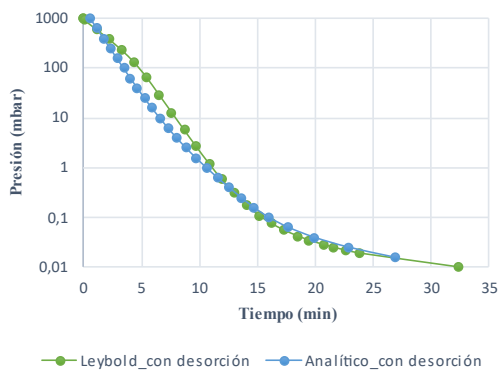


Figura 7. Curva de tiempo de evacuación de la cámara del horno de retorta desde presión atmosférica hasta 1×10^{-2} mbar, considerando desorción.

3. Resultados

En cuanto a los resultados obtenidos en el artículo, se puede decir lo siguiente:

- De acuerdo con las figuras 6 y 7, se puede observar que el tiempo de evacuación para obtener una presión de bajo vacío de 0,07 mbar con y sin tener en cuenta la carga de gas generada por la desorción de las paredes de la zona interna del horno, por medio del modelo analítico fue de 15,3 min y 15,41 min, respectivamente, mientras que el tiempo obtenido por medio del modelo de Leybold fue de 16,29 y 16,44 min, respectivamente. Esto muestra que a la presión de bajo vacío

requerida (0,07 mbar), la tasa de desorción no afecta de forma considerable el valor del tiempo de evacuación de la cámara del horno. Además, se puede observar que el modelo analítico desarrollado presenta valores cercanos a los obtenidos por medio del modelo de cálculo de Leybold, presentando errores del orden del 6 %.

- Adicionalmente, se encontró que el valor de la conductancia en régimen viscoso no afecta la velocidad de bombeo efectiva del conjunto de bombas mecánicas, debido a que el valor de la presión promedio genera que la conductancia del elemento de la línea de bajo vacío aumente varios órdenes de magnitud, generando así que la velocidad de bombeo efectiva del sistema sea igual a la velocidad de bombeo que entregan las bombas mecánicas.
- En cuanto al tiempo de evacuación de la línea de alto vacío, se encontró que se necesitan 21 min para que la bomba alcance un valor de presión de $1,33 \times 10^{-4}$ mbar partiendo desde la presión de vacío de 1×10^{-2} mbar. Además, en términos de la conductancia de la línea de alto vacío, se encontró que para el régimen de flujo en el que tal línea se encuentra (régimen medio), el valor de la conductancia total afecta fuertemente el valor de la velocidad de bombeo efectiva de la bomba de difusión, generando que de 10800 L/s de velocidad nominal, baje hasta 73 L/s, debido a las pérdidas generadas por longitudes, diámetros y adición de elementos como válvulas, que afectan el tiempo que le toma a la bomba de difusión llevar la cámara del horno desde 1×10^{-2} mbar hasta $1,33 \times 10^{-4}$ mbar.
- En la figura 7, se observa la curva del tiempo de evacuación del horno de retorta hasta alcanzar una presión de 1×10^{-2} mbar, teniendo en cuenta la desorción en el cálculo analítico y en el cálculo realizado por el software de Leybold. En ella se puede ver que el tiempo que le toma al sistema de vacío alcanzar una presión de bajo vacío (1×10^{-2} mbar) a través del software de Leybold es del orden de 32 min, mientras que por medio del cálculo analítico es del orden de 27 min. Esto se debe a que en el cálculo analítico no se varió la tasa de desorción en función del tiempo, mientras que en el modelo de Leybold, posiblemente la carga de gas Q, varía en función del tiempo de evacuación, lo cual permite modelar de forma precisa la realidad del sistema de vacío. Asimismo, el tiempo que le toma al sistema de bombas alcanzar la presión de 1×10^{-2} mbar es casi el doble comparado con el tiempo que le toma alcanzar una presión de 0,07 mbar, lo cual es importante mencionar, ya que a

medida que la presión requerida empieza a estar en la región de medio - alto vacío ($1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-7}$ mbar), el tiempo de evacuación comienza a ser función de la carga de gas que se empieza a generar en el horno, es decir, que a bajas presiones la desgasificación, evaporación de contaminantes, fugas virtuales, infiltraciones, desorción, entre otros, genera que el tiempo necesario para alcanzar la presión de operación de alto vacío del horno sea prolongado, ya que si esa carga de gas es muy elevada, se puede dar el caso donde el sistema no tenga la suficiente capacidad para alcanzar la presión de operación deseada para realizar cierto tratamiento térmico. [4]

4. Conclusiones

El sistema de bajo y alto vacío del horno de retorta de pared fría fue seleccionado y calculado para cumplir con los requerimientos establecidos por los diferentes tratamientos térmicos que se llevarán a cabo en el horno de retorta. Cabe resaltar que las bombas mecánicas fueron seleccionadas de acuerdo con los tratamientos más agresivos que se van a llevar a cabo en el horno y por este motivo, se seleccionó un sistema en seco (no requieren lubricante para generar el vacío) con el fin de que el tratamiento no genere paradas no deseadas en el sistema.

El tiempo de evacuación calculado por medio del modelo de cálculo desarrollado para las líneas de bajo y alto vacío fue de 15 min para obtener una presión de 0,07 mbar y de 43,93 min para obtener una presión de $1,33 \times 10^{-4}$ mbar partiendo desde la presión atmosférica. En este modelo se tuvieron en cuenta factores tales como desorción de las paredes de la zona caliente del horno. Por último, los cálculos de tiempo de evacuación obtenidos por medio del modelo de cálculo desarrollado son cercanos al modelo planteado por el fabricante de bombas Leybold, aprobó y modeló las bombas seleccionadas, asegurando que cumple con las exigencias del horno para alcanzar las presiones objetivo de 7×10^{-2} y $1,33 \times 10^{-4}$ mbar.

5. Abreviaciones

\bar{p} : presión promedio (mbar)
 λ : camino medio libre (mean free path) (cm)
 d : diámetro de la línea de vacío (cm)
 $C_{ducto,bv}$: conductancia del ducto en bajo vacío l/s
 $C_{ducto,av}$: conductancia del ducto en alto vacío l/s
 l : longitud del tramo (cm)
 C_T : Conductancia total l/s
 C_{Ah} : conductancia acople del horno l/s
 C_{Th} : conductancia tramo horizontal l/s
 C_{Tv} : conductancia tramo vertical l/s
 C_{V6} : conductancia válvula número 6 l/s
 V : volumen de la cámara del horno l/s
 S_{eff} : velocidad de bombeo efectiva l/s
 S_{bomba} : velocidad de bombeo de la bomba l/s

t_n : tiempo de evacuación de bajo vacío para el tramo n
 Q : carga de gas generada por desorción e infiltraciones
 P_{bv} : presión de bajo vacío (mbar)
 P_1 : presión inicial del sistema (mbar)
 P_2 : presión final del sistema (mbar)
 P_{end} : presión máxima de vacío que alcanza el sistema (mbar)
 P_f : presión final de alto vacío (mbar)
 P_i : presión inicial del sistema (mbar)
 t_{bv} : tiempo de evacuación total de bajo vacío (min)
 t_1 : tiempo de evacuación del tramo 1 (min)
 t_2 : tiempo de evacuación del tramo 1 (min)
 t_3 : tiempo de evacuación del tramo 1 (min)
 t_{av} : tiempo de evacuación de la línea de alto vacío (min)
 t_4 : tiempo de evacuación del tramo 1 (min)

6. Agradecimientos

Los autores quieren expresar sus más sinceros agradecimientos a Empresas Públicas de Medellín en marcado dentro del proyecto “Desarrollo e implementación de procesos de reparación y protección de componentes críticos sometidos a daño superficial en centrales de generación térmica e hidráulica mediante tecnologías de aspersión térmica y soldadura”. por el apoyo recibido durante todo el desarrollo del trabajo.

7. Referencias

- [1] R. Fabian, V. Flint, S. Hampson, and D. Levicki, *Vacuum technology practical heat treating and brazing*, 1st ed. 1993.
- [2] E. Vacuum, “EDS INDUSTRIAL DRY SCREW VACUUM PUMPS,” 2020.
- [3] J. H. T. Dorothy M. Hoffman, Bawa Singh, *Handbook of vacuum science and technology*, 3rd ed. 1998.
- [4] H.-J. Z. Dr. Walter Umrath; Dr. Hermann Adam †, Alfred Bolz, Hermann Boy, Heinz Dohmen, Karl Gogol, Dr. Wolfgang Jorisch, Walter Mönning, Dr. Hans-Jürgen Mundinger, Hans-Dieter Otten, Willi Scheer, Helmut Seiger, Dr. Wolfgang Schwarz, Klaus Stepputat, Dieter Urban, “Fundamentals of Leybold Vacuum Technology,” *Vac. Handb.*, no. 199, 2016, [Online]. Available: https://www.leyboldproducts.com/media/pdf/87/a8/be/FVT_Fundamentals_of_Vacuum_Technology_EN58774555441f3.pdf.
- [5] D. Y. Tsipenyuk, “Vacuum Technology Physical Methods, Instruments and Measurements,” *Encycl. Life Support Syst.*, vol. III, 2004.
- [6] S. Abdel-Samad, “Status and performance of MGC-20 cyclotron vacuum system,” *Vacuum*, vol. 82, no. 11, pp. 1241–1245, 2008, doi: 10.1016/j.vacuum.2008.01.054.

- [7] V. D. Chaudhari and A. D. Desai, "Performance Evaluation of Vacuum System: Pump-down Time," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 2, no. 11, pp. 1–4, 2011, [Online]. Available: <http://www.ijser.org>.
- [8] N. Marquardt, "Introduction to the principles of vacuum physics," no. 1661, pp. 1–24.
- [9] P. Huang, H. Zhao, H. Ding, X. Cheng, and W. Chen, "Design and test of vacuum system for 40 T hybrid magnet superconducting outsert of China," *Vacuum*, vol. 203, no. April, p. 111300, 2022, doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111300.
- [10] Leybold, "Innovative Vacuum Solutions for heat-treatment furnaces Vacuum solutions – optimized by experience."
- [11] Leybold, "High Vacuum Pumps," 2016.