

Caracterización de métodos de vacío y evaluación de la calidad del mismo mediante mediciones de presión y transferencia de calor

Hugo Ernesto Sosa, Bautista Martín Bello

Laboratorio IV - Dto. de Física - Universidad de Buenos Aires

huguito.ernest@gmail.com, bautistamartinbello@gmail.com

13 de septiembre de 2022 - Informe N°1 - Entrega N°1

En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos durante ensayos de vacío en donde se caracteriza la calidad del mismo a través de distintas técnicas. La presión final de la cámara de prueba, o recinto donde queremos generar el vacío, no solo dependerá de la potencia de las bombas utilizadas sino también de las características de las perdidas o des-gases. En el presente trabajo se consiguieron valores de vacío del orden de las décimas de micro bares a través de una bomba mecánica de paletas y una bomba difusora de aceite. Con el objeto de caracterizar la calidad del vacío conseguido, se midió en una primera etapa, la evolución temporal de la presión con las bombas apagadas para determinar la preponderancia de fugas o desgase y, en una segunda etapa, la transferencia de calor de una lámpara dentro de la cámara con el objeto de distinguir la componente por convección presente en dicho proceso de transferencia.

1. Introducción

1.1. Interpretación macroscópica de vacío y generalidades

El término "vacío" se refiere a un espacio lleno con gases a una presión menor que la atmosférica. Hay una clasificación de los grados de vacío dependiendo del valor de la presión que el gas ejerza. Estos son: el Bajo vacío que oscila entre los 10^3 mbar y los 10^0 mbar; el Mediano vacío que oscila entre los 10^0 mbar y los 10^{-3} mbar. Por debajo de estas presiones se considera Alto vacío y Ultra-alto vacío.

Para poder realizar vacíos se necesita de recipientes herméticamente sellados, de lo contrario se tendrán desgases y/o pérdidas, y de generadores de vacíos o bombas de vacío. Hay de varios tipos: Bombas mecánicas, mecánicas Roots", de difusión, tubomolecular, iónica, criogénica, etc. Cada una con mayor complejidad y capacidad de generar vacíos más "intensos".

1.2. Generación de vacío con bomba mecánica y bomba difusora

La bomba mecánica de paleta rotatoria que se muestra en la Figura 1, consiste en un espacio cilíndrico (estator) en cuyo interior gira excéntricamente un cilindro de diámetro menor (rotor).

Las paletas son mantenidas en contacto con las paredes del estator por medio de resortes. El volumen encerrado entre la entrada y la paleta aumenta al girar el rotor (cuadros A y B), por lo tanto el gas se mueve hacia esta área. Dicho gas es luego aislado y la paleta comienza a comprimirlo (cuadro C), y finalmente es expulsado al abrirse la válvula de descarga (cuadro D).

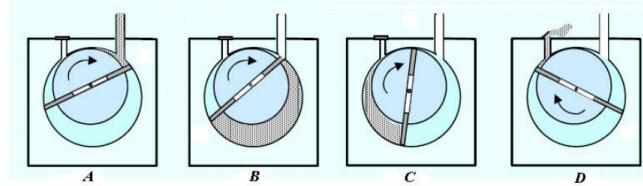


Figura 1: Esquema bomba de paleta rotatoria

Luego, el funcionamiento de las bombas Roots es similar, como puede verse en la Figura 2, a de la bomba de paleta rotatoria. Pero en este caso el aire es arrastrado hacia fuera por dos piezas en forma de ocho que giran en sentidos opuestos. El rango de esta bomba es de 1mBar a 10^{-3} mBar. Tiene una mayor velocidad de bombeo que la anterior, pues los émbolos giran a gran velocidad (1000-3000 r.p.m.)

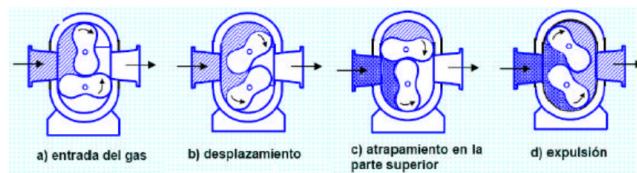


Figura 2: Esquema bomba Root

En una bomba de difusión de aceite (ver Figura 3) las moléculas de gas son arrastradas hacia abajo por medio de colisiones con moléculas de vapor de aceite y liberadas a través de una boca de descarga . El aceite se calienta en la parte inferior, asciende por las chimeneas y es liberado hacia abajo a través de orificios (toberas). Al chocar con las paredes refrigeradas, se condensa y vuelve al calentador por acción de la gravedad. Para el correcto funcionamiento es necesario que la boca de aspiración y la boca de descarga se encuentren a una presión aproximada máxima de 0,1 y 0,5 mBar respectivamente, por lo cual es necesario el uso de bombas rotatorias de apoyo. El rango de trabajo de estas bombas es de 10^{-3} y 10^{-7} mBar.

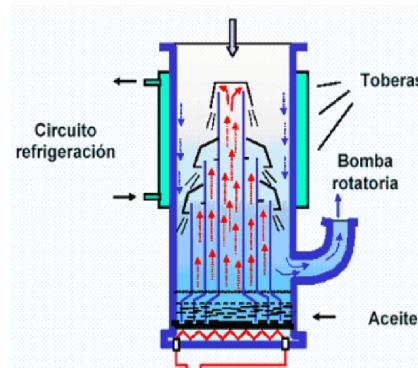


Figura 3: Esquema bomba de difusión de aceite

1.3. Modelos de perdida y desgase

Se pretende modelar la evolución de la presión en el recinto. Para esto usaremos como hipótesis, la consideración del aire que se extrae del recinto como un gas ideal. A temperatura constante es valido considerar al caudal como:

$$Q = \frac{d(PV)}{dt} \quad (1)$$

Otra definición útil es la del "flujo volumétrico" S , que no es mas que el volúmen de fluido que atraviesa una sección A por unidad de tiempo.

$$S = \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

En otras palabras, S va a ser la velocidad de bombeo. Luego, es fácil ver que si P es constante el caudal es:

$$Q = PS \quad (3)$$

En un conductor pasivo (caño, orificio, válvula) el caudal es proporcional a la diferencia de presión entre la entrada y la salida. Por lo tanto, en este tipo de dispositivo, el caudal Q se puede denotar como:

$$Q = L(P_s - P_e) \quad (4)$$

Donde P_e y P_s son las presiones de entrada y salida y L es una constante de proporcionalidad llamada *conductancia*.

Ahora bien, para analizar como varia la cantidad de gas dentro de un recinto en función de los caudales entrantes y salientes se hace uso de la Figura 4.

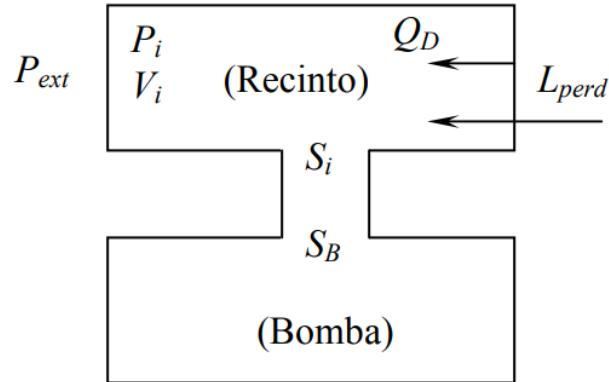


Figura 4: Sistema ideado para analizar el caudal neto en un recinto debido a bombeo, pérdidas y desgase.

Teniendo en cuenta esto, podemos expresar el caudal que sale del recinto como:

$$-\frac{d(P_i V)}{dt} = P_i S_i - L_{perd}(P_{ext} - P_i) - Q_d \quad (5)$$

donde S_i es la velocidad de bombeo, L_{perd} es la conductancia de pérdidas, Q_d el caudal de desgase de las paredes del recinto y P_{ext} es la presión externa.

Resolviendo esta ecuación diferencial (5) para un volumen constante, la presión en función del tiempo queda de la forma más general:

$$P(t) = P_f + (P_0 - P_f)e^{-\frac{(S_i + L_{perd})}{V}t} \quad (6)$$

Asumiendo que la velocidad de bombeo domina la dinámica frente al desgase y las perdidas, una solución de la ecuación 5 para la evolución temporal de la presión viene dada por:

$$P(t) = (P_0 - P_f)e^{-\frac{S_i}{V}t} + P_f^- \quad (7)$$

Hay que tener en cuenta que esta última excepción deja de valer en el régimen estacionario. Por otro lado, en el rango en donde S_i no depende tanto de la evolución $P(t)$, es decir antes del estacionario y lejos de la condición inicial puede tomarse S_i como constante y aproximarse por su valor en el estacionario dado por:

$$S_i \approx \frac{L_{perd}P_{ext} + Q_d}{P_f} \quad (8)$$

Por último, en ausencia de bombeo, la evolución temporal de la presión depende del desgase, de las perdidas o de ambas. En el caso de que predominen las perdidas por sobre el desgase, la presión viene dada por:

$$P(t) = (P_0 - P_{ext})e^{-\frac{-L_{perd}}{V}t} + P_{ext} \quad (9)$$

Por otro lado, si lo que predomina es el desgase de las paredes frente a las perdidas la presión viene dada por:

$$P(t) = \frac{Q_d}{V}t + P_0 \quad (10)$$

1.4. Modelo de convección y radiación

Hay tres formas de transferir el calor (Q , no confundir con caudal), estas son: conducción, convección y radiación, siempre de un cuerpo más caliente a otro más frío (2da ley de la termodinámica). La convección se produce únicamente por medio de materiales, la evaporación del agua o fluidos. La convección en sí es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido.

Se denomina radiación térmica o radiación calorífica a la radiación emitida por un cuerpo debido a su temperatura. Esta radiación es radiación electromagnética que se genera por el movimiento térmico de las partículas cargadas que hay en la materia.

Supongamos que queremos conocer la transferencia de calor a una muestra cualquiera debido a la absorción de luz incidente de potencia P_0 . La ecuación es entonces:

$$\frac{dQ}{dt} = P_0 - P \quad (11)$$

Donde $P=R+K$, R es la perdida por radiación de la muestra misma y K las perdidas por convección.

Se deriva de la ley de radiación de Stefan– Boltzmann que R se expresa como:

$$R = A\epsilon\sigma\Delta T^4 \quad (12)$$

Donde A es la superficie de la muestra, la emisividad ($\epsilon=1$ si la muestra está pintada de negro) y σ es la constante de Boltzmann.

El término de convección K , se define por la ley experimental de enfriamiento de Newton

$$K = hA\Delta T \quad (13)$$

Donde h es un parámetro característico que depende del flujo del fluido cerca de la superficie de la muestra, de las propiedades del fluido y de la geometría de la muestra.

La variación de temperatura de la muestra puede obtenerse de

$$Q = cV\rho\Delta T \quad (14)$$

Donde V es el volumen de la muestra, c el calor específico y ρ la densidad de la muestra. Luego, derivando (14) respecto al tiempo, sustituyendo en (11) y usando (12) y (13), se obtiene:

$$\frac{\Delta T}{dt} + \gamma\Delta T^4 + \beta\Delta T = \alpha \quad (15)$$

siendo

$$\alpha = \frac{P_0}{cV\rho} \quad \beta = \frac{hA}{cV\rho} \quad \gamma = \frac{A\epsilon\sigma}{cV\rho} \quad (16)$$

Es de notar que, la ecuación diferencial (15) no tiene resolución analítica, por lo que se utilizará métodos numéricos para adquirir los parámetros. Por otro lado si aproximamos R por $R \approx A\epsilon\sigma T_{amb}^3 \Delta T$, entonces ahora la ecuación diferencial 15 nos queda simplemente como:

$$\frac{\Delta T}{dt} + \beta\Delta T = \alpha \quad (17)$$

donde ahora $\beta = \frac{A(4\epsilon\sigma T_{amb}^3 + h)}{cV\rho}$ y la solución a la ecuación 17 al encender la lámpara viene dado por:

$$\Delta T(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (18)$$

$$\text{donde } \tau = \frac{AL}{2\beta V\rho} = \frac{Lc}{2(4\epsilon\sigma T_{amb}^3 + h)} \quad (19)$$

Esta última expresión de τ puede reescribirse como $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_K}$ donde $\tau_R = LC/8\epsilon\sigma T_{amb}^3$ y $\tau_K = LC/2h$. Y al apagar la lámpara la temperatura evoluciona como:

$$\Delta T(t) = \frac{\alpha}{\beta} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (20)$$

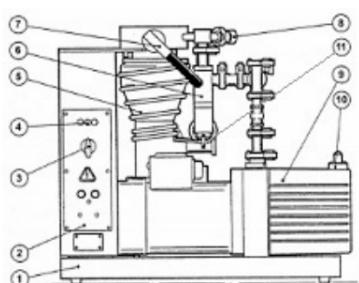
1.5. Objetivos

- Generar bajo y mediano vacío mediante bomba mecánica y bomba difusora
- Caracterizar las bombas y la cámara de vacío, velocidad de bombeo, de pérdida y de desgase.
- Estudiar la radiación y la convección térmica en condiciones de CNPT, bajo y mediano vacío.

2. Desarrollo experimental

2.1. Generación de bajo y mediano vacío

Para realizar los vacíos y medir la presión se utilizó el instrumental que se muestra en la Figuras 5a y 5b. La cual cuenta con un manómetro (marca Edwards modelo WRG-S-NW25 D14701000) el cual se conecta a su controlador digital de la misma marca, y este se conecta a la computadora para obtener los datos de la presión en función del tiempo.



(a) Esquema de las bombas

1. Soporte
2. Caja de control eléctrica
3. Llave de control
4. Luces indicadoras
5. Bomba difusora
6. Válvula
7. Válvula de aislamiento alto vacío
8. Válvula de entrada de aire
9. Bomba mecánica
10. Descarga de la bomba mecánica
11. Válvula bypass



(b) Máquina utilizada

Figura 5: Bomba mecánica y difusora

Inicialmente nos interesa generar un vacío solo con la bomba mecánica y llegar a un estado estacionario, esto es cuando la presión permanece constante. Para ello, se requiere la válvula bypass (Item (11) de la Figura (5a)). Esta válvula permite tres posiciones: Roughing, Backing y el punto medio. En la posición Roughing se hace bypass de la difusora. En la posición backing se hace vacío a través de la bomba difusora en la cámara de vacío y en la posición media se aísla la bomba mecánica del resto del sistema. Una vez seleccionada la posición Roighing, se cierra la válvula de aislamiento de alto vacío o válvula plato (Item(7)) la cual aísla la bomba difusora de la cámara de vacío. Solo se puede abrir si la presión en el conducto o cámara de vacío es del orden de $10^{-2} mBar$. Luego, se enciende la bomba mecánica posicionando la llave de control (Item (3)) en posición ROTARY PUMP, comenzando así la generación de vacío y la colección de los datos de la presión.

Posteriormente, se quiere realizar la misma experiencia pero para un vacío mas intenso, para ello se utiliza la bomba difusora. Primero hay que llegar al nivel de vacío mencionado. Luego,

hay que colocar la válvula bypass en la posición Backing, abrir la válvula plato y esperar a que vuelva a restablecerse el vacío, pues al abrir la válvula la presión que contiene dentro es la atmosférica. Una vez realizado esto, se enciende la difusora colocando la llave de control en posición R. PUMP & DIFF. STAK.

2.2. Radiación y convección

Para esta experiencia, se utilizó el mismo instrumental que la experiencia anterior pero también se requirió de una lámpara dicroica de 50W alimentada por una fuente corriente continua (marca Insteek modelo GPR-3060D), una muestra para calentar que no es más que un disco de cobre pintado de negro de diámetro $D = (35,05 \pm 0,01)mm$ y altura $H = (5,83 \pm 0,01)mm$. El disco se encuentra suspendido (sin ponerse en contacto con las paredes del recinto mediante dos alambres y se conecta a una termocupla con conexión a un multímetro para registrar la temperatura en función del tiempo. Todo lo explicado se puede visualizar en la Figura 6.

Enciendo los dispositivos y la lámpara se registra la elevación de temperatura. Luego, apagando la lámpara se registra la disminución de la temperatura.

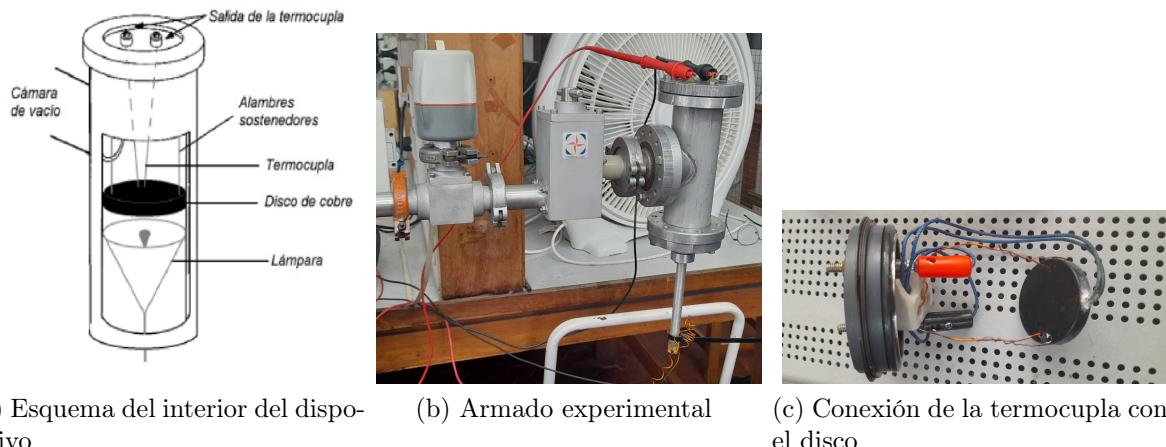


Figura 6: Esquema y armado experimental

3. Resultados y discusiones

3.1. Evaluación de perdidas - Resultados obtenidos Etapa I

Como primer etapa se evaluó la preponderancia de perdidas o desgase al apagar la bomba mecánica luego de conseguir presiones del orden de los $26\mu bar$, que es cuando se alcanza el estado estacionario. En la Figura 7 se muestra la evolución de la presión en el recinto hasta conseguir el valor mencionado.

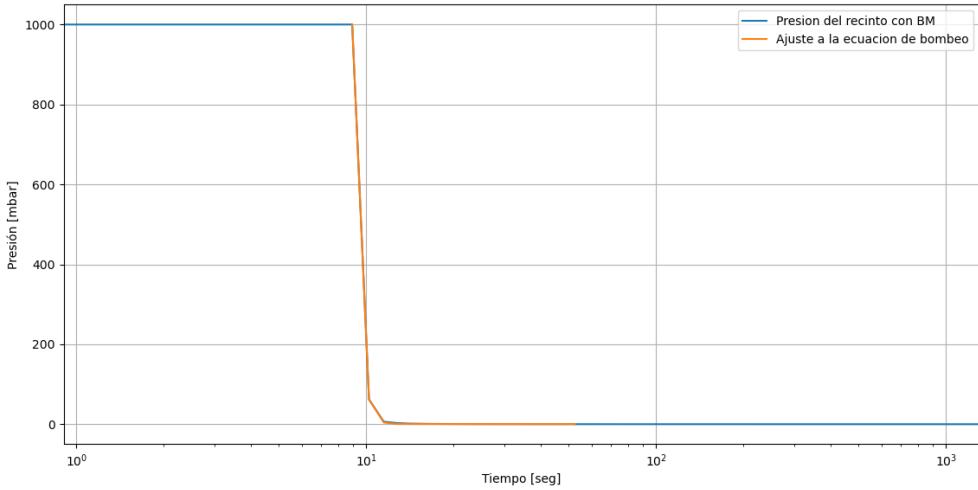


Figura 7: Evolución temporal de la presión al encender la bomba mecánica.

El modelo de ajuste viene dado por la ecuación 7 de bombeo y los parámetros obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Parámetro	Valor	Desvío	Bondad R^2
$\frac{S_i}{V}$ [1/s]	2,17	0,01	0.999

Tabla 1: Parámetros de ajuste al modelo de bombeo

Cuando la presión se estabilizó, se procedió a pagar la bomba mecánica y estudiar la evolución. En la Figura 8 puede verse como aumenta la presión levemente en el recinto.

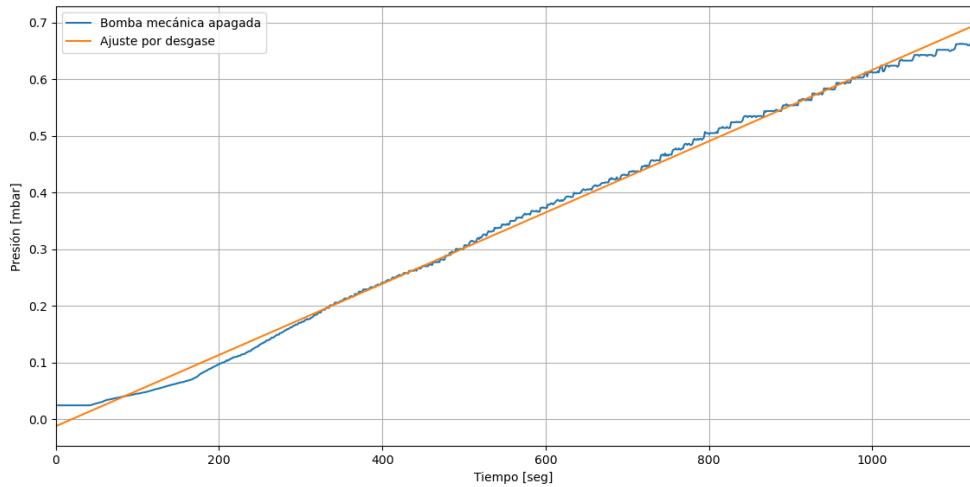


Figura 8: Evolución temporal de la presión al apagar la bomba mecánica.

Como puede verse en la Figura 8 las pérdidas se ajustan bien al modelo de desgase expuesto por la ecuación 10. En la Tabla 2 se encuentran los parámetros de ajuste obtenidos según el modelo de la ecuación 10.

Parámetro	Valor	Desvío	Bondad R^2
$\frac{Q_d}{V}$ [mbar/s]	$6,26E^{-4}$	$0,01E^{-4}$	0.996

Tabla 2: Parámetros de ajuste al modelo de desgase

Una vez estudiado el vacío generado por la bomba mecánica, se procedió a estudiar el vacío generado por la difusora. Por ende, se volvió a encender la bomba mecánica como se observa en la Figura 9.

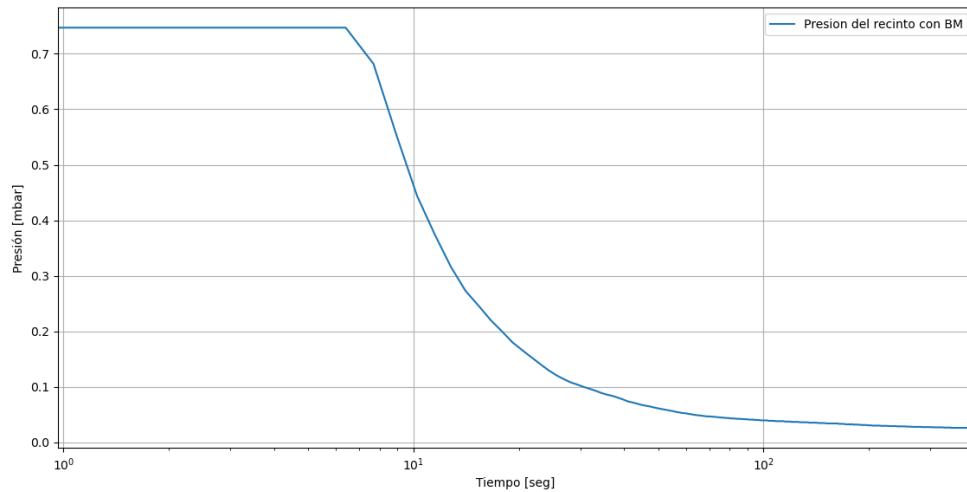


Figura 9: Evolución temporal de la presión al encender por segunda vez la bomba mecánica.

Una vez estable la presión en el mismo valor de $26\mu bar$, se procedió con el encendido de la bomba de difusión de aceite.

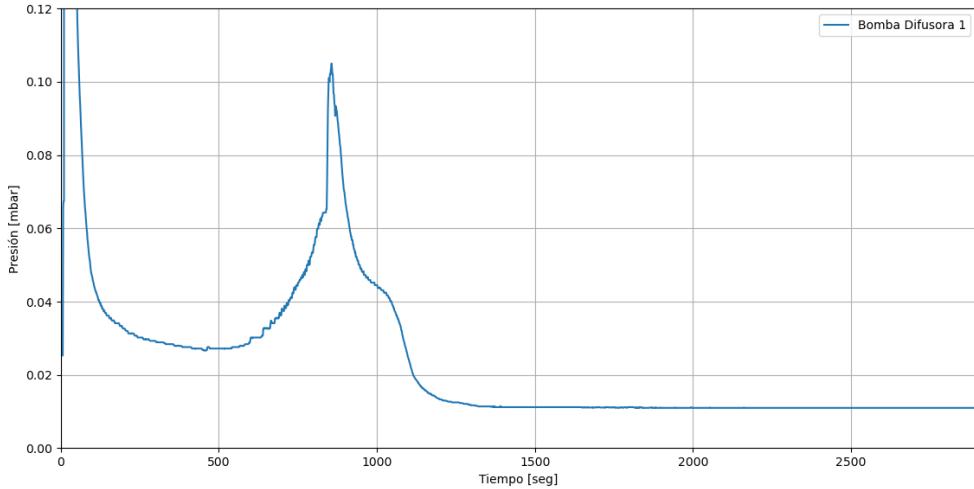


Figura 10: Evolución temporal de la presión al encender la bomba difusora de aceite.

Como puede verse en la Figura 10, a partir de los 500seg aproximadamente se enciende la bomba difusora y la presión aumenta debido al aumento de temperatura producido por el calentamiento del aceite en la base de la bomba. Aproximadamente a partir de los 800seg la bomba comienza a condensar vapor de aceite arrastrando aire del recinto y produciendo así una disminución en la presión. Por alguna razón la presión no bajo a los valores esperados, que eran del orden de los $1\mu Bar$, sino que se stabilizó entorno a los $10\mu Bar$. Se asume que la bomba difusora es defectuosa.

Con el objeto de caracterizar el comportamiento del desgase y las perdidas a esos ordenes de presión se apagó la bomba difusora hasta alcanzar un régimen estacionario y luego se volvió a encender. En la Figura 11 se muestra la evolución de la presión correspondiente a dicha maniobra.

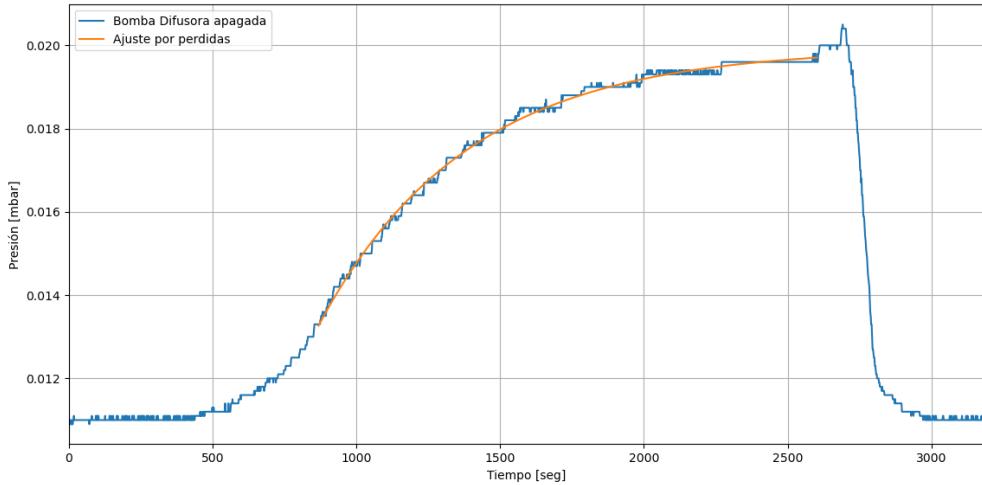


Figura 11: Evolución temporal de la presión al apagar la bomba difusora de aceite.

Como podemos ver en la Figura 11 y en la Tabla 3, la evolución de la presión se ajusta el modelo de perdidas expuesto en la ecuación 9.

Parámetro	Valor	Desvío	Bondad R^2
$\frac{-L_{perd}}{V}$ [1/s]	$1,94E^{-3}$	$0,01E^{-3}$	0.987

Tabla 3: Parámetros de ajuste al modelo de perdidas

Luego de los 2600seg se vuelve a encender la bomba difusora consiguiendo, 400seg después, el mismo valor de presión que se obtuvo antes de apagar la bomba difusora. Si bien la inercia térmica del equipo es alta, la variación de temperatura introducida al apagar la bomba podría estar influyendo en la evolución de la curva de presión. Por lo que puede no ser correcto ajustar dicha curva al modelo de perdidas.

Es interesante notar que, cuanto mayor es la diferencia de presión entre la cámara de vacío y el medio ambiente, más relevante se vuelve el factor de pérdida por sobre el desgase. Tal como indican las Figuras 8 y 11.

3.2. Transferencia de calor - Resultados obtenidos Etapa II

En esta etapa se evaluó la transferencia de calor de la lámpara dicroica (a 34 Watts) hacia una pastilla termoresistora tipo RTD en condiciones normales de presión y luego en vacío medio. En la Figura 12 podemos ver la evolución de la temperatura al encender la lámpara en CNP.

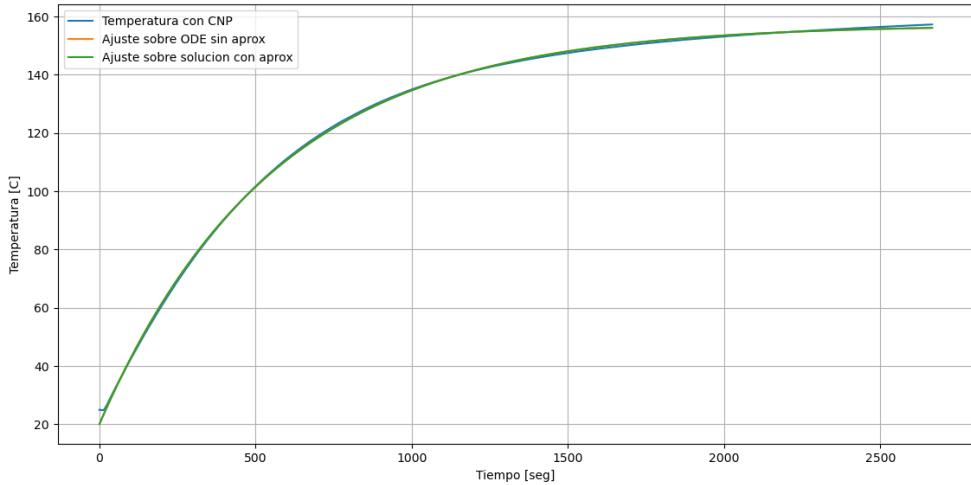


Figura 12: Evolución temporal de la temperatura al encender la lámpara.

En la Tabla 4 podemos ver los parámetros de ajuste de convección al modelo expuestos por las ecuaciones 15 y 18 con bondades de ajuste R^2 de 0,984 y 0,984 respectivamente.

Parámetro	Valor	Desvío
α [C/s]	$2,82E^{-1}$	$0,01E^{-1}$
β [1/s]	$1,79E^{-3}$	$0,01E^{-3}$
γ [1/(sC ³)]	$1,85E^{-12}$	$1,33E^{-12}$
τ [s]	554	1

Tabla 4: Parámetros de ajuste al modelo de transferencia de calor

Luego se apagó la lampara y se observó la evolución de la temperatura como se muestra en la Figura 13.

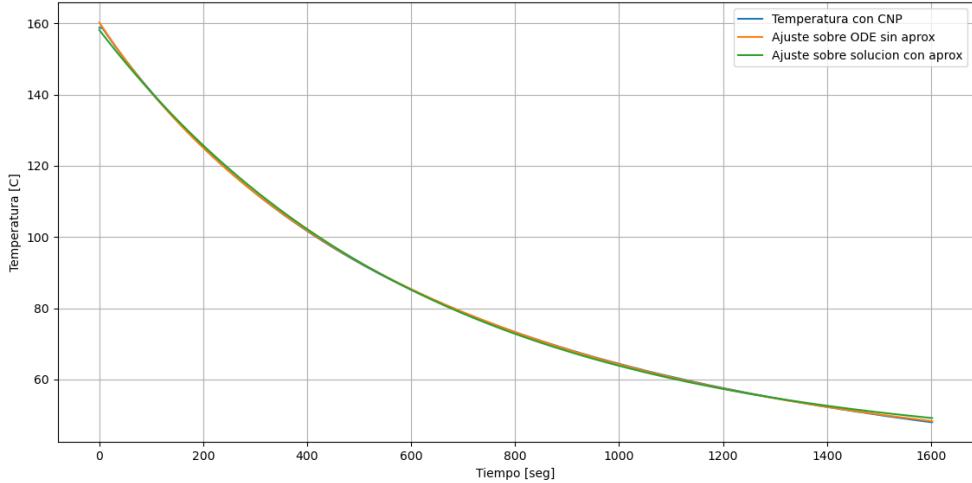


Figura 13: Evolución temporal en CNP de la temperatura al apagar la lámpara.

En la Tabla 5 podemos ver los parámetros de ajuste de convección a los modelos expuesto por las ecuaciones 15 y 20 con bondades de ajuste R^2 de 0,99 y 0,989 respectivamente.

Parámetro	Valor	Desvío
α [C/s]	$2,82E^{-1}$	$0,01E^{-1}$
β [1/s]	$1,79E^{-3}$	$0,01E^{-3}$
γ [1/(sC ³)]	$1,85E^{-12}$	$1,33E^{-12}$
τ [s]	623	1

Tabla 5: Parámetros de ajuste al modelo de transferencia de calor

De las Tablas 4 y 5 puede verse que el tiempo de relajación del sistema es aproximadamente 130 s mas lento al apagar la lámpara, lo cual es esperable.

Con el objeto de observar una diferencia en el tiempo característico τ , se encendió nuevamente la lámpara, pero esta vez con el recinto a vacío medio. En la Figura 14 en la que se muestran además los ajustes a los modelos de las ecuaciones 15 y 18 obteniendo una bondad de ajuste R^2 de 0,978 y 0,978 respectivamente.

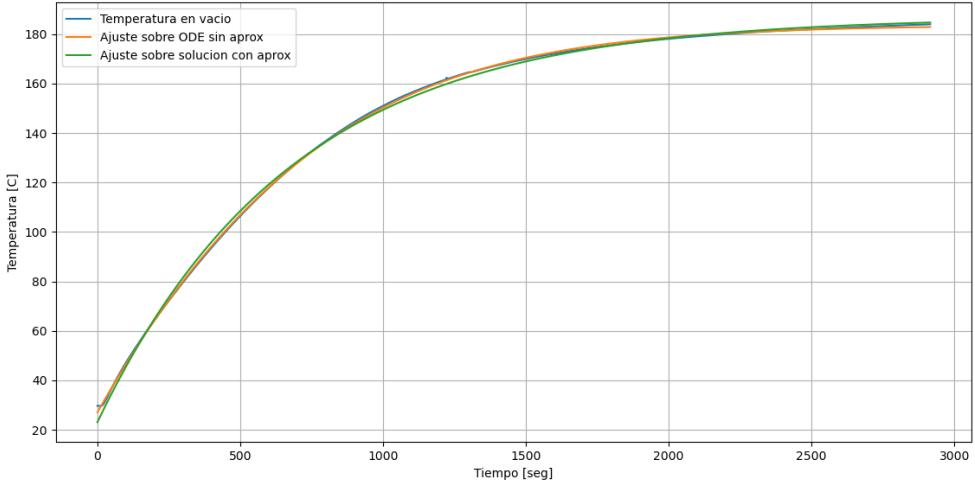


Figura 14: Evolución temporal en vacío de la temperatura al encender la lámpara.

En la Tabla 6 podemos ver el resultado los ajustes. Donde α , β y γ fueron obtenidos al optimizar los parámetros de la ecuación diferencial 15. Mientras que el parámetro τ fue obtenido del ajuste a la solución de la ecuación 18.

Parámetro	Valor	Desvío
α [C/s]	$2,34E^{-1}$	$0,01E^{-1}$
β [1/s]	$1,03E^{-3}$	$0,01E^{-3}$
γ [1/(sC ³)]	$3,95E^{-11}$	$0,04E^{-11}$
τ [s]	678	1

Tabla 6: Parámetros de ajuste al modelo de transferencia de calor

Luego se apagó la lámpara y se observó la evolución de la temperatura como se muestra en la Figura 15.

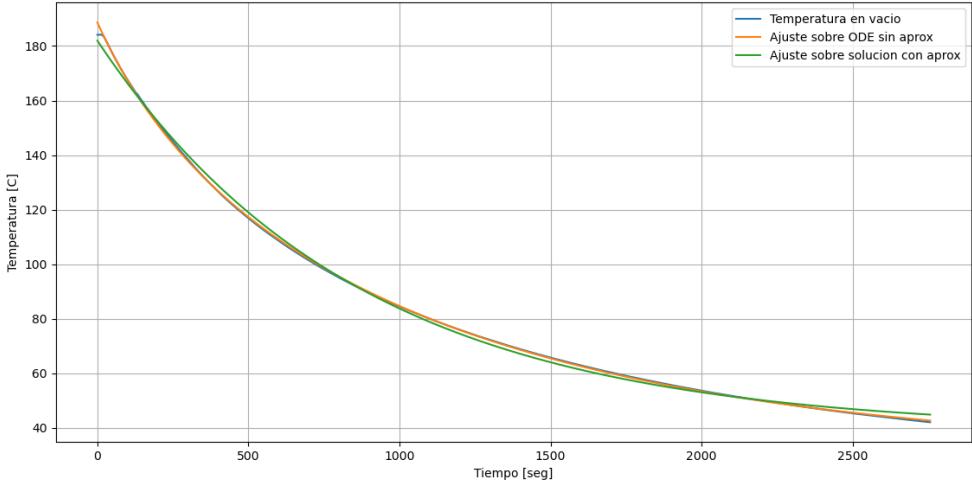


Figura 15: Evolución temporal en vacío de la temperatura al apagar la lámpara.

En la Tabla 7 podemos ver los parámetros de ajuste de convección a los modelos expuestos por las ecuaciones 15 y 20 con una bondad de ajuste R^2 de 0,981 y 0,978 respectivamente.

Parámetro	Valor	Desvío
α [C/s]	$2,82E^{-1}$	$0,01E^{-1}$
β [1/s]	$1,79E^{-3}$	$0,01E^{-3}$
γ [1/(sC ³)]	$1,85E^{-12}$	$1,33E^{-12}$
τ [s]	860	3

Tabla 7: Parámetros de ajuste al modelo de transferencia de calor

Aquí sucede lo mismo con el valor de τ que en el caso de enfriamiento en CNP. En vacío, el tiempo de relajación del sistema cuando se enfria es más largo que el tiempo característico durante el calentamiento.

De los valores de los τ podemos ver que son congruentes con el marco teórico. Si reescribimos la ecuación 19 como:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_K}$$

Podemos ver que al hacer vacío, el segundo término de esta expresión se hace menos importante y necesariamente el valor de τ tiene que aumentar.

Que el tiempo característico sea más grande en vacío, puede interpretarse como que al sistema le cuesta más disipar la potencia por convección ya que la cantidad de aire es menor. Además, podemos ver claramente en las Figuras 12 y 14 que si bien el tiempo característico es más alto en vacío, es decir el sistema responde más lento, las temperaturas alcanzadas son más altas también, ya que de nuevo, al no haber tanta disipación por convección esto se traduce en un estacionario más alto.

Un τ mas grande no necesariamente implica que el sistema calienta la pastilla mas lento, ya que el valor estacionario en vacío es mas alto.

Por otro lado, analizando los τ correspondientes a cuando la lámpara se apaga. Podemos observar que hay una diferencia de aproximadamente 230 segundos. Si asumimos que para el vacío, el aporte del segundo termino en la ecuación 19 es despreciable, podemos aproximar $\tau \approx \tau_R$, usando el valor de τ de la Tabla 7. Esto nos permite estimar el valor de τ_K como:

$$\tau_K = \frac{\tau_R \tau_{CNP}}{\tau_R - \tau_{CNP}} \approx 2261 \text{ s} \quad (21)$$

Sabiendo que $\tau_K = \frac{Lc}{2h}$, podemos estimar h en CNP como:

$$h = \frac{Lc}{2\tau_K} \approx 502 \frac{Jm}{KgC} \quad (22)$$

4. Conclusión

En la sección 3.1 se pudo caracterizar a las bombas de vacío, esto es solo posible gracias a la comprensión que se tiene acerca de la evolución de la presión en un volumen determinado (sección 3.1). Es decir, se pudo corroborar el funcionamiento del modelo utilizado. También se puede afirmar que el factor de pérdida se vuelve más significativo entre mayor es la diferencia de presión. Por otro lado, en vacío medio generado con la bomba mecánica el término de desgase es el preponderante. Para mejorar la experiencia, se debería contar con una bomba de difusión no defectuosa.

En la sección 3.2 se corroboró la hipótesis de cuanto mas intenso el vacío, más rápido será el aumento de temperatura y mayor sera el máximo. A su vez, más lenta será la disminución de la temperatura en el vacío.

Finalizando, se pudo analizar como afecta el nivel de vacío generado a la transferencia de calor que se efectúa dentro del recinto de pruebas. Si bien al generar vacío, la masa de aire es menor en el recinto, pareciera que el sistema adquiere una inercia térmica adicional cuando las perdidas son solo por radiación. Por lo que una estimación en tiempo real de h en función de P podrían ser útiles a la hora de cuantificar la calidad del vacío que se este generando en un recinto.

5. Bibliografía

- [1] Carlos Acha (2016), Departamento de Física -FCEyN-UBA e INFIP-CONICET. Técnicas de vacío. URL: <http://materias.df.uba.ar/lab04Ba2016c1/files/2016/03/vacioLabo4Acha.pdf>
- [2] Departamento de Física -FCEyN-UBA e INFIP-CONICET. Introducción al vacío. URL: <http://materias.df.uba.ar/lab04Ba2016c1/files/2016/03/Vacio.pdf>
- [3] Departamento de Física -FCEyN-UBA e INFIP-CONICET. Introducción al vacío. URL: <http://materias.df.uba.ar/lab04Ba2016c1/files/2013/02/Conveccion.pdf>