

Efecto Leidenfrost

FLORENCIA RAMOS, TOMAS MASTANTUONO, AINARA FERRANTE

Grupo 8

Resumen



Sumergiendo distintos cilindros de aluminio dentro de un recipiente lleno con nitrógeno en estado líquido, el cual se encuentra en su temperatura de saturación, nos propusimos como objetivo caracterizar el flujo de calor que viaja desde el cilindro hacia al nitrógeno. Luego de realizar mediciones de la temperatura y la masa en función del tiempo logramos ver como en los primeros instantes de contacto entre el cilindro y el nitrógeno el flujo de calor que sale de este va disminuyendo rápidamente hasta que se logra formar una capa de vapor alrededor del cilindro permitiendo aislar parte del calor transmitido, y durante $(109 \pm 0,7)s$ para el primer cilindro, $(79,0 \pm 0,8)s$ para el segundo cilindro y $(69,0 \pm 0,4)s$ para el tercer cilindro el flujo de calor se mantiene aproximadamente constante. Además observamos como para el primer cilindro el efecto Leidenfrost ocurre durante un mayor tiempo respecto a los otros dos. Pasados estos tiempos vimos como este efecto mencionado colapsa rompiéndose la capa de vapor y llegando a un máximo de flujo de calor, para luego decaer hasta que se logre el equilibrio térmico. Por último, buscamos relacionar la temperatura del cilindro y la masa del nitrógeno a lo largo del tiempo, probando tres modelos distintos. Sin embargo, no se obtuvo un ajuste que permita identificar el modelo que describe el comportamiento de nuestros datos.



Introducción



La inmersión de un cuerpo a temperatura T_1 en un líquido con temperatura de ebullición $T_{sat} \ll T_1$ produce la ebullición del líquido debida a la transferencia de calor del cuerpo. Dándose durante este proceso el conocido como efecto Leidenfrost [1], el cuál consta de 6 etapas. Las cuales suelen recorrerse desde la menor a la mayor diferencia de temperatura, es decir, a medida que el tiempo avanza, aumenta la temperatura del cuerpo respecto de la del líquido. En este caso, el cuerpo se encuentra a temperatura ambiente y pierde calor hasta llegar a la temperatura del nitrógeno, yendo de mayor a menor la diferencia de temperatura.

En la sexta etapa, el término de más relevancia es la transferencia de calor en forma de radiación a través de una capa fina de vapor de nitrógeno que se forma alrededor del sólido.

En la quinta etapa la capa de vapor se estabiliza, manteniendo la transferencia de calor aproximadamente constante. Esto es lo que llamamos el efecto Leidenfrost.

A medida que disminuye la temperatura llegamos a la cuarta etapa del proceso, en la que colapsa la capa de vapor formada y se dispara la transferencia de calor, llegando a un máximo.

En la tercera etapa disminuye la transferencia y nos dirigimos a la segunda etapa donde la temperatura del cuerpo llega a la temperatura del nitrógeno y la temperatura del cilindro se vuelve constante.

La primera, llamada de convección natural, contempla una relativamente pequeña transferencia de calor del cuerpo al líquido, sin embargo, no es observable en el rango de resolución disponible de este experimento. Estas etapas se pueden visualizar en la Figura 1.

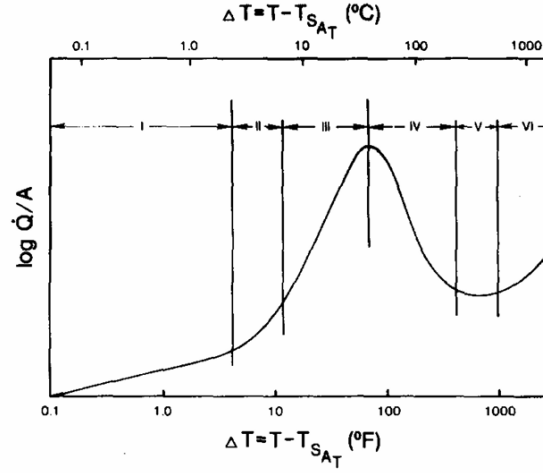


Figura 1: Las 6 etapas para un alambre de platino y agua, de “Cooling by immersion in liquid nitrogen“, Thomas W. Listerman, Thomas A. Boshinski, Lynn F. Knese, Am. J. Phys. 54, 554 (1986), sección de Introducción, Fig 1.

Para modelar el flujo de calor por unidad de área del cuerpo al líquido se utiliza en (1). En esta T es la temperatura del cuerpo sumergido, $C_p(T)$ el calor específico molar a presión constante del aluminio en función de la temperatura y n el número de moles [4].

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \left(\frac{n}{A}\right) C_p(T) \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

El C_p está relacionado con el calor específico a volumen constante, y en el rango de temperaturas de interés para este trabajo (entre 77K y 300K) podemos considerarlos aproximadamente iguales. C_v cuenta con dos términos, uno que considera la contribución fonónica C_l y otro que considera la constante electrónica. Esta última varía con la temperatura, y en el rango a estudiar tiene su mayor contribución a los 77K, donde aporta $\sim 2\%$ al total de C_l , por lo que resulta despreciable. Por ello, tomamos $C_v \sim C_l$.

Para calcular el valor de C_l consideramos el modelo de Einstein. Este considera el sólido como un continuo elástico de volumen V con N átomos y $3N$ modos normales de iguales frecuencias, y se expresa en (2), donde R es la constante de los gases ideales y θ_E es la temperatura característica de Einstein [4].

$$C_v \sim C_l = 3R \left(\frac{\theta_E}{T}\right)^2 \frac{e^{(\theta_D/T)}}{[e^{(\theta_D/T)} - 1]^2} \quad (2)$$

Por su parte, θ_E puede tomarse como en (3) para aproximar el modelo al de Debye, donde $a = 0,77$, $b = 0,26$, $c = 9,17$ y θ_D es la temperatura característica de Debye, que para el aluminio vale $\theta_D = 428\text{K}$ [4].

$$\theta_E = \theta_D [a + b e^{-cT/\theta_D}] \quad (3)$$

En este trabajo se busca caracterizar las etapas de este efecto para el caso de tres cuerpos cilíndricos de distintas geometrías a temperatura ambiente sumergidos en nitrógeno líquido. En estos casos, la temperatura del cuerpo es la del ambiente $T_1 \sim 300\text{K}$ y la temperatura de ebullición

del nitrógeno $T_{NL} = 77\text{K}$. Buscamos caracterizar el fenómeno de Leidenfrost a partir del estudio del flujo de calor transmitido por cada cilindro según su temperatura relativa al nitrógeno líquido.

Además buscamos una relación entre la variación de temperatura de los cilindros al ponerse en contacto con el nitrógeno en estado líquido y la pérdida de masa del nitrógeno debido a que el calor que recibe el nitrógeno para cambiar de fase es el calor entregado por el cilindro al estar en contacto y el que recibe del ambiente al estar el termo destapado, es decir, $Q_{lat} = Q_{cil} + Q_{amb}$. Juntando esto con el calor necesario para que un Δm de nitrógeno cambie de estado, tenemos la ecuación (4).

$$Q_{cil} = L\Delta m - Q_{amb} \quad (4)$$

Tomando esta relación, si la derivamos respecto del tiempo y consideramos que la superficie de nitrógeno que está expuesta al ambiente no varía a lo largo del experimento y que el ambiente es una fuente térmica, podemos estimar que la contribución de calor del ambiente varía despreciablemente a lo largo del tiempo. Juntando esta ecuación con (1) logramos obtener (5) que nos habla de una relación entre la temperatura del cilindro y la masa perdida por el nitrógeno, donde n es el número de moles correspondientes al material del cilindro, $C_P(T)$ está definido por (2) y L es el calor latente vinculado al nitrógeno en estado líquido.

$$m \frac{n C_P(T)}{L} T = \frac{n}{L} 3R^2 \frac{\theta_E^2 e^{\theta_E/T}}{T(e^{\theta_E/T} - 1)^2} \quad (5)$$

✓ Desarrollo experimental

Para este trabajo utilizamos tres cilindros de aluminio, cada uno distinto del otro en cuanto a su forma y detalles, un termo el cual llenamos con nitrógeno líquido, una NI-DAQ USB-6210, una balanza y una termocupla tipo K [2].

El montaje se muestra en la Figura 3. Colocamos el termo con nitrógeno, y dado que queríamos conocer la temperatura del cilindro, colocamos un extremo de la termocupla en un orificio que tenía el cilindro en su cara superior, y el otro extremo lo colocamos en un tubo de ensayo con aceite, el cual se encontraba en contacto con agua con hielo. Esto último ya que utilizamos una función basada en valores tabulados que convierte los voltajes tomando como referencia la temperatura de la punta fría a 273 K. Tener la punta fría a esta referencia permitía que, con revisar que hubiese hielo en el agua, podíamos afirmar que esa punta estaba a la temperatura que queríamos.

Sobre los cilindros usados, queríamos ver el cambio en la transferencia de calor con distintas formas. El primero era un cilindro recto con hendiduras poco profundas en forma de *rayones* a lo largo de su cara lateral, este tenía un peso de 99,8 g y los dos restantes tenían hendiduras equidistantes que formaban la apariencia de discos apilados, como se puede ver en la Figura 2. Con pesos de 93,4 g y 96 g respectivamente. Todos estos tienen altura de 4,5 cm y diametro de 3,2 cm. En este trabajo asumimos que sus áreas pueden considerarse iguales.

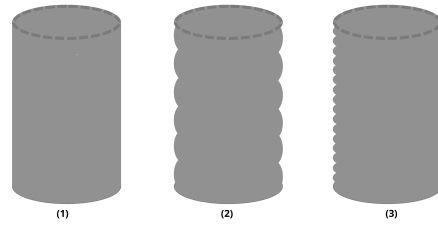


Figura 2: Cilindros de aluminio utilizados en cada experiencia. El 1 es un cilindro recto con *rayones* a lo largo de la cara lateral. El 2 y 3 son referencia a los cilindros con hendiduras equidistantes en forma de discos.

Atamos el cilindro con un hilo a una altura tal que quedase centrado en el termo, a la mitad de su altura, con el fin de poder tomar varias mediciones sin necesidad de rellenar el termo con nitrógeno luego de cada una. Esto es porque si el cilindro queda muy arriba podría evaporarse suficiente nitrógeno para que quede parte del cilindro en contacto con el aire, creando un gradiente de temperaturas en el cuerpo el cual no es contemplado por el modelo estudiado.

La termocupla fue conectada a la NI-DAQ, y esta última fue conectada junto con la balanza a la PC para la toma de datos automatizada mediante código realizado con la librería PyVISA [3].

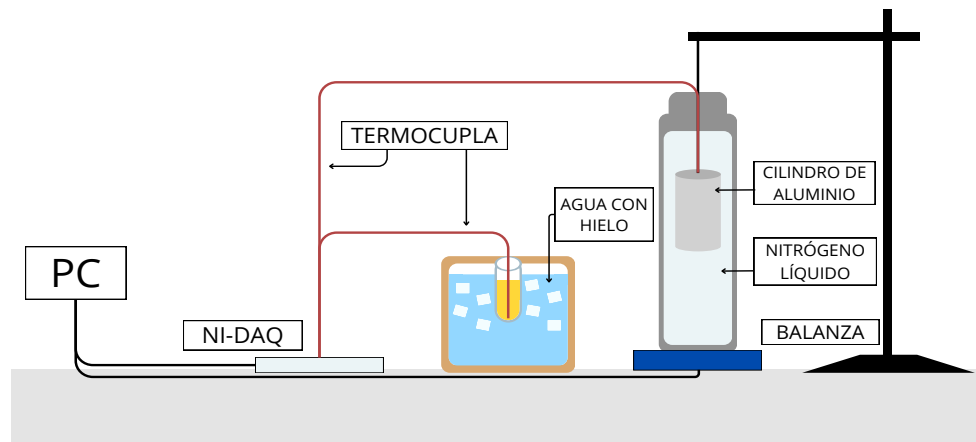


Figura 3: Esquema del montaje experimental. El termo que contiene al nitrógeno líquido se coloca encima de la balanza, y con un pie y una nuez logramos atar el cilindro tal que estuviera completamente sumergido en el nitrógeno. En la cara superior del cilindro conectamos una punta de la termocupla tipo K, y la otra punta se encontraba sumergida en aceite, en agua con hielo. La termocupla se conectaba a la NI-DAQ, y esta junto con la balanza se conectaron a la computadora mediante USB.

La termocupla mide la diferencia de temperatura entre sus puntas, y de acuerdo a esto devuelve un voltaje. Al conectarla a la NI-DAQ, logramos conseguir estos valores de voltaje en la computadora. Si uno tiene su punta fría a 273K, puede colocar la otra punta a temperaturas conocidas y calibrar la termocupla, de modo que ya se conoce qué temperatura representa tal voltaje. Con una calibración ya hecha, se puede programar que a tiempo real se convierta lo que mide la termocupla en temperaturas.

Sabíamos que la mayor temperatura que íbamos a medir era la del cilindro antes de sumergirse en nitrógeno, por lo que debería ser temperatura ambiente. Pero también queríamos considerar que podría llegar a ser un poco más que temperatura ambiente, porque al terminar una medición y sacar el cilindro lo calentábamos con una pistola de calor hasta que vuelva a su temperatura original, pero podría ocurrir que su temperatura resultara mayor de la esperado. También sabíamos que la mínima temperatura que mediríamos sería la del nitrógeno líquido, los 77K. Tener esto en cuenta nos permitió configurar el mínimo y máximo de voltaje que mediría la NI-DAQ, siendo el mínimo configurado en -6V y el máximo en 5V.

Antes de medir también debíamos definir por cuánto tiempo íbamos a tomar datos. En un principio consideramos que, como mucho, el sistema podría demorar hasta diez minutos en atravesar todas las etapas y luego se estabilice en la temperatura de saturación. Luego de un par de mediciones, notamos que demoraba menos de 10 minutos, y que para la mayoría de las mediciones a los 5 minutos ya estaba estabilizado el sistema.

Conociendo que la NI-DAQ nos permite configurar una frecuencia de muestreo de 200000 mediciones por segundo, realizamos mediciones de 0.1s, obteniendo 20000 muestras. De estas tomamos un valor promedio, y determinamos que ese valor medio era una medición representativa de este 0.1s y su error es el error asociado a promediar mediciones: la desviación estándar sobre la raíz de la cantidad de mediciones.

La balanza también devuelve voltajes, por lo que tuvimos que calibrarla usando objetos con pesos conocidos. Medimos los pesos que registraba la balanza en simultáneo con el resto de las mediciones sobre la temperatura, colocando nuestro cero de referencia sin ningún objeto sobre este. Luego, convertimos esos voltajes a gramos con la calibración que teníamos hecha. Para ver la calibración, referirse al Apéndice B.

Resultados y discusión

Para estimar los límites de las etapas en cada caso de cada cilindro nos referenciamos utilizando las curvas de Leidenfrost de flujo de calor. Conocíamos las descripciones teóricas de cada etapa, y además observamos el criterio utilizado en la Figura 1.

Utilizando la termocupla conectada a la NI-DAQ medimos la temperatura en función del tiempo, como se muestra en la Figura 4, cuya medición corresponde a la utilización del cilindro 1. La primera parte corresponde al instante en el cual se pone en contacto al cilindro con el nitrógeno en estado líquido, el cual según la medición se encontraba a una temperatura de $(282,4 \pm 6,2)\text{K}$, logrando alcanzar el equilibrio térmico en $(184,1 \pm 4,1)\text{K}$.

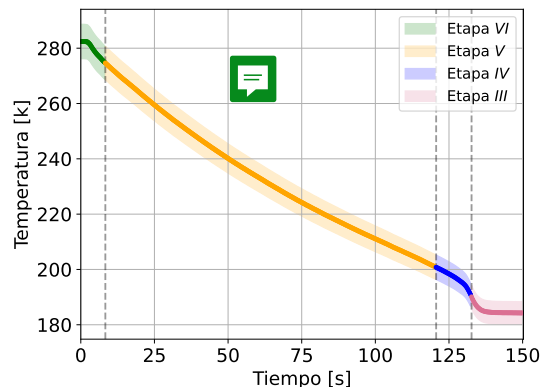


Figura 4: Temperatura en grados Kelvin en función del tiempo. Este gráfico corresponde a un cilindro con caras planas (cilindro 1), al cual se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido en su temperatura de saturación. Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

Utilizando 3 mediciones sobre el mismo cilindro (para ver estas mediciones dirigirse al Apéndice A) logramos estimar un tiempo promedio sobre la duración de cada etapa correspondiente al cilindro 1, de esta forma calculamos que la etapa VI posee una duración estimada de $(8,0 \pm 0,7)s$, la etapa V tiene una duración de $(109 \pm 0,7)s$, la etapa IV tiene una duración promedio de $(9 \pm 0,6)s$, y la duración de la etapa III corresponde a $(22 \pm 0,72)s$.

Repetimos esta misma experiencia para el cilindro 2, el cual se muestra en la Figura 12. Al igual que con la experiencia anterior se muestra un gráfico de temperatura en función del tiempo de medición, al que inicialmente se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido a su temperatura de saturación, el cual según la medición se encontraba a una temperatura de $(317,0 \pm 7,0)K$, logrando alcanzar el equilibrio térmico a los $(95,0 \pm 2,1)K$.

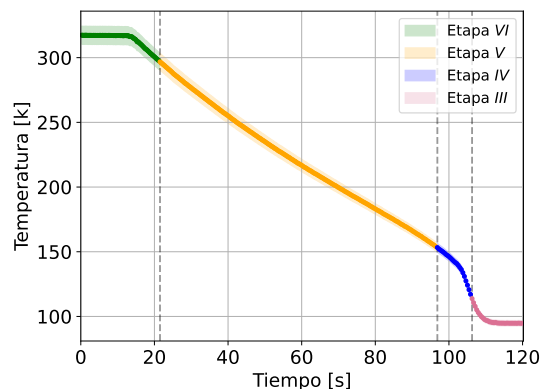


Figura 5: Temperatura en grados Kelvin en función del tiempo. Este gráfico corresponde a un cilindro con hendiduras equidistantes y pronunciadas (cilindro 2), al cual se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido en su temperatura de saturación. Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

Al igual que con el cilindro 1, logramos estimar un tiempo promedio sobre la duración de cada etapa correspondiente realizando 3 mediciones sobre este mismo cilindro (para ver las otras

mediciones dirigirse al Apéndice A). De esta forma logramos ver que la etapa VI posee una duración estimada de $(17 \pm 1,2)\text{s}$, la etapa V tiene una duración de $(79,0 \pm 0,8)\text{s}$, la etapa IV tiene una duración de $(9,0 \pm 0,9)\text{s}$, y la etapa III le corresponde un tiempo de $(16 \pm 1,3)\text{s}$.

En la Figura 14 se muestra la temperatura en función del tiempo del cilindro 2, cuya cara estaba constituida por un conjunto de secciones circulares pronunciadas. A este se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido a su temperatura de saturación. Al momento de poner en contacto al cilindro con el nitrógeno, este se encontraba a una temperatura de $(311,3 \pm 6,8)\text{K}$, el cual después se estabilizó en una temperatura de $(102,4 \pm 2,3)\text{K}$.

En la Figura 6 se muestra la temperatura en función del tiempo del cilindro 3. En este caso el cilindro al momento de ponerse en contacto con el nitrógeno en estado líquido y temperatura de saturación, se encontraba a una temperatura inicial de $(300 \pm 6,6)\text{K}$, logrando alcanzar el equilibrio térmico a los $(90 \pm 2,0)\text{K}$.

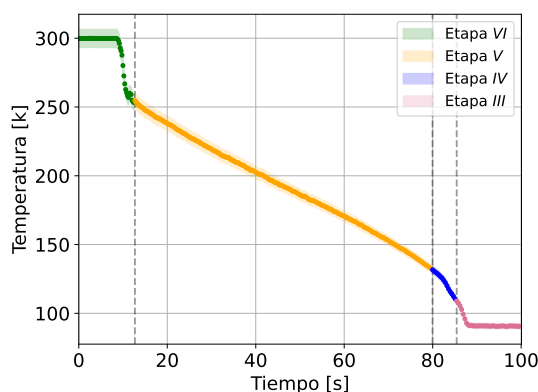


Figura 6: Temperatura en grados Kelvin en función del tiempo. Este gráfico corresponde a un cilindro con hendiduras equidistantes y poco pronunciadas (cilindro 3), al cual se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido en su temperatura de saturación. Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

De igual forma que en la experiencias anteriores, logramos estimar un tiempo promedio sobre la duración de cada etapa correspondiente realizando 3 veces la misma experiencia. Estimamos que la etapa VI posee una duración de $(12,0 \pm 0,72)\text{s}$, la etapa V una duración de $(69,0 \pm 0,43)\text{s}$, la etapa IV tiene un intervalo de $(6,0 \pm 0,64)\text{s}$, y la etapa III un tiempo de $(12,0 \pm 1,1)\text{s}$.

Podemos comparar la duración de cada etapa para los distintos cilindros, aunque hay que tener en cuenta que las etapas no están bien definidas sino que fueron estimadas. Notamos que la etapa V dura más en el cilindro 1. La etapa IV dura aproximadamente lo mismo para el cilindro 1 y 2, pero resulta más corta para el cilindro 3. Para la etapa III ocurre lo mismo que para la V: el cilindro 1 tiene la mayor duración de esta etapa, seguido por el cilindro 2 y por último el cilindro 3.

Esto lo que nos dice es que el cilindro 1 mantiene por más tiempo la capa de vapor estabilizada, es decir mantiene por un tiempo mayor que los otros cilindros el efecto Leidenfrost. El colapso de esta capa de vapor dura aproximadamente lo mismo para los cilindros 1 y 2, y parece ser ligeramente más corta en el cilindro 3.

Estas diferencias creemos que pueden ser debido a las geometrías de cada cilindro: hay que recordar que los cilindros 2 y 3 tienen hendiduras, mientras que el cilindro 1 no. Pareciera que no tener estas hendiduras permite que la capa de vapor que envuelve al cilindro pueda durar más tiempo antes de colapsar.

Teniendo en cuentas estas mediciones, las utilizamos para calcular la variación del calor respecto del tiempo por unidad de área entregado del cilindro hacia el nitrógeno, es decir, la curva de Leidenfrost. Para esto utilizamos (1), logrando obtener, para una medición con el cilindro 2, la Figura 7.

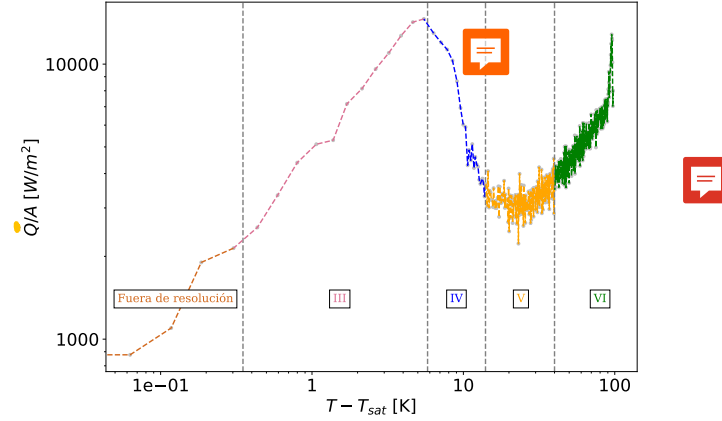


Figura 7: En la figura se muestra el flujo del calor desde el cilindro 2 hacia el nitrógeno líquido en función de la temperatura del mismo cilindro 2 respecto de la temperatura de saturación del nitrógeno en estado líquido.

En la figura se pueden visualizar con claridad desde las etapas III hasta la VI, mientras que las etapas I y II no pueden ser visualizadas debido que tenemos una pérdida de resolución en la NI-DAQ y la termocupla. La etapa V contiene gran cantidad de puntos ya que en esta se mantiene estable la capa de vapor que recubre y aísla el cilindro. Esto mantiene aproximadamente constante la transferencia de calor, y por lo tanto la variación de temperatura es lenta con respecto a otras etapas. Y anterior a la etapa V, podemos ver una subida en la transferencia de calor que podría asociarse a la etapa VI. Sin embargo, creemos que puede deberse a una convección forzada por el momento en el que se sumerge el cilindro en el nitrógeno. Ya que el mismo empieza a transferir calor al líquido y a su vez lo remueve, estando en todo momento en contacto directo con nuevo líquido que no ha sido calentado localmente todavía.

Repitiendo el mismo procedimiento para los cilindros 1 y 3, buscamos visualizar una comparativa entre las curvas de Leidenfrost de los 3 tipos de cilindros, la cual se muestra en la Figura 8.

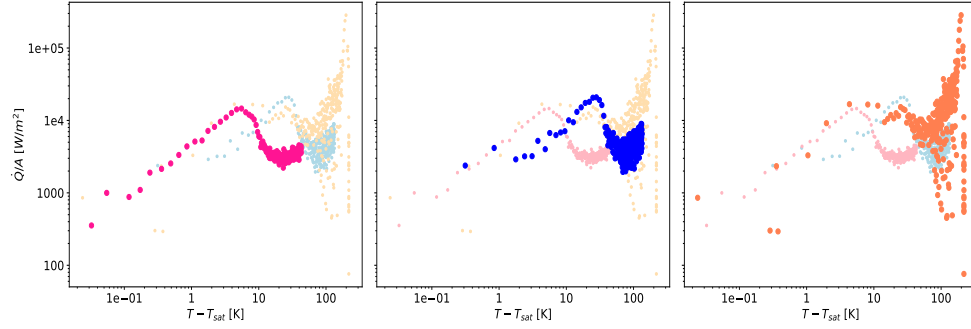


Figura 8: En la figura se muestra una comparativa visual entre las curvas de Leidenfrost correspondientes a los cilindros utilizados para las mediciones, desde el 1 hasta el 3. En cada subfigura se encuentra remarcado con su color distintivo la curva de Leidenfrost del cilindro correspondiente.

El primer gráfico de la Figura 8 corresponde al cilindro 1 con caras planas, donde por un error al momento de medir observamos que la sexta etapa de la curva de Leidenfrost comienza con una diferencia de temperatura de $(42,7 \pm 0,92)\text{K}$, cosa que no tiene sentido y suponemos que es porque el punto de referencia de la termocupla no se encontraba a una temperatura de 273K. Este desfase en el punto de referencia afecta a la curva de temperatura obtenida, debido que altera la diferencia de voltaje generada entre los extremos de la termocupla por efecto Seebeck [2]. Y las funciones polinómicas utilizadas para convertir la diferencia de voltaje medida por la termocupla a diferencias de temperatura están programadas para mediciones cuya temperatura de referencia se encuentre en los 273K. Para este experimento se obtiene una $T_{sat1} = (184,2 \pm 1,8)\text{K}$ (para ver la temperatura en función del tiempo dirigirse al Apéndice A).

El segundo gráfico corresponde al cilindro 2. Notamos que la sexta etapa comienza con una diferencia de temperatura respecto de la saturación del nitrógeno de $(133,9 \pm 2,9)\text{K}$. Este valor, si bien se aproxima mejor a lo esperado según nuestro modelo, nos permite intuir que el cilindro fue colocado a temperatura mucho menor que la temperatura ambiente. Para este cilindro se mide una $T_{sat2} = (95,0 \pm 2,1)\text{K}$. En esta curva podemos notar que la zona correspondiente a calor transferido por unidad de área se mantiene aproximadamente constante en un mayor rango de temperaturas que el cilindro 3. Esto podemos atribuirlo a que al tener un anillado de hendiduras más pronunciadas, en las uniones de estos puede quedar vapor atrapado que ayude a reducir desde un principio la superficie efectiva de contacto directo con el nitrógeno, manteniendo la capa de vapor aislante característica del efecto ligeramente más estable que en el tercero.

Finalmente el último gráfico se refiere al cilindro 3, cuya sexta etapa comienza con una diferencia de temperatura de $(213 \pm 4,7)\text{K}$, cuyo valor es más cercano al esperado considerando que el cilindro estaría a temperatura ambiente. Esto nos indica que la temperatura de referencia en este caso sí estaba correctamente establecida en 273K. Además podemos notar que obtenemos una $T_{sat3} = (90,0 \pm 2,0)\text{K}$, la cual coincide con la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido, como esperaríamos que pase luego de cierto tiempo. Pero su curva tiene muchos menos puntos en sus etapas III y IV que las curvas de los demás cilindros, lo cual creemos que puede ser porque le ocurre lo mismo que le ocurre al cilindro 2. Ambos tienen hendiduras que forman discos, su diferencia es el radio de estos discos.

Gracias a la utilización de la balanza, logramos medir de forma simultanea a la medición de la temperatura la variación de la masa a lo largo del experimento. Por motivos internos a la correcta calibración del dispositivo solo logramos medir la variación de la masa para los casos del cilindro 2 y el cilindro 3. En la Figura 9, se muestra la masa que mide la balanza en función del tiempo.

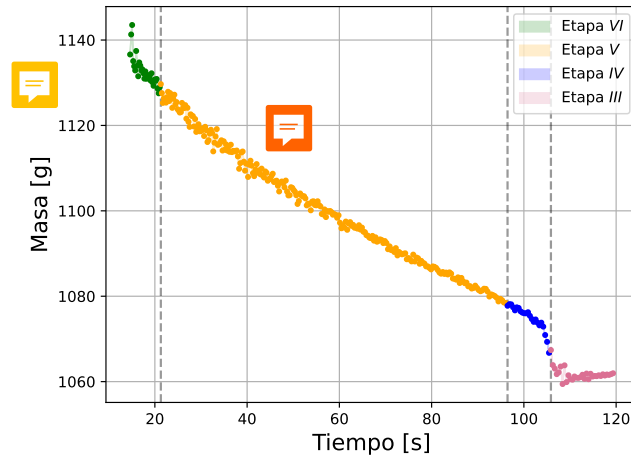


Figura 9: Masa medida por la balanza en función del tiempo. Este gráfico corresponde a como el nitrógeno pierde masa al ponerse en contacto con un cilindro con hendiduras equidistantes y pronunciadas (cilindro 2). Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

En la Figura 9, al igual que con las temperaturas en función del tiempo, se encuentra remarcada cada etapa del efecto del Leidenfrost utilizando el mismo criterio que antes. Realizamos otras dos mediciones correspondientes a este mismo cilindro, los cuales se pueden ver en el Apéndice C.

Realizamos la misma experiencia para el cilindro 3, el cual se muestra en la Figura 10, donde de la misma forma que en el caso anterior se encuentran marcados las etapas de Leidenfrost utilizando el mismo criterio (realizamos otras dos mediciones adicionales utilizando el mismo cilindro e igual procedimiento, para ver sus figuras dirigirse al Apéndice C).

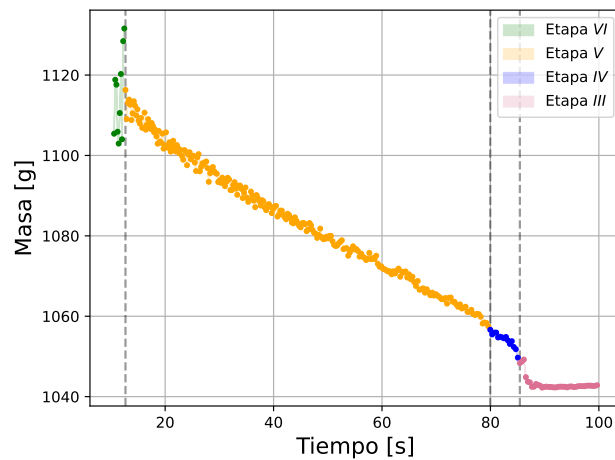


Figura 10: Masa del nitrógeno en función del tiempo. Este gráfico corresponde a como el nitrógeno pierde masa al ponerse en contacto con un cilindro con hendiduras equidistantes y poco pronunciadas (cilindro 3). Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

En la Figura 10 se puede ver como los primeros puntos de la etapa VI tienden a aumentar,

esto puede ser debido a que corresponde al instante en el cual introducimos el cilindro dentro del recipiente con nitrógeno líquido, produciendo que este realice un desplazamiento del fluido y por lo tanto que sienta una fuerza de empuje descrita por el principio de Arquímedes. Esto provoca que, siendo que las balanzas miden la fuerza normal sobre su superficie, se tenga en cuenta no solo el propio peso del cilindro con nitrógeno sino también esta fuerza de empuje. Sin embargo, no podemos calcular esta fuerza ya que depende explícitamente de la densidad local del fluido alrededor del propio cilindro, y por el efecto Leidenfrost este varía con el tiempo.

Como notamos que estas curvas tenían una forma similar a las mediciones que tomamos de temperatura en función del tiempo, graficamos la masa en función de la temperatura. Sabíamos que (5) podía ser nuestro modelo a ajustar, por lo que estudiamos tres ajustes: uno lineal, uno de una homográfica, y otro que fuese con el modelo teórico.

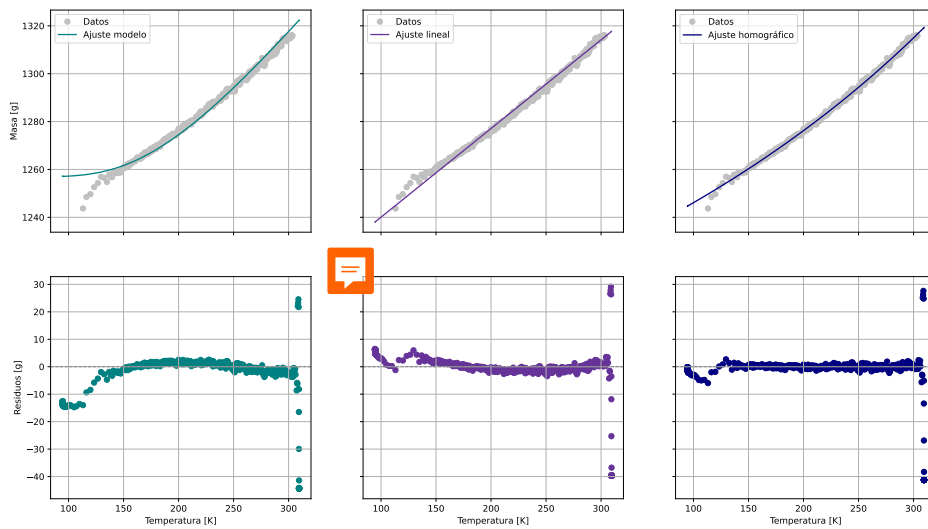


Figura 11: Masa en función de la temperatura para el cilindro 2. En la primera columna, se realizó un ajuste que sigue (5), y debajo se encuentran los residuos de este mismo. Se obtuvo $\chi^2 = 43507$. En la segunda columna se propuso un ajuste lineal a los datos y debajo de este mismo se ven los residuos, tiene $\chi^2 = 18303$. Por último en la tercera columna hicimos un ajuste homográfico a los datos, con sus respectivos residuos debajo, con $\chi^2 = 14851$.


Para el ajuste que sigue el modelo teórico podemos ver que los residuos no parecen seguir una tendencia uniforme alrededor del eje x, y además hay que considerar que se obtuvo $\chi^2 = 43507$, $\chi^2_{\nu} = 350$. Sin embargo, tampoco parece que nuestros datos puedan ser descritos con una tendencia lineal. Este ajuste presenta un $\chi^2 = 18303$ y $\chi^2_{\nu} = 147$, los cuales son menores en valor que los que se obtuvieron para el primer ajuste, pero no son adecuados para considerar el ajuste como bueno, especialmente viendo la distribución de los residuos. Por último, el ajuste homográfico devuelve un $\chi^2 = 14851$ y un $\chi^2_{\nu} = 138$, y aunque sus residuos parecen estar uniformemente distribuidos quitando los extremos de la medición, no tienen una forma aleatoria alrededor del eje x.

Probamos con distintos ajustes porque notamos que el que esperábamos que fuese el adecuado, el que proviene del modelo teórico, resultó no ajustando como esperado. Ninguno de los tres parece ser el que describe el modelo de nuestros datos, incluso si a simple vista pareciera que la homográfica


ajusta mejor que el modelo que planteamos, pero sus residuos no permiten afirmar que el ajuste sea bueno.

Conclusiones

Visualizando los gráficos de temperatura en función del tiempo correspondientes a los cilindros 1 y 2 se puede notar que cometimos un error a la hora de realizar ambas mediciones. Esto puede ser debido a que el aceite en el cual se encontraba la termocupla de referencia no estaba a una temperatura de 273K, provocando que en la conversión de voltajes medidos por la NI-DAQ a temperaturas obtengamos valores fuera del rango esperado, es decir, fuera de temperaturas iniciales razonables, como lo puede ser temperatura ambiente, y temperaturas de equilibrio que no logran obtener valores cercanos a los de saturación del nitrógeno líquido. Esto es porque tener el punto de referencia a una temperatura distinta de 273K **vuelve inutilizable** la calibración hecha para la termocupla, que se usa para las funciones que convierten la lectura de la termocupla en temperatura. Arrastrar este error significa que los valores que estamos obteniendo para las temperaturas no son los que deberían ser.

Debido a estos problemas en las mediciones de los cilindros, los rangos de temperaturas que toman cada una de ellas se vuelven incomparables, ya que al tener mediciones incorrectas sobre las temperaturas las curvas sobre el efecto de Leidenfrost se ven contraídas en la recta de las temperaturas. Por consecuencia, también en la recta del flujo de calor debido a que en (1) tenemos una variación de la temperatura respecto del tiempo, por lo que si tenemos contracciones en esos valores, también las tendremos en el flujo. 

Sin embargo, pudimos comparar la duración de las etapas para los distintos cilindros. Obtuvimos que para el cilindro 1, el que no tenía ninguna hendidura, la etapa de Leidenfrost duraba más que para los otros, y que para los tres su capa de vapor colapsaba en tiempos muy parecidos. Dado que los tres cilindros estaban hechos del mismo material y solo diferían en sus geometrías, **creemos que las hendiduras provocan que la capa de vapor colapse antes que si no estuviesen.**

Para los 3 cilindros vimos las etapas que esperábamos ver de este fenómeno, y de acuerdo a la geometría de cada uno notamos que variaban temporalmente la duración de estas etapas. Notamos que cada una seguía lo que esperábamos de la teoría, es decir que cuando esperábamos que se forme la capa de vapor alrededor del cilindro y se mantenga constante la transferencia, ocurrió eso para los tres cilindros. Lo mismo para el resto de las etapas: vimos que colapsaba esta capa y ocurría un máximo en la transferencia de calor, y que luego el cilindro llega a una temperatura constante. 

Adicionalmente medimos la masa del nitrógeno en función del tiempo, podemos ver en ciertos casos **como en el de la Figura 10, donde se muestra una tendencia de aumentar el peso del nitrógeno en los últimos instantes de la etapa VI.** Este aumento viene explicado por el principio de Arquímedes, pero esta fuerza de empuje nos es imposible de calcular ya que depende explícitamente de la densidad local del fluido alrededor del propio cilindro, y por el efecto Leidenfrost este varía con el tiempo.

Además pudimos ver su dependencia y notar que esta curva era similar a la curva que se obtiene cuando uno mide la temperatura en función del tiempo. Dado esto, decidimos graficar masa en función de la temperatura y estudiar el modelo que las relaciona, dado por (5). Ajustamos los datos que tomamos por 3 modelos diferentes: una función lineal, una homográfica y finalmente por la función del modelo teórico, pero notamos que ninguno de los ajustes podía ser considerado bueno.

Referencias



- [1] F. L. Curzon, "The Leidenfrost phenomenon", Am. J. Phys. 46, 825 (1978).
- [2] "Thecnical Reference Manual", pág 4. Smart Sensors INC (1920).
- [3] PyVISA: Controla tus instrumentos con Python (2025).
- [4] T. W.Listerman, T.A. Boshinski and L. F. Knese, "Cooling by immersion in liquid nitrogen", Am. J. Phys. 54, 554 (1986).

Apéndice

A. Gráficos de temperatura en función del tiempo para cilindros 1 y 2

En la Figura 12 se muestra una segunda experiencia correspondiente al muestreo de la puesta en contacto del cilindro 1 en nitrógeno líquido. Al igual que como se muestra en resultados, la primera parte corresponde al instante en el cual se pone en contacto al cilindro con el nitrógeno en estado líquido, donde el cilindro inicialmente se encontraba a un temperatura estimada de $(283,0 \pm 6,0)\text{K}$, logrando alcanzar el equilibrio en $(184 \pm 4,0)\text{K}$.

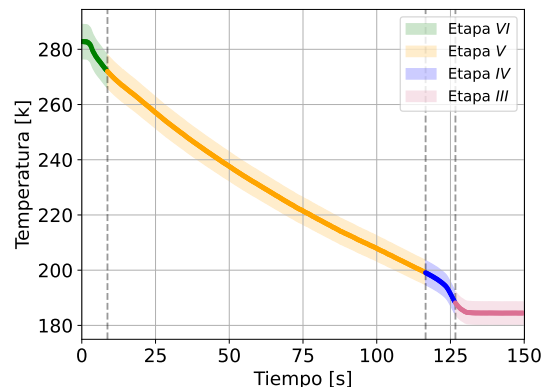


Figura 12: Temperatura en grados Kelvin en función del tiempo. Este gráfico corresponde a un cilindro con caras planas (cilindro 1), al cual se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido en su temperatura de saturación. Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

En la Figura 13 se muestra una tercera experiencia correspondiente al muestreo de la puesta en contacto del cilindro 1 en nitrógeno líquido. Al igual que como se muestra en resultados, la primera parte corresponde al instante en el cual se pone en contacto al cilindro con el nitrógeno en estado líquido, donde el cilindro inicialmente se encontraba a un temperatura estimada de $(284,0 \pm 6,3)\text{K}$, logrando alcanzar el equilibrio en $(187 \pm 4,1)\text{K}$.

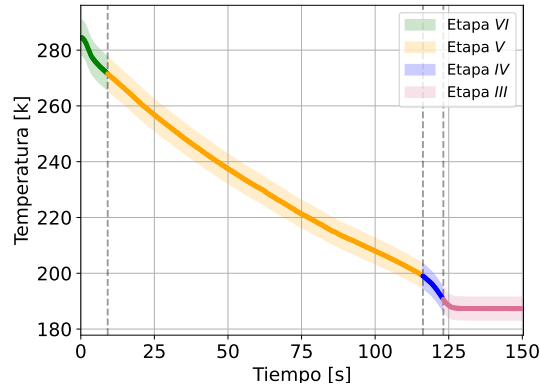


Figura 13: Temperatura en grados Kelvin en función del tiempo. Este gráfico corresponde a un cilindro con caras planas (cilindro 1), al cual se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido en su temperatura de saturación. Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

En la Figura 14 se muestra una segunda experiencia correspondiente al muestreo de la puesta en contacto del cilindro 2 en nitrógeno líquido. Al igual que como se muestra en resultados, la primera parte corresponde al instante en el cual se pone en contacto al cilindro con el nitrógeno en estado líquido, donde el cilindro inicialmente se encontraba a un temperatura estimada de $(310 \pm 6,8)\text{K}$, logrando alcanzar el equilibrio en $(95 \pm 2,0)\text{K}$.

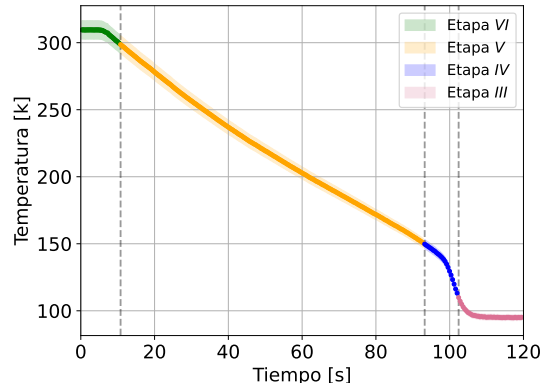


Figura 14: Temperatura en grados Kelvin en función del tiempo. Este gráfico corresponde a un cilindro con hendiduras equidistantes y pronunciadas (cilindro 2), al cual se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido en su temperatura de saturación. Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

En la Figura 15 se muestra una tercera experiencia correspondiente al muestreo de la puesta en contacto del cilindro 2 en nitrógeno líquido. Al igual que como se muestra en resultados, la primera parte corresponde al instante en el cual se pone en contacto al cilindro con el nitrógeno en estado líquido, donde el cilindro inicialmente se encontraba a un temperatura estimada de $(310 \pm 6,9)\text{K}$, logrando alcanzar el equilibrio en $(95 \pm 2,1)\text{K}$.

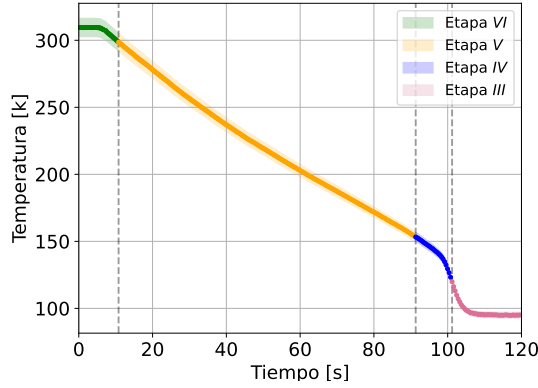


Figura 15: Temperatura en grados Kelvin en función del tiempo. Este gráfico corresponde a un cilindro con hendiduras equidistantes y pronunciadas (cilindro 2), al cual se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido en su temperatura de saturación. Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

En la Figura 16 se muestra una segunda experiencia correspondiente al muestreo de la puesta en contacto del cilindro 3 en nitrógeno líquido. Al igual que como se muestra en resultados, la primera parte corresponde al instante en el cual se pone en contacto al cilindro con el nitrógeno en estado líquido, donde el cilindro inicialmente se encontraba a un temperatura estimada de $(310 \pm 6,8)\text{K}$, logrando alcanzar el equilibrio en $(95 \pm 2,0)\text{K}$.

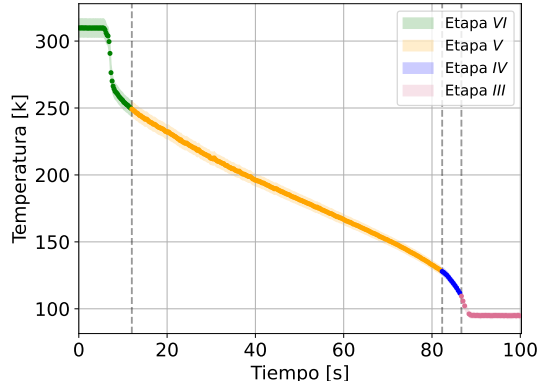


Figura 16: Temperatura en grados Kelvin en función del tiempo. Este gráfico corresponde a un cilindro con hendiduras equidistantes y poco pronunciadas (cilindro 3), al cual se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido en su temperatura de saturación. Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

En la Figura 17 se muestra una tercera experiencia correspondiente al muestreo de la puesta en contacto del cilindro 3 en nitrógeno líquido. Al igual que como se muestra en resultados, la primera parte corresponde al instante en el cual se pone en contacto al cilindro con el nitrógeno en estado líquido, donde el cilindro inicialmente se encontraba a un temperatura estimada de $(297 \pm 6,5)\text{K}$, logrando alcanzar el equilibrio en $(77,0 \pm 1,7)\text{K}$.

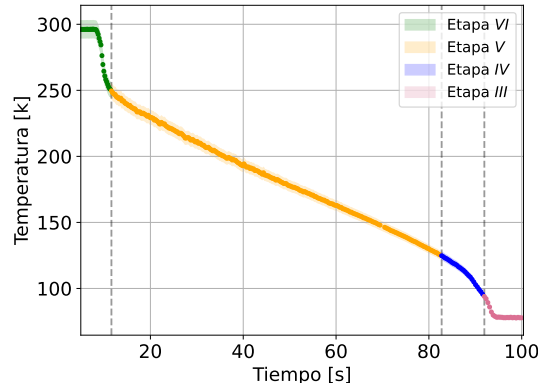


Figura 17: Temperatura en grados Kelvin en función del tiempo. Este gráfico corresponde a un cilindro con hendiduras equidistantes y poco pronunciadas (cilindro 3), al cual se lo pone en contacto con nitrógeno en estado líquido en su temperatura de saturación. Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

B. Calibración de la balanza

Medimos en una balanza OHAUS PRECISION Standard 7 cuerpos con pesos distintos. Inicialmente se realizó un ajuste siguiendo $ax + b$, se notó que $b = 0$ y se volvió a ajustar esta vez con la expresión ax . Para esto último obtuvimos $a = (0,996 \pm 0,001)$

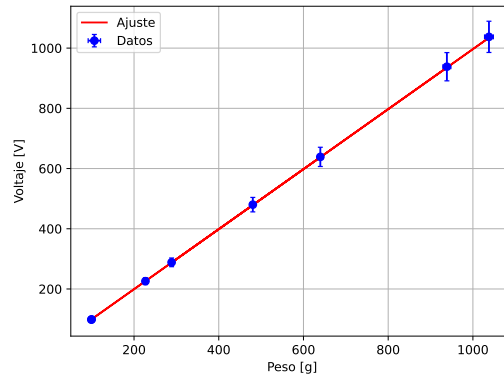


Figura 18: Voltaje que lee la balanza que queremos calibrar en función de pesos conocidos. Se hizo un ajuste lineal y se determinó que $a = (0,996 \pm 0,001)$.

C. Gráficos de masa en función del tiempo

En la Figura 19 se muestra una segunda experiencia correspondiente al muestreo de la pérdida de masa del nitrógeno en estado líquido debido a la puesta en contacto con el cilindro 2 a temperatura ambiente.

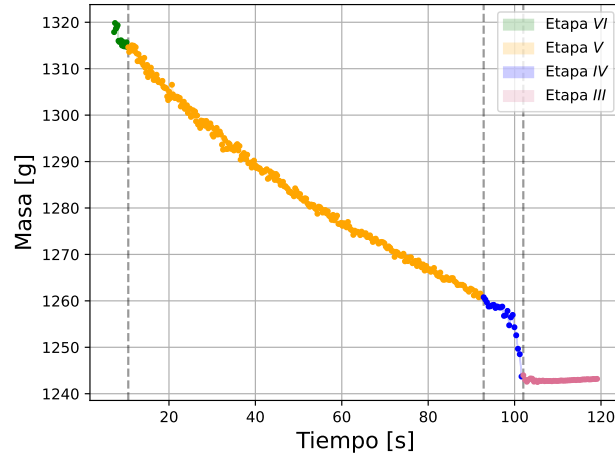


Figura 19: Masa del nitrógeno en función del tiempo. Este gráfico corresponde a como el nitrógeno pierde masa al ponerse en contacto con un cilindro con hendiduras equidistantes y pronunciadas (cilindro 2). Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

En la Figura 20 se muestra una tercera experiencia correspondiente al muestreo de la pérdida de masa del nitrógeno en estado líquido debido a la puesta en contacto con el cilindro 2 a temperatura ambiente.

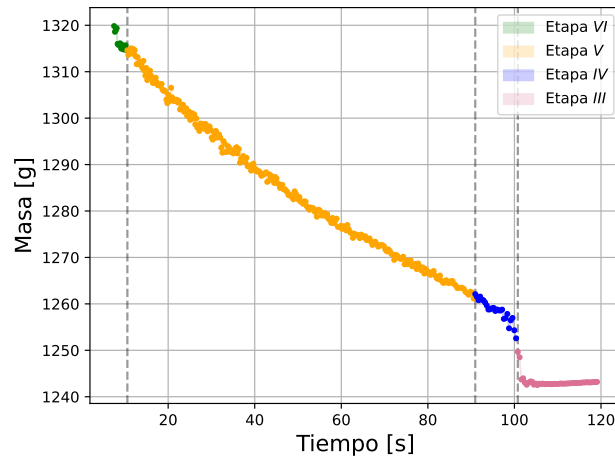


Figura 20: Masa del nitrógeno en función del tiempo. Este gráfico corresponde a como el nitrógeno pierde masa al ponerse en contacto con un cilindro con hendiduras equidistantes y pronunciadas (cilindro 2). Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

En la Figura 21 se muestra una segunda experiencia correspondiente al muestreo de la pérdida de masa del nitrógeno en estado líquido debido a la puesta en contacto con el cilindro 3 a temperatura ambiente.

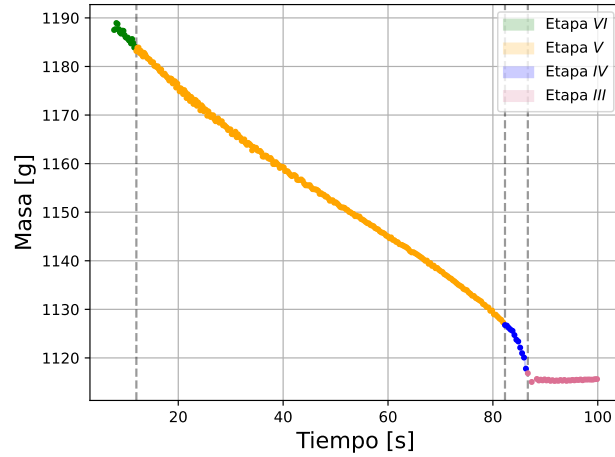


Figura 21: Masa del nitrógeno en función del tiempo. Este gráfico corresponde a como el nitrógeno pierde masa al ponerse en contacto con un cilindro con hendiduras equidistantes y pronunciadas (cilindro 3). Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.

En la Figura 22 se muestra una tercera experiencia correspondiente al muestreo de la pérdida de masa del nitrógeno en estado líquido debido a la puesta en contacto con el cilindro 3 a temperatura ambiente.

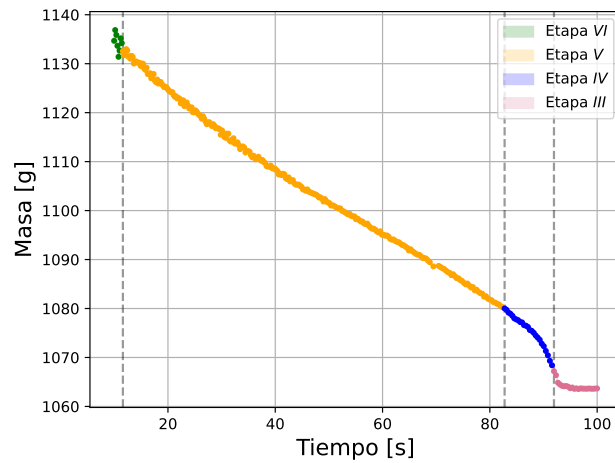


Figura 22: Masa del nitrógeno en función del tiempo. Este gráfico corresponde a como el nitrógeno pierde masa al ponerse en contacto con un cilindro con hendiduras equidistantes y pronunciadas (cilindro 3). Además puede verse remarcada en diferentes colores las etapas correspondientes al efecto Leidenfrost.