



“Medición de conductividad térmica de fluidos”

Metrología eléctrica – División termometría

Laboratorio de propiedades termofísicas

Saúl García Duarte



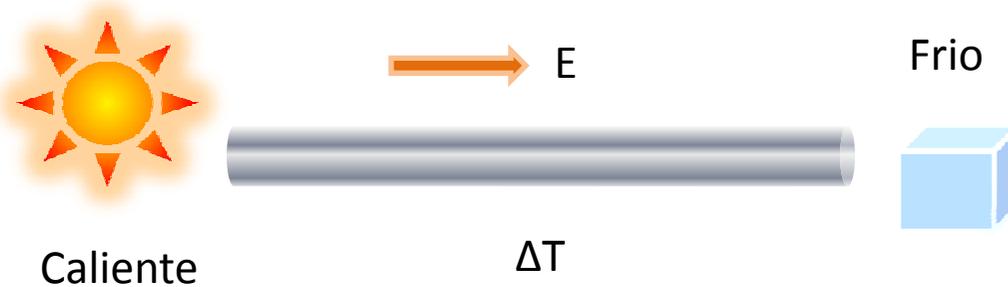
Contenido

Introducción.

1. Métodos de medición.
2. Método transitorio del hilo caliente
 - 2.1. Ecuación para determinar la λ .
3. Sistema de adquisición de datos.
4. Circuito puente de Wheatstone.
 - 4.1. Diseño del circuito de medición
5. Celda contenedora.
6. Pruebas.
7. Avances sobre el sistema de referencia.
8. Trabajo futuro.

Introducción

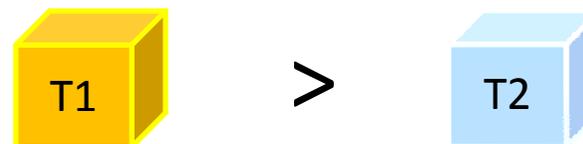
Calor: transferencia de energía



Transferencia de calor:

- Por conducción.
- Por convección.
- Por radiación.

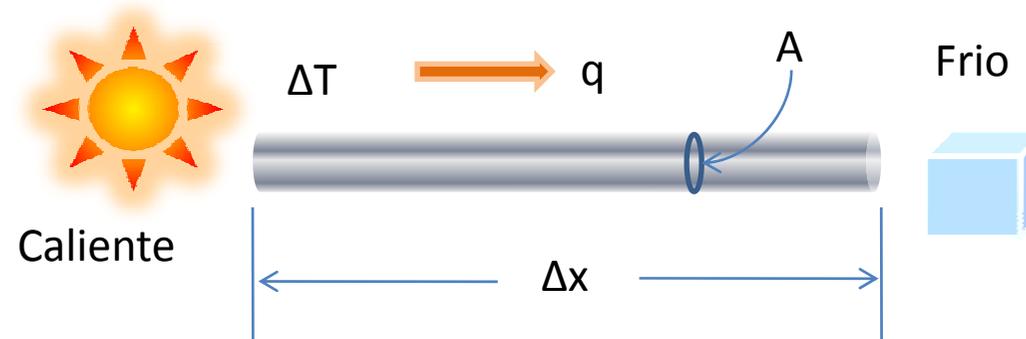
Temperatura



- Medida de lo caliente o frío que está un sistema.
- Indica el estado de agitación de las partículas de un cuerpo.

Los experimentos muestran que

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \left[\frac{J}{s} \right]; \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = q \rightarrow \text{Razón de transferencia de calor}$$



Como la razón de transferencia de calor es diferente para cada material, y para medios homogéneos:

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$

$\lambda \rightarrow$ Conductividad térmica en W/(m K) y es una **propiedad de transporte**.

$\lambda \rightarrow$ Capacidad o facilidad que tiene un material de permitir el paso de calor por conducción a través de sus moléculas.

Propiedades termofísicas

Propiedades de transporte

λ Conductividad térmica
 α Difusividad térmica
 ν Viscosidad cinemática

Donde:

α Se asocia con la velocidad de propagación del calor en el material (m^2/s).
 ν (μ/ρ), μ → medida de resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas.

Propiedades termodinámicas

ρ → Densidad
 C_p → Calor específico
 ρC_p → Capacidad calorífica volumétrica.

C_p → Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado ($\text{J}/\text{kg K}$).
 ρC_p → Capacidad de cierto volumen de una sustancia para almacenar calor al experimentar un cierto cambio en su temperatura sin cambiar de fase ($\text{J}/\text{m}^3\text{K}$).



Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2009 18-20 de noviembre

- Electromagnetismo
- Temperatura y Propiedades Termofísicas
- Tiempo y Frecuencia

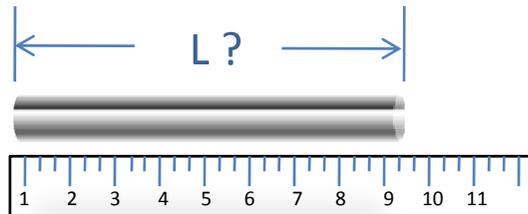


La demanda de datos confiables de las propiedades termofísicas se ha incrementado debido a la necesidad industrial de mejorar sus diseños, operación o eficiencia de sus plantas o componentes.

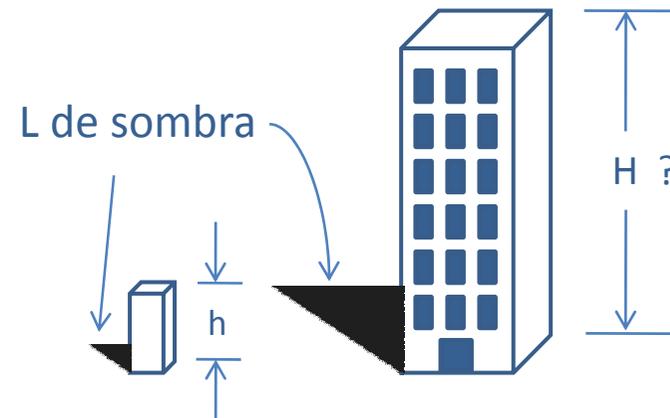
En **simulaciones de flujo de fluidos** el valor de estas propiedades están muy relacionadas, por lo que dichas simulaciones son muy sensibles a los valores de entrada.

1. Métodos de medición

Pueden hacer la medición directa de la propiedad de transporte en cuestión (**métodos absolutos**) o pueden usar materiales de referencia (**métodos relativos**).



Método absoluto



Método relativo



Métodos absolutos: Se obtiene la propiedad por medio de una ecuación de trabajo analítica. Acompañada por correcciones debido a la desviación entre la situación real y el modelo ideal.

Métodos relativos El instrumento tiene una o más constantes, que se evalúan por calibración con un material para el cual la propiedad de transporte se conoce a la misma temperatura y presión de interés.



Usando la **ecuación de balance de energía** para un pequeño volumen de control, y realizando algunas operaciones matemáticas se llega a la siguiente ecuación,

$$\nabla^2 T(r,t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t}, \quad \alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (1)$$

Se supone: λ constante y no existe generación de calor en el medio.

Es la base de todos los métodos experimentales para medir la conductividad térmica.

Se han implementado diversas técnicas para medir conductividad térmica de líquidos en diversos intervalos de estados termodinámicos.

Técnicas transitorias

La ecuación 1 se aplica en su forma completa.

Técnicas estado estable

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

y queda: $\nabla^2 T = 0$



Técnicas de estado estable

Placas paralelas

fluido muestra entre **dos placas planas horizontales y paralelas entre si**. Normalmente de sección circular.

La placa superior tiene una temperatura mayor que la placa inferior. la transferencia de calor es solo por **conducción en forma axial**.

Convección es pequeña y la radiación se puede corregir.

Obtiene mediciones de λ de fluidos en un **amplio intervalo** de presiones y temperaturas.

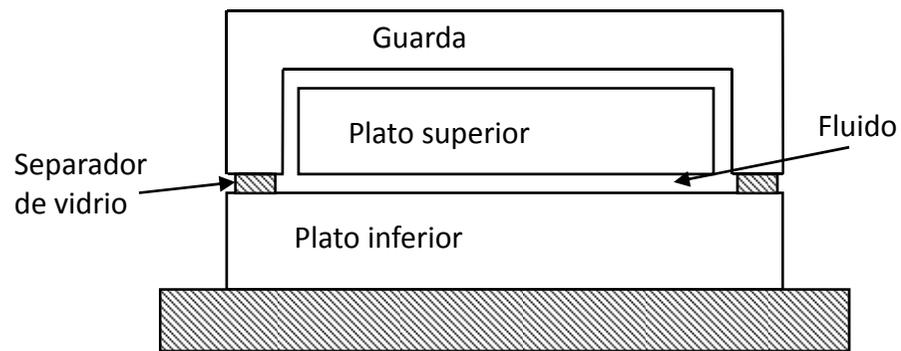
Cilindros concéntricos

Dos **superficies cilíndricas adyacentes e isotérmicas**, separadas por un pequeño espacio anular en donde se encuentra el fluido muestra.

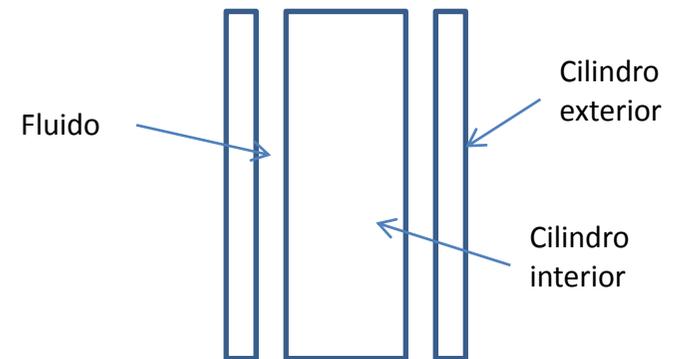
Cuidado en la alineación de los cilindros, **verticalidad y concetricidad**.

Gran variedad de fluidos, eléctricamente conductores o no conductores. Instrumentación compleja.

Para evitar de radiación deben ser **materiales de baja emisividad**.



Placas paralelas.



Cilindros concéntricos.



Técnicas transitorias

De la esfera

Miden λ y α .

Utilizada inicialmente para mediciones en **materiales biológicos**.

Se ha extendido a fluidos.

Fue propuesta por el NIST. Es una **técnica relativa**, exactitud limitada.

Emplea un termistor esférico encapsulado en vidrio que se usa como sensor de temperatura y fuente de calor.

Hilo caliente

Mide λ y α .

Tiempo de medición corto. Evita la convección.

La técnica experimental logra una **precisión de 0.1 a 0.2 %** y **exactitudes entre 0.3 y 0.5 %** en los mejores instrumentos.

Valores de λ de líquidos obtenidos con esta técnica son considerados como valores de referencia estándar.



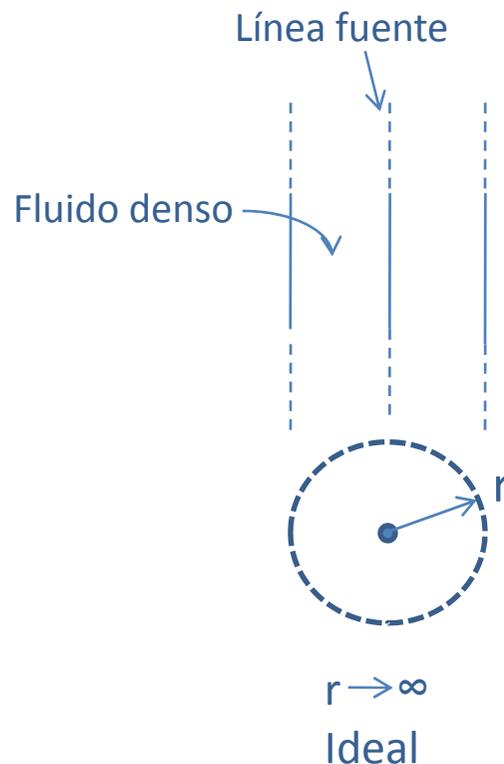
Se ha establecido como un método preciso para la medición de λ de gases, líquidos orgánicos y líquidos eléctricamente conductores.

Instrumentos basados en esta técnica son considerados primarios y evidentemente se usan para obtener valores absolutos de λ .

Los instrumentos basados en esta técnica son capaces de medir con exactitud λ en forma absoluta hasta de **0.3 % en gases, 0.5 % para líquidos** y alrededor de **1% para gases** cercanos a la región crítica.

2. Método transitorio del hilo caliente

El método transitorio del hilo caliente se emplea para determinar la **conductividad térmica de fluidos**.



Modelo ideal

Una **línea fuente de calor ideal**,

$$L = \infty, \quad C_p = 0, \quad \lambda = \infty$$

Está inmersa en un **fluido denso**,

isotrópico.

tamaño infinito.

propiedades termofísicas independientes de la temperatura (λ , ρ , C_p , etc.).

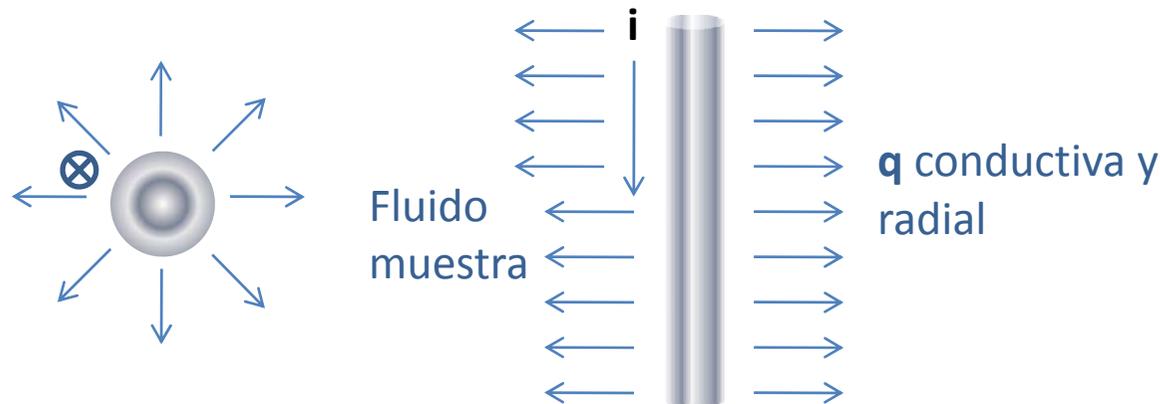
Modelo ideal para el método.

Línea fuente en **equilibrio termodinámico** con el fluido en $t=0$.

El método se basa sobre la **evolución del valor de temperatura** con respecto al tiempo de un alambre muy delgado (línea fuente).

La evolución en el valor de temperatura o el incremento de temperatura se logra debido al **efecto Joule** en el alambre.

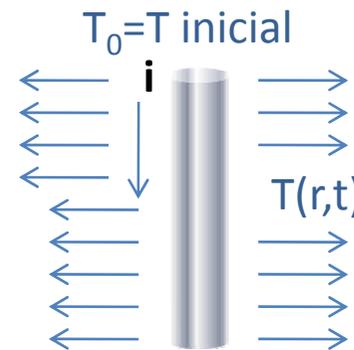
Se asume en el modelo ideal que la disipación de calor debido al efecto Joule es solamente **conductiva y de forma radial** a través del fluido que rodea al alambre de una forma que **depende de la conductividad térmica** del fluido que se refleja en el **incremento de temperatura del alambre**.



Para resolver la ecuación del método transitorio del hilo caliente se considera que:

El **incremento de temperatura** en el fluido a una distancia r desde el alambre para un tiempo t es,

$$\Delta T(r,t) = T(r,t) - T_0$$



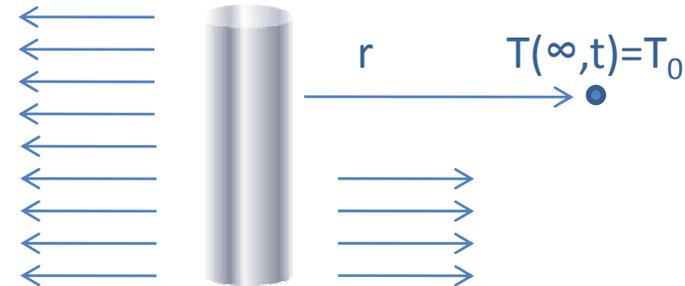
Donde T_0 es la temperatura de equilibrio del fluido.

Y además bajo las siguientes condiciones de frontera e inicial,

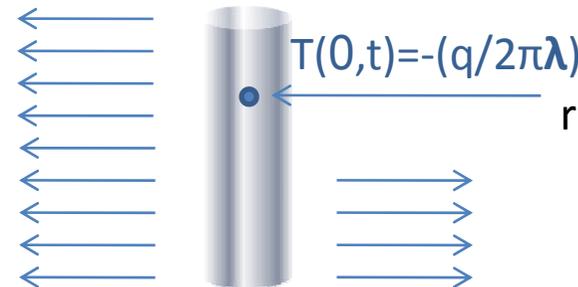
el sistema esta en equilibrio térmico

$$\Delta T(r,t) = 0 \quad \text{para } t = 0 \qquad T(r,t) = T_0$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \Delta T(r, t) = 0 \quad \text{para } t > 0$$

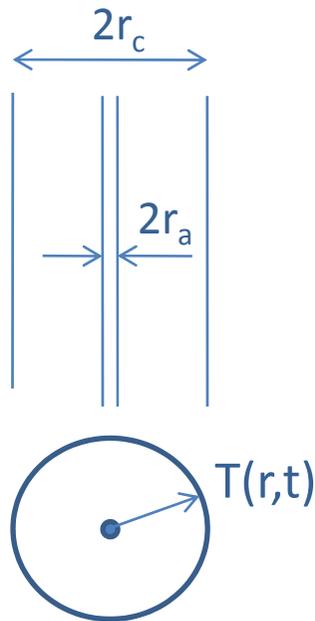


$$\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{q}{2\pi\lambda} \quad \text{para } t \geq 0$$



Con la condición adicional de que la **difusividad es constante**. La solución es

$$\Delta T_{ideal}(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{4\alpha t}{r^2 C}$$



Real
(b)

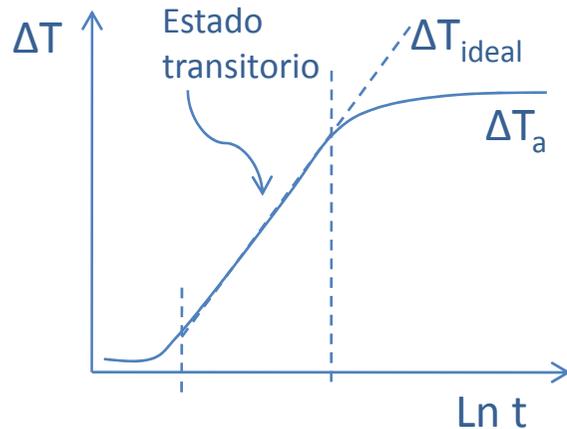
Modelo real para el método.

La ecuación anterior sugiere la posibilidad de obtener la conductividad térmica del fluido muestra de la **gráfica ΔT_{ideal} vs $\ln t$** .

Modelo real

En la práctica, la implantación del método se desvía del modelo ideal por:

- Propiedades finitas del alambre (λ y C_p).
- Longitud finita del alambre.
- Tamaño finito de la muestra.
- Otros modos de transferencia de calor (convección y radiación).
- Propiedades termofísicas del fluido dependientes de la temperatura.
- Tensión del alambre.



ΔT_{ideal} vs $\ln t$.

Como consecuencia la medición del ΔT_a real se desvía del ΔT_{ideal} que predice la ecuación de trabajo.

Un **diseño adecuado de la celda contenedora** asegura que al menos en un intervalo de tiempo (estado transitorio) los datos obtenidos reales se acerquen al ΔT_{ideal} .

2.1. Ecuación para determinar λ

A la ecuación de trabajo para el modelo ideal se le deriva con respecto al \ln del tiempo y se despeja k ,

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{d \ln t}{d\Delta T_{ideal}}$$

En el intervalo transitorio los datos de tiempo y ΔT se **ajustan a una línea recta** por el **método de los mínimos cuadrados**,

$$\Delta T_{ideal} = A \ln t + B$$

La pendiente de esta línea es

$$A = \frac{d(\Delta T_{ideal})}{d(\ln t)}$$



Si se conoce además el flujo de calor por unidad de longitud resulta que:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi A}$$

Realizando algunas operaciones matemáticas adicionales se puede determinar también la difusividad térmica,

$$\alpha = \frac{r_a^2 C}{4t} \exp\left[\ln t + \frac{B}{A}\right]$$

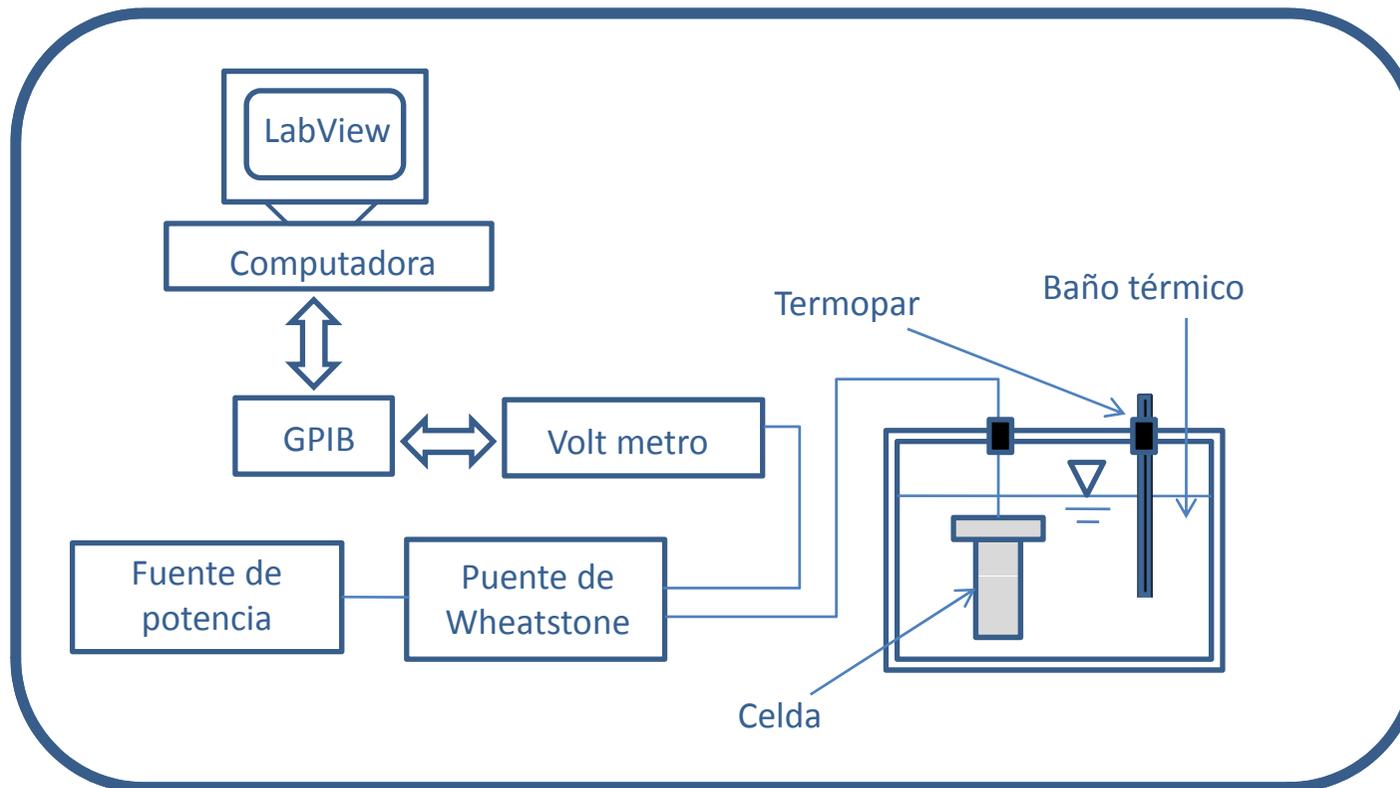


3. Sistema de adquisición de datos

En el modelo se considera que la transferencia de calor es solamente conductiva, pero en **implementaciones prácticas** se presenta la transferencia de **calor por convección**, sin embargo, esta se puede evitar al realizar la medición en tiempos cortos (1 s).

Con respecto a la transferencia de **calor por radiación**, si el fluido es transparente, se **aplica una corrección**. Para **fluidos que absorben radiación** se ha demostrado en este método que **su efecto es despreciable** en muchos casos.

Debido a la necesidad de obtener los cambios resistencia del alambre en un intervalo de aproximadamente **1 segundo** (duración aproximada del estado transitorio y para evitar la convección), es necesario implementar un **sistema de adquisición de datos**.



Sistema de adquisición de datos.



1. Balanceo del puente de Wheatstone.
2. La fuente de potencia energiza al puente que contiene al alambre de platino por al menos 2 segundos, el alambre de platino se encuentra dentro de la celda y ésta a su vez dentro de un baño de temperatura controlada.
3. El voltmetro controlado por el programa en Labview guarda los valores de diferencia de potencial originados en el puente debido al cambio de resistencia del alambre.
4. Los envía por medio de la GPIB a la computadora.

Los datos de diferencia de potencial se emplean para determinar la resistencia del alambre por medio de una ecuación determinada para el puente.

El voltmetro es un multímetro de 8 ½ dígitos, en modo medición de diferencia de potencial.

El GPIB-USB-HS es un **dispositivo de interface de propósito general** (General Purpose Interface Bus).



La siguiente figura es un aspecto general del panel frontal del programa en Labview utilizado para la obtención de la diferencia de tensiones del circuito puente de Wheatstone. Para este caso el tiempo transcurrido entre cada dato obtenido es de 10 ms.

Con este programa se pueden obtener hasta **mil datos por segundo**, es importante porque la conducción de calor se presenta principalmente en el transcurso de 1 segundo. Además de que controla la fuente que energiza al puente, lo que permite obtener el tiempo de medición.



Dirección del multímetro 3458A Máximo voltaje a medir

Dirección de la fuente 228A Voltaje aplicado al transistor del puente

Número de muestras a tomar

Apertura (tiempo entre una muestra y la siguiente, en segundos)

Datos tomados 3458 A

Inicia medición de desbalance

Disparo para energizar al puente

Termina medición de desbalance

Número de muestras tomadas 3458A

Panel frontal del programa en Labview.

4. Circuito puente de Wheatstone

Para obtener λ , se debe medir el **aumento de temperatura** del alambre con respecto a la temperatura inicial o de equilibrio, el **tiempo** y el **flujo de calor por unidad de longitud** que disipa el alambre por efecto Joule(q). Esto requiere un flujo de calor constante y la medición debe durar aproximadamente 1 s para evitar la convección.

Como línea fuente se utiliza un **alambre de platino**, que también funciona como **sensor de temperatura**.

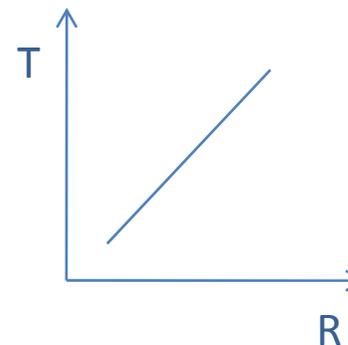
Como fuente de calor: se le hace pasar una corriente, aumentando su temperatura a causa del efecto Joule.

Como sensor de temperatura: se utiliza su cambio de resistencia debido al aumento de su temperatura.

Platino

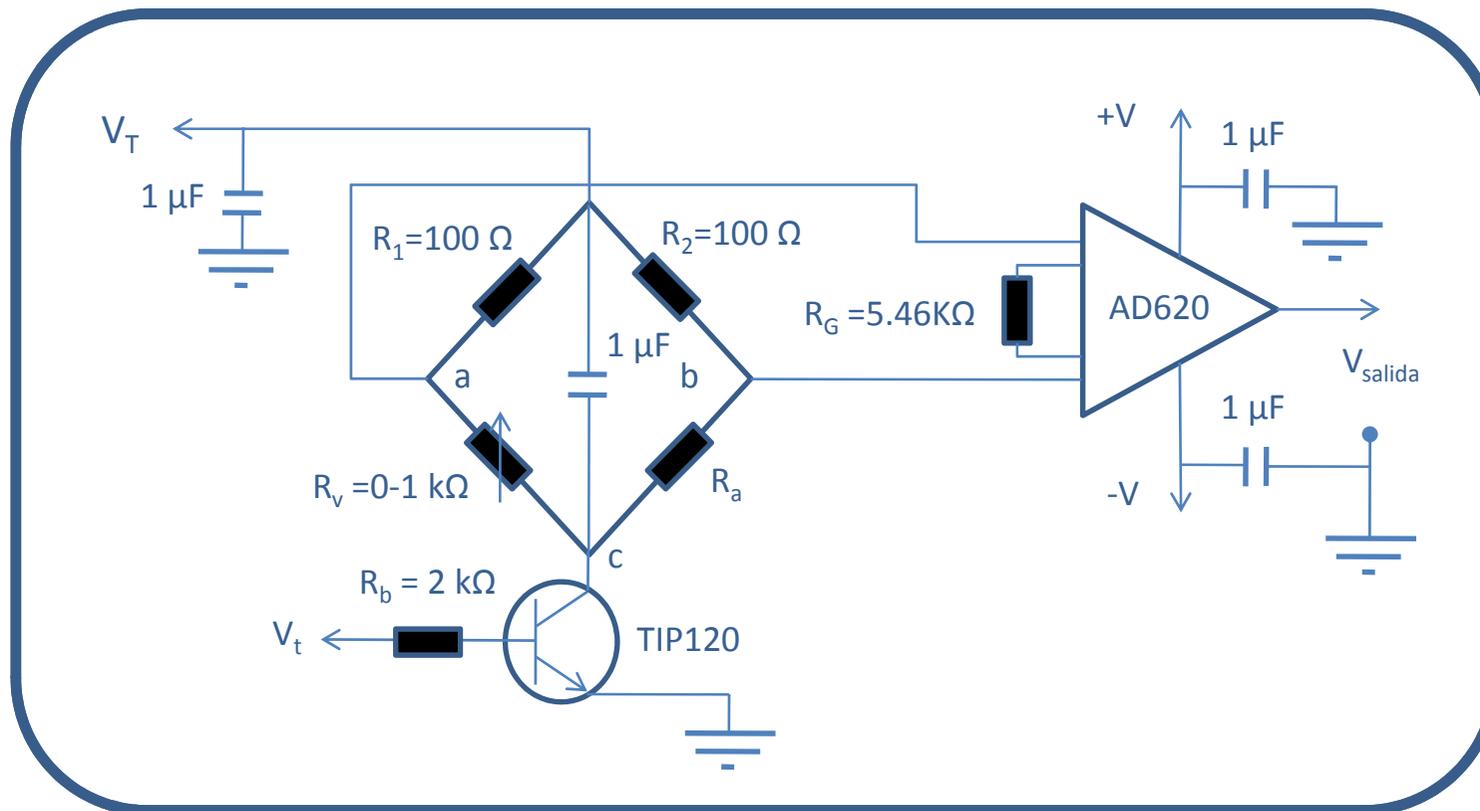


$\Delta T \propto \Delta R$
Comportamiento lineal



Para determinar el cambio de resistencia se utiliza un circuito **punto de Wheatstone**.

4.1. Diseño del circuito de medición



Circuito de medición.



De la figura 5 la diferencia de potencial del punto *a* con respecto al punto *c* y el punto *b* con respecto al *c* se diferencian y se amplifica el resultado de la diferencia en 10.037 veces con el AD620, el transistor Tip120 funciona como interruptor con el fin de evitar variaciones de la corriente al energizar el puente.

Los interruptores mecánicos tienen una transición brusca de la corriente al momento de cerrarlos y por lo tanto la corriente requiere de un tiempo para estabilizarse.

Con los transistores se logra la transición suave.



Los capacitores sirven como filtros de interferencias electromagnéticas.

R_a es la resistencia del alambre de platino y esta dada por:

$$R_a = \frac{R_2 V_{ab} (R_1 + R_v) + R_2 R_v V_T}{R_1 V_T - V_{ab} (R_1 + R_v)}$$

Para cada valor de R_a se puede determinar la temperatura del alambre de platino y graficarla contra el $\ln t$, de la cual se obtiene la pendiente para calcular λ .

5. Celda contenedora

Los criterios de diseño para dimensiones y materiales:

Material del alambre. Análisis termoeconomico (platino).

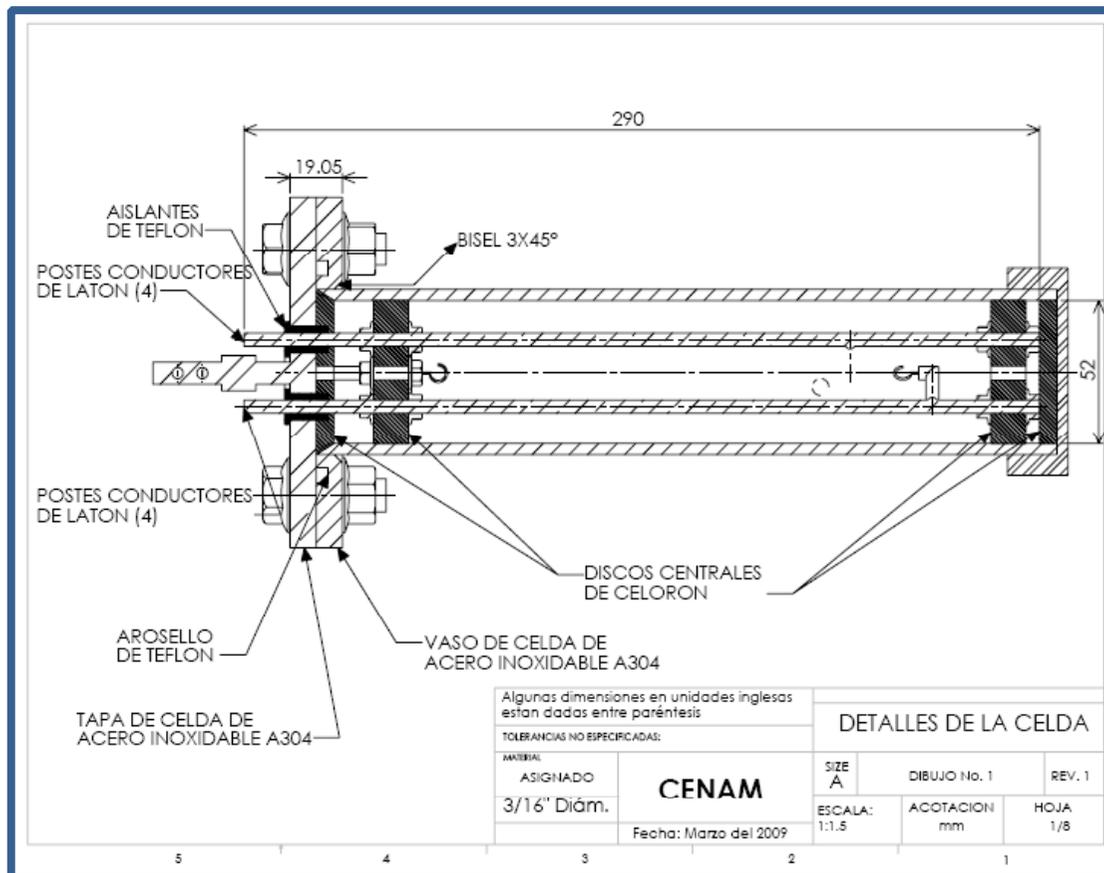
Radio del alambre. 15 μm .

Longitud de la celda. Dependiente de la longitud de los alambres, 14 cm y 17 cm

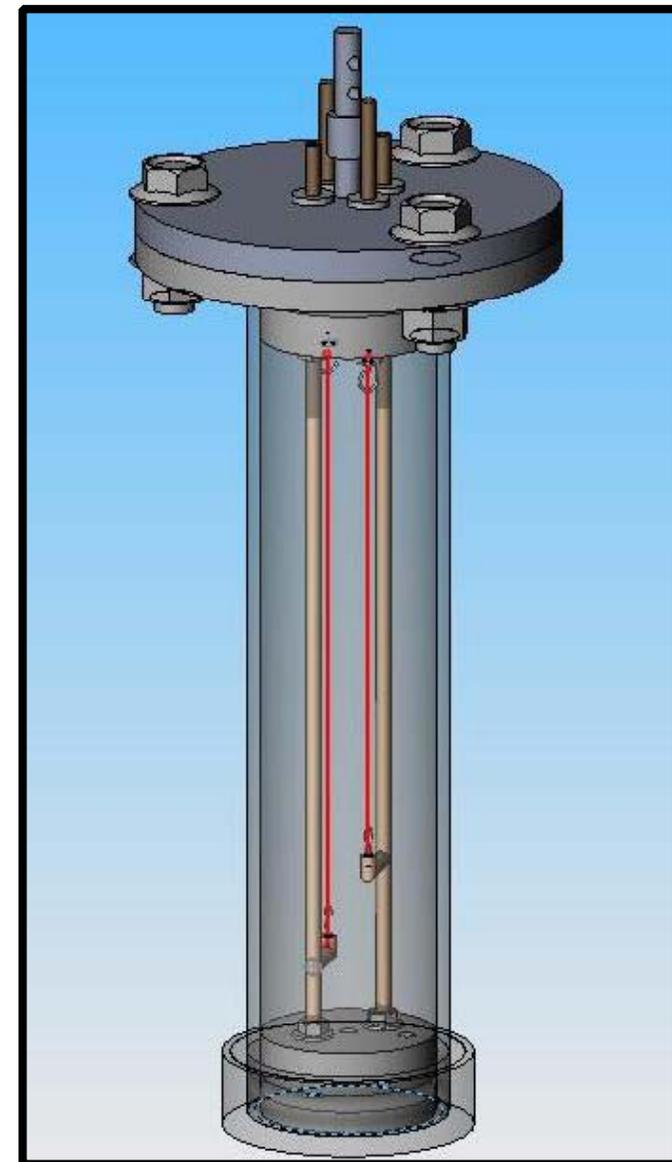
Material de la celda. Costo (acero inoxidable).

Radio de la celda. 5.2 cm.

Diseño adecuado de la celda, lo más cercano posible al modelo matemático mas simple para la misma.



Plano e imagen de la celda.





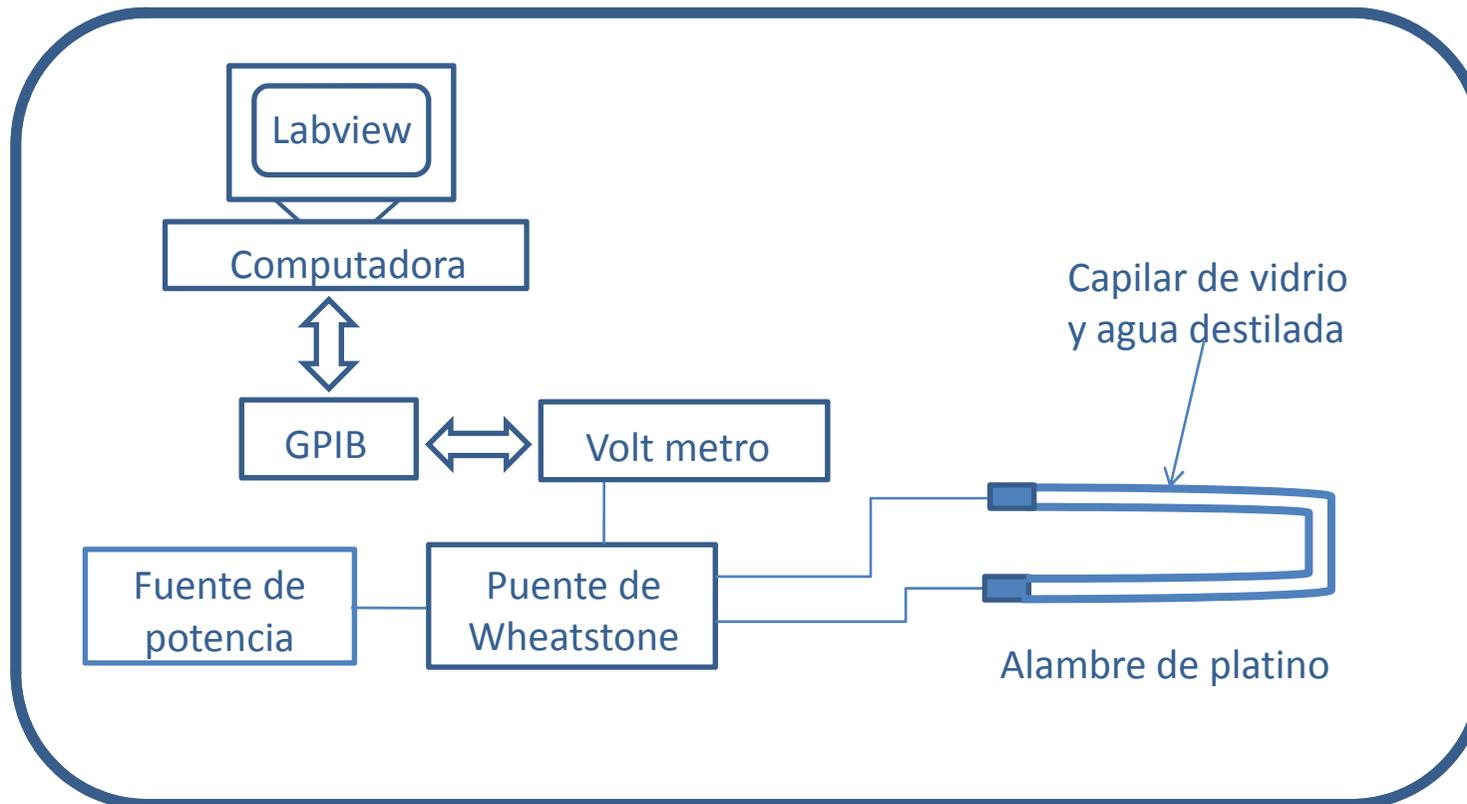
La celda consta principalmente de **cuatro postes de latón** con ganchos de plata (figura 4) los cuales soportan a los dos alambres de platino (14 y 17 cm) de **15 μm de diámetro**.

El arreglo de dos alambres es para **compensar la distorsión del campo de temperaturas** en los extremos del hilo caliente.

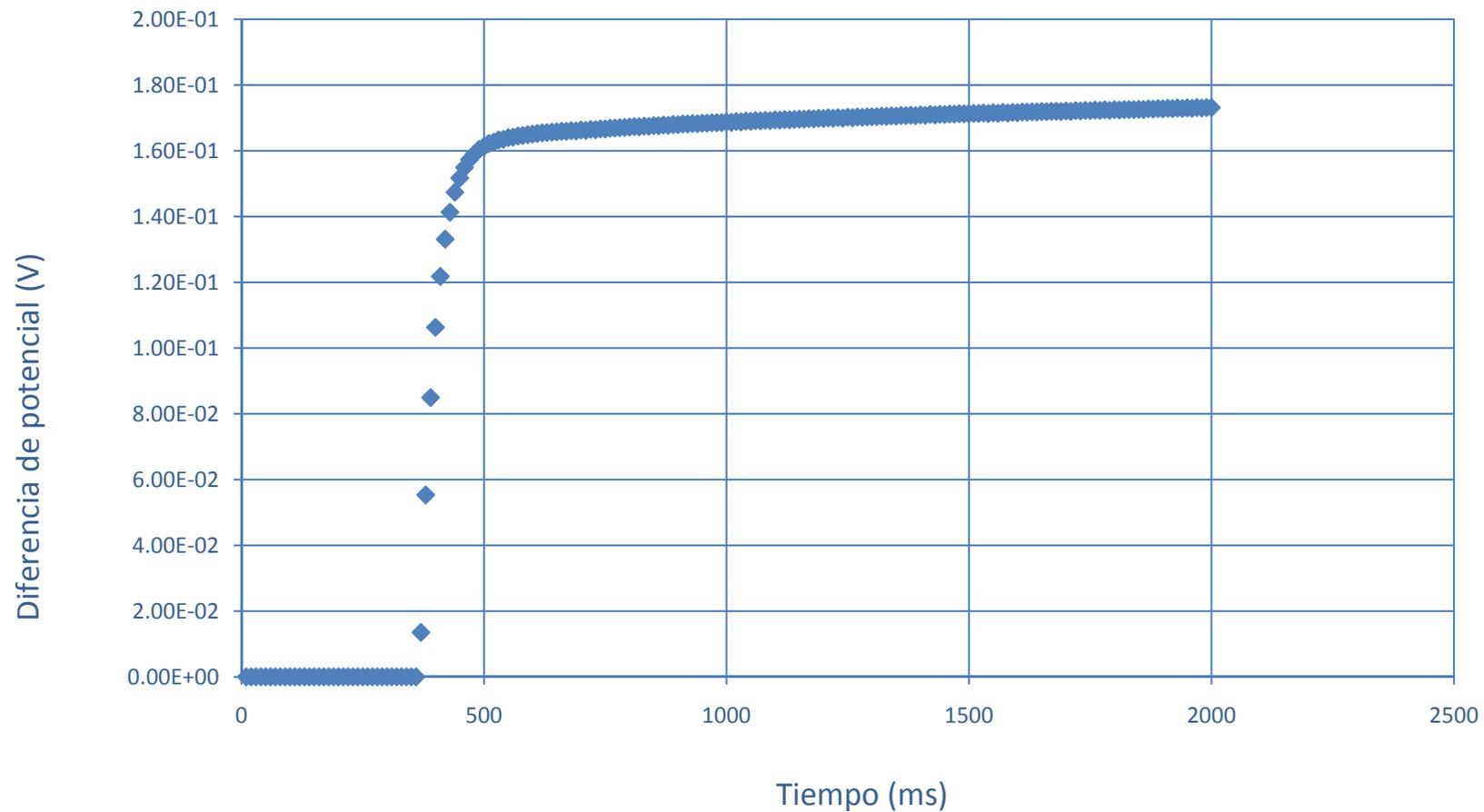
Mantener los **alambres verticales y paralelos entre si**, además de estar con **tensión constante** para evitar una deformación al momento de calentarse.

6. Pruebas

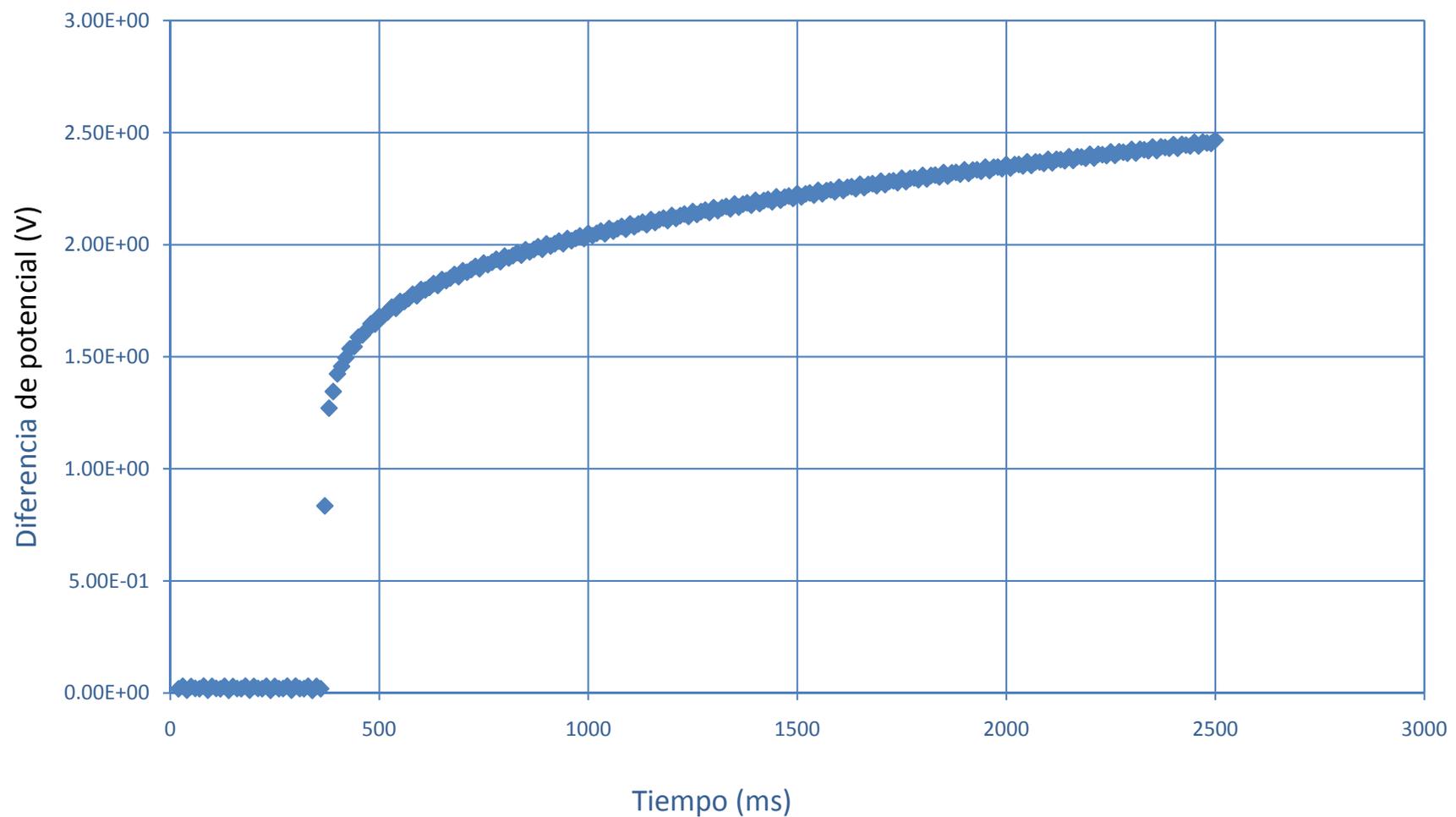
Se adaptó el sistema a un alambre de platino (20 cm, diámetro de 0.025 mm), el cual está dentro de un capilar de vidrio lleno de agua destilada y sellado en sus extremos.



Esquema de la prueba.



Muestra la diferencia de potencial contra el tiempo.



Comportamiento esperado.



8. Avances sobre el sistema de referencia

Se ha diseñado y construido un circuito eléctrico (**punto de Wheatstone**) para detectar los cambios de resistencia del alambre de platino.

Se cuenta con una ecuación para **determinar la resistencia del alambre** en función de la tensión total, de la tensión de desbalance y de las resistencias.

Caracterización del alambre de platino realizado por el laboratorio de termometría de resistencia del platino.

Implementación de un programa en Labview que nos permite obtener diferencia de voltajes de hasta **1000 datos por segundo**. Que además controla la fuente de corriente.

Las gráficas de la prueba muestran la región transitoria y la región estable del alambre, que es el comportamiento esperado para la técnica.



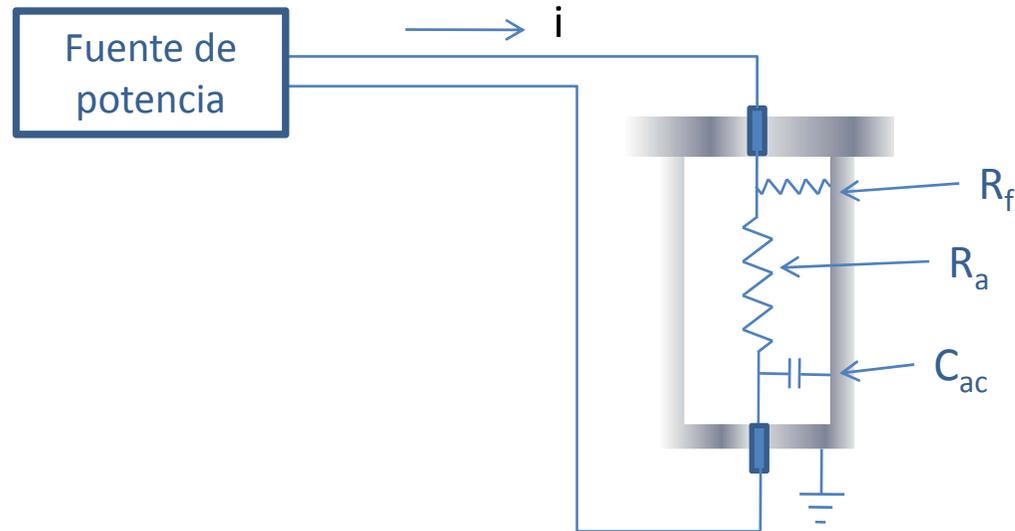
7. Trabajo futuro

Para fluidos simples: Realizar pruebas empleando la celda contenedora y el circuito puente de Wheatstone.

Determinar la λ del fluido muestra utilizado.

Para fluidos complejos: si el método para fluidos simples se utiliza para fluidos complejos, puede ocurrir los siguientes problemas:

1. Debido a la corriente eléctrica en el alambre, está provocará un **puente entre el alambre y la celda.**
2. **Polarización** del fluido cercano al alambre.
3. El sistema eléctrico esta en contacto con la celda metálica y el efecto combinado **resistencia-capacitancia** distorsiona las pequeñas señales de tensión en el alambre.



Posibles problemas para fluidos complejos.

Necesario aislar eléctricamente el alambre del fluido.

1. Capa de poliéster.
2. formar una capa de oxido sobre el alambre.
3. Alambre dentro de un tubo capilar.
4. Utilizar corriente alterna.

Determinar que técnica aislante utilizar.



**Encuentro Nacional de
Metrología Eléctrica 2009**
18-20 de noviembre

- Electromagnetismo
- Temperatura y Propiedades Termofísicas
- Tiempo y Frecuencia

