



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA

MEDICIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA BATERÍA DE IÓN-LITIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FRANCISCO TOMÁS MOSER KAHL

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS R. CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO PALMA BEHNKE
JORGE REYES MARAMBIO

Este trabajo ha sido financiado por el Centro de Energía de la Universidad de Chile, se le agradece a CORFO-Chile (11IDL1-10466 and 12IDL2-16296) y CONICYT/FONDAP (15110019) por su apoyo.

SANTIAGO DE CHILE

ENERO 2015

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico
POR: Francisco Tomás Moser Kahl
FECHA: 09/03/2015
PROFESOR GUIA: Williams Calderón Muñoz

MEDICIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA BATERÍA DE IÓN-LITIO

Las baterías Ión-Litio resultan ser una alternativa muy eficiente para aplicaciones móviles. Sin embargo muchos aspectos de su desempeño y seguridad son fuertemente afectados por la temperatura de operación de las celdas al interior de la batería, entre estos aspectos destacan la vida útil y la eficiencia.

Teniendo en cuenta lo anterior, el Centro de Energía (C.E.) de FCFM decidió investigar el comportamiento térmico de los arreglos de celdas Ión-Litio, con miras a la implementación de un software de optimización para el diseño de baterías, para lo cual generó diversos modelos de predicción de temperatura.

Como objetivos de este trabajo se tiene la caracterización del comportamiento térmico de una batería, con ventilación forzada, en función de distintas condiciones de operación y de configuración. Asimismo se pretende contrastar los resultados experimentales con las simulaciones en fluidodinámica computacional (CFD) y el modelo paramétrico, ambos generados por el C.E. Junto con lo anterior, también se espera identificar y comparar en importancia los distintos factores que influyen en el aumento de la temperatura de las baterías.

Lo anterior se logra por medio del diseño, construcción e implementación de un equipo capaz de medir la temperatura de las celdas para distintas disposiciones de estas, pudiendo variar el caudal de aire que fluye a través de la batería y midiendo la caída de presión.

Para la experimentación se cuenta con 2 disposiciones de celdas distintas y se experimenta con 3 caudales distintos por disposición. Asimismo se generan repeticiones de experimentos para asegurar la existencia de resultados similares para condiciones similares.

Posterior a la etapa de experimentación se analizan los datos obtenidos y validan o rechazan los modelos propuestos.

Como resultados se tiene que el comportamiento térmico que rige el enfriamiento de las celdas no es el predicho por los modelos contrastados, comportamiento tipo decaimiento exponencial, existiendo una diferencia entre el modelo y el experimento de hasta 4 °C. Este enfriamiento sucede de manera más rápida de lo predicho y es regido por una función levemente distinta a la utilizada por los modelos. Asimismo también se tiene que la configuración de las celdas tuvo poca influencia en la velocidad promedio de enfriamiento, sin embargo esta sí tuvo gran influencia en la homogeneidad de la temperatura dentro de la batería. En cuanto a los modelos contrastados, el modelo paramétrico mostró una tendencia distinta a la de los resultados obtenidos, lo cual significó su invalidez en la predicción. Por el otro lado, los resultados en las simulaciones de CFD tuvieron un error relativo de hasta un 138% invalidándolos también.

Como principal trabajo futuro queda propuesta la creación de un modelo de enfriamiento que prediga con mayor certeza el decaimiento de temperatura de las celdas, para lo cual se propone el modelo fractal. Asimismo se hace necesaria la investigación de la velocidad óptima de ventilación del arreglo.

Agradecimientos

A mis padres, Margot y Roberto, sin su ayuda y apoyo no hubiese sido posible llegar a este lugar.

A mi polola, Valentina, que me acompañó durante todo este proceso, alentándome en los momentos difíciles y acompañándome en los buenos. Por su comprensión y apoyo durante todo este proceso.

A mis amigos que me soportaron durante todo el proceso.

A mis profesores Jorge, Williams y Rodrigo por la orientación durante todo este trabajo. Un agradecimiento especial a Jorge por el apoyo brindado a lo largo del proyecto, especialmente durante la etapa de experimentación.

Y finalmente quiero agradecer al equipo EOBLi, por la disposición y la oportunidad de investigar este tema, especialmente a Bernardo por su disposición y gran ayuda durante el proyecto.

Muchas gracias.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes generales	1
1.2	Motivación.....	1
1.3	Objetivos	2
1.3.1	General.....	2
1.3.2	Específico	2
1.4	Alcances	2
2	Antecedentes	4
2.1	Unidades de una batería	4
2.2	Celda de Ión-Litio	5
2.3	Problemáticas que enfrenta una batería.....	6
2.3.1	Problemas de temperatura	6
2.3.2	Generación de calor en una celda.....	6
2.4	Empaquetamiento de baterías.....	7
2.4.1	Empaquetamiento tipo escalonado y no escalonado	7
2.5	Estado del arte en regulación de temperatura.....	8
2.6	Modelos a contrastar	9
2.6.1	Modelo de decaimiento exponencial	10
2.6.2	Modelo de MVF	12
2.6.3	Modelo paramétrico.....	12
2.7	Repetición experimental.....	13
2.8	Requerimientos generales.....	14
2.9	Especificaciones de la celda Ión-Litio ICR 26650.....	16
3	Metodología	17
3.1	Metodología general.....	17
3.1.1	Análisis de datos.....	18
3.2	Diseño y construcción de prototipo experimental.....	19
3.2.1	Prototipo de arreglo experimental	19
3.3	Diseño del arreglo experimental.....	26
3.3.1	Necesidades que debe satisfacer el experimento	26
3.3.2	Justificación del diseño de la estructura	26
3.3.3	Soportes	29

3.3.4	Diseño del cableado.....	32
3.4	Construcción y armado del experimento.....	33
3.5	Montaje experimental.....	33
3.5.1	Instrumentación utilizada	33
3.5.2	Disposición experimental	38
3.5.3	Medición con flujometro	43
3.5.4	Descripción experimental.....	46
4	Resultados experimentales	49
4.1	Temperatura de las celdas	49
4.2	Caída de Presión.....	50
5	Análisis de resultados experimentales.....	51
5.1	Repetición experimental.....	51
5.2	Comportamiento tipo decaimiento exponencial.....	58
5.2.1	Ajuste de curvas a modelo exponencial	58
5.2.2	Validez comportamiento tipo decaimiento exponencial	62
5.2.3	Razón de la Invalidez	62
5.3	Comparación entre disposiciones y velocidades	64
5.4	Comportamiento tipo modelo paramétrico.....	67
5.4.1	Ajuste de curvas a modelo paramétrico.....	67
5.4.2	Validez del modelo paramétrico.....	72
5.4.3	Razón de la invalidez.....	72
5.5	Método de volúmenes finitos	73
5.5.1	Ajuste de curva de decaimiento exponencial a resultados de MVF.....	73
5.5.2	Validez de las simulaciones.....	75
5.5.3	Razón de invalidez.....	75
5.6	Resultados preliminares con modelos fractales.....	76
6	Conclusiones	77
6.1	Validez de los modelos.....	77
6.1.1	Comportamiento tipo decaimiento exponencial.....	77
6.1.2	Modelo paramétrico.....	77
6.1.3	Método de volúmenes finitos	77
6.2	Comparación entre disposiciones y velocidades	77
6.3	Otros	77

6.4	Recomendaciones.....	78
6.4.1	Perfil de velocidades.....	78
6.4.2	Modelo fractal.....	78
6.4.3	Comportamiento térmico-químico	78
6.4.4	Potenciar el enfriamiento en los bordes de las celdas	78
6.4.5	Modelo de convección idéntica en columnas	79
6.4.6	Encontrar velocidad óptima de ventilación	80
6.4.7	Mejoras al arreglo experimental.....	80
6.4.8	Otros	80
7	Bibliografía.....	81
8	Anexos.....	a
A.	Celda Ión-Litio ICR 26650.....	a
B.	Ventilador 4412 FNH.....	b
C.	Planos Arreglo Experimental	c
D.	Construcción y Calibración	d
E.	Datasheet Termocuplas	e
F.	Check List Experimental	f
G.	Resultados Térmicos	g
H.	Resultados Ajuste Exponencial	h
I.	Metodología Modelo Paramétrico.....	i
J.	Incerteza Comp. (FMK)	j
K.	FittingParamétrico(FMK).....	k
L.	EvaluaciónMVF	l

Tabla de Figuras

Figura 1-1: Bosquejo de proceso de descarga y ventilación	2
Figura 2-1: Partes de una batería, Fuente: Centro de Energía	4
Figura 2-2: Módulo Ión-Litio conformado por 3 celdas, Fuente: www.electan.com.....	5
Figura 2-3: Partes y funcionamiento celda Ión-Litio, Fuente: Forococheelectricos.com.....	5
Figura 2-4: Izq. Disposición Escalonada, Der. Disposición No Escalonada.....	7
Figura 2-5: Diagrama Explicativo de Variables Utilizadas.....	12
Figura 2-6: Arreglo de Celdas, Fuente: [10].....	14
Figura 2-7: Diagrama explicativo módulo experimental.....	15
Figura 2-8: Diseño preliminar de soporte de celda, Fuente: [1].....	15
Figura 2-9: Celda Ión-Litio ICR 26650.....	16
Figura 3-1: Metodología general trabajo	18
Figura 3-2: Análisis de datos	19
Figura 3-3: Prototipo arreglo experimental disp. escalonada, a) Vista principal, b) Vista frontal, c) Vista posterior	20
Figura 3-4: Prototipo arreglo experimental disposición alineada.....	20
Figura 3-5: Celdas con termocuplas acopladas	20
Figura 3-6: Esquema de enumeración de celdas	21
Figura 3-7: Carga programable BK Precision 8500	21
Figura 3-8: Bosquejo de proceso de descarga y ventilación	22
Figura 3-9: Tarjeta de adquisición de datos.....	22
Figura 3-10: Gráfico temperatura celdas, disposición escalonada	23
Figura 3-11: Gráfico temperatura celdas, disposición alineada	24
Figura 3-12: Gráfico decaimiento temperatura celdas, disposición escalonada.....	25
Figura 3-13: Gráfico decaimiento temperatura celdas, disposición alineada.....	25
Figura 3-14: Diseño tentativo de arreglo experimental	27
Figura 3-15: Adaptador acoplado a Túnel.....	29
Figura 3-16: Diseño de Soporte Celdas.....	30
Figura 3-17: Soporte celda armado	30
Figura 3-18: Ensamble soporte, conceptual	31
Figura 3-19: Soporte definitivo e implementación en experimento	31
Figura 3-20: Soporte de investigaciones similares, Fuente: [4]	32

Figura 3-21: Soportes y sus cables respectivos	33
Figura 3-22: Conversor DC/AC	34
Figura 3-23: Resistencia	34
Figura 3-24: iCharger	35
Figura 3-25: Fuentes de Poder.....	35
Figura 3-26: Equipo de Medición de Temperatura	36
Figura 3-27: Termocupla	36
Figura 3-28: Sensor de Presión y Tarjeta de Adquisición	37
Figura 3-29: Termo Anemómetro ALNOR 8525.....	37
Figura 3-30: Flujometro AirFlow LCA 6000.....	38
Figura 3-31: Bosquejo Disposiciones Experimentales, Fuente: Centro de Energía.....	38
Figura 3-32: Arreglo Experimental	39
Figura 3-33: Posición Termocupla Temperatura Ambiente	40
Figura 3-34: Termocupla Temperatura de Salida.....	41
Figura 3-35: Posición Termocuplas Temperatura Ambiente y Salida	41
Figura 3-36: Posicionamiento de las Termocuplas según disposición utilizada, Fuente: Centro de Energía.....	41
Figura 3-37: Orientación Termocuplas, Fuente: Centro de Energía	42
Figura 3-38: Puntos de Medición de Presión	43
Figura 3-39: Dirección del aire en ventiladores axiales	43
Figura 3-40: Puntos medidos.....	44
Figura 3-41: Medición de velocidad de entrada utilizando flujometro	44
Figura 3-42: Relación de velocidades medidas	45
Figura 3-43: Medición de Velocidad en Ventiladores.....	46
Figura 3-44: Descarga eléctrica tipo.....	47
Figura 3-45: Temperatura durante descarga y ventilación	48
Figura 4-1: Experimento 1, disposición alineada, caudal 74,6 [m ³ /hr]	49
Figura 4-2: Caída de presión en Arreglo de Celdas.....	50
Figura 5-1: Repetitividad exp. 2, celda 1 y 2.....	52
Figura 5-2: Repetitividad exp. 2, celda 3 y 4.....	53
Figura 5-3: Repetitividad exp. 2, celda 5 y 6.....	54
Figura 5-4: Repetitividad exp. 5, celda 1 y 2.....	55
Figura 5-5: Repetitividad exp. 5, celda 3 y 4.....	56

Figura 5-6: Repetitividad exp. 5, celda 5 y 6.....	57
Figura 5-7: Ajuste Exponencial Exp. 1	59
Figura 5-8: Gráfico τ vs. vel, disposición alineada	61
Figura 5-9: Gráfico τ vs. vel, disposición escalonada	62
Figura 5-10: Comparación de enfriamiento entre disposiciones	65
Figura 5-11: Comparación de desviaciones estándar entre disposiciones.....	65
Figura 5-12: Razones de Desempeño en función de la velocidad	65
Figura 5-13: Gráfico τ vs. velocidad promedio, disposición alineada	67
Figura 5-14: Gráfico τ vs. velocidad promedio, disposición escalonada.....	68
Figura 5-15: Ajuste Curvas Paramétricas en Disposición Alineada.....	70
Figura 5-16: Ajuste Curvas Paramétricas en Disposición Escalonada.....	71
Figura 5-17: Resultados MVF y ajuste exponencial, celda 1, Velocidad de entrada= 1,8 [m/s], equivalente a Exp. 1.....	73
Figura 5-18: Ajuste Utilizando Modelo Fractal	76
Figura 6-1: Bosquejo Conceptual de Soporte.....	79
Figura 6-2: Disposición Escalonada	79
Figura 7-1: Plano de Corte de Acrílico.....	i
Figura 7-2: Piezas Maquinadas y Pegadas	ii
Figura 7-3: Chapa Cangrejo	ii
Figura 7-4: Estructura Arreglo Experimental.....	iii
Figura 7-5: Molde de silicona y su respectivo <i>master</i>	iii
Figura 7-6: Soporte generado en MEPUR.....	iv
Figura 7-7: Implementación del Soporte	iv
Figura 7-8: Implementación de Protector Eléctrico	v
Figura 7-9: Pegado de Termocuplas a Celdas	vi
Figura 7-10: Celdas Instaladas	vi
Figura 7-11: Celdas instaladas con sus soportes	vii
Figura 7-12: Cables bananas instalados.....	vii
Figura 7-13: Aplicando Cinta Adhesiva.....	viii
Figura 7-14: Vista Explosionada Soporte.....	viii
Figura 7-15: Prisionero con Tuerca y Resorte.....	viii
Figura 7-16: Posicionando Prisionero e instalando la Tuerca	ix
Figura 7-17: Conexión con Terminal Ojo	ix

Figura 7-18: Conexión correcta (Der), conexión incorrecta (Izq).....	ix
Figura 7-19: Arreglo de soportes problemáticos	x
Figura 7-20: Pistola de pegamento termofusible	xi
Figura 7-21: Termocupla con <i>maskingtape</i>	xi
Figura 7-22: Termocupla lista para instalar.....	xii
Figura 7-23: Pegado preliminar de termocupla	xii
Figura 7-24: Pegado de termocupla.....	xiii
Figura 7-25: Pegado termocupla.....	xiii
Figura 7-26: Experimento 1, Caudal 74,6 [m3/hr]	ii
Figura 7-27: Experimento 2, Caudal 152,6 [m3/hr]	iii
Figura 7-28 : Experimento 3, Caudal 122,9 [m3/hr]	iv
Figura 7-29: Experimento 9, Caudal 152,6 [m3/hr]	v
Figura 7-30: Experimento 6, Caudal 75,9 [m3/hr]	vi
Figura 7-31: Experimento 10, Caudal 153,0 [m3/hr]	vii
Figura 7-32: Experimento 11, Caudal 122,1 [m3/hr]	viii
Figura 7-33: Experimento 5, Caudal 109,3 [m3/hr]	ix
Figura 7-34: Experimento 8, Caudal 109,3 [m3/s].....	x
Figura 7-35: Ajuste Exponencial Exp. 1	ii
Figura 7-36: Ajuste Exponencial Exp. 2	iii
Figura 7-37: Ajuste Exponencial Exp. 3	iv
Figura 7-38: Ajuste Exponencial Exp. 5	v
Figura 7-39: Ajuste Exponencial Exp. 6	vi
Figura 7-40: Ajuste Exponencial Exp. 8	vii
Figura 7-41: Ajuste Exponencial Exp. 9	viii
Figura 7-42: Ajuste Exponencial Exp. 10	ix
Figura 7-43: Ajuste Exponencial Exp. 11	x

Capítulo 1

1 Introducción

1.1 Antecedentes generales

La batería de Ión-Litio surge como alternativa tecnológica a finales del siglo XX, siendo sus primeras aplicaciones enfocadas a su uso en la electrónica, con gran protagonismo en la industria de celulares. Esta alternativa energética ha comenzado a tomar fuerza más allá de la electrónica, imponiéndose en la última década como fuente energética en la industria automovilista, compitiendo con la bencina y motores de combustión.

Las baterías de Ión-Litio resultan ser una tecnología muy atractiva para el almacenamiento de energía debido a su alta densidad energética y la posibilidad de ser recargadas. Su funcionamiento se basa en la reacción electroquímica entre un cátodo y un ánodo por medio de un electrolito, similar al funcionamiento de cualquier batería.

A pesar de las grandes bondades de esta tecnología, las baterías de Ión-Litio tienen la desventaja de ser costosas y de tener una vida útil que se ve gravemente afectada si las celdas son sometidas a altas temperaturas.

Por lo general, la principal fuente de calor presente en las baterías resulta ser las celdas en sí mismas, las cuales durante su funcionamiento disipan parte de su energía en forma de calor. En la práctica existen diversas alternativas de refrigeración para contrarrestar este problema, una solución común es la implementación de un sistema de ventilación forzada por medio de uno o varios ventiladores. Sin embargo lo anterior implica para la batería un consumo energético extra, dado que los ventiladores son alimentados por la misma. Además se tiene que no necesariamente todas las celdas son enfriadas de la misma manera, lo que implica que el deterioro de algunas va a ser distinto de otras, disminuyendo la eficiencia y vida útil del sistema.

Puesto que la forma en que el aire ataca a cada celda va a estar dada en parte por la disposición geométrica de estas dentro de la batería, la refrigeración de las celdas dependerá de la disposición. Por consiguiente la disposición de las celdas dentro del pack afecta la distribución de temperatura, la eficiencia de la refrigeración y como consecuencia la vida útil de la batería.

1.2 Motivación

En consecuencia de lo anterior el Centro de Energía, del Departamento de Ing. Eléctrica de la FCFM de la U. de Chile, genera el proyecto EOBLi (Empaquetamiento Óptimo de Baterías de Litio). Este proyecto contempla la investigación del comportamiento térmico de las baterías de Ión-Litio con el propósito de implementar un software capaz de optimizar el empaquetamiento de las baterías.

El proyecto ha generado grandes avances investigativos, sin embargo gran parte de su investigación ha sido en base a modelos teóricos e investigaciones generadas por medio de softwares de CFD. Dicho lo anterior, el proyecto se encuentra en la necesidad de generar un

arreglo experimental¹ flexible para poder validar sus investigaciones existentes y futuras. Junto con lo anterior, también se encuentra en la necesidad de validar ciertos resultados específicos enfocados en el decaimiento de temperatura post-descarga de la batería, bajo convección forzada de aire, en la Figura 1-1 se puede ver el proceso de descarga y ventilación tipo de una batería. Estos resultados específicos serían: la validez de los resultados generados por medio de simulaciones de CFD y la valides del modelo paramétrico.

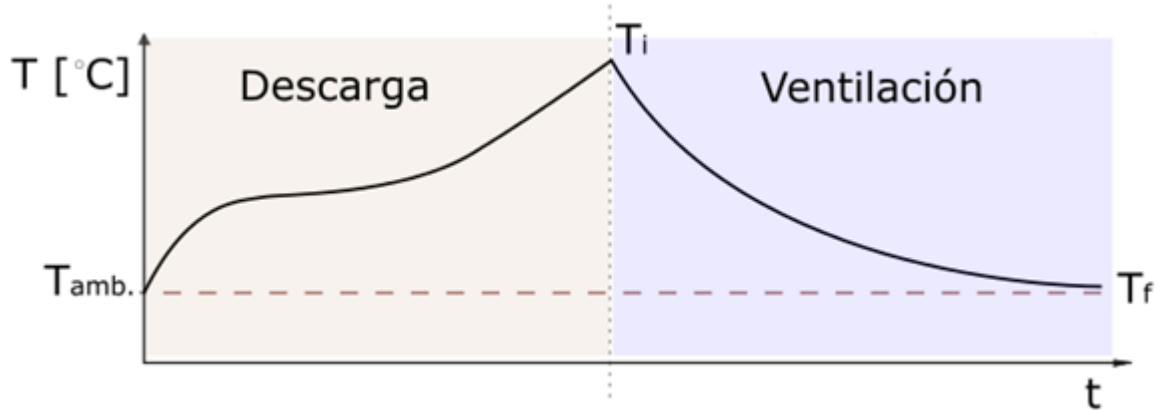


Figura 1-1: Bosquejo de proceso de descarga y ventilación

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Caracterizar el comportamiento térmico de las celdas de una batería Ión-Litio para distintas condiciones de operación y de configuración, por medio del diseño, construcción e implementación de un arreglo experimental.

1.3.2 Específico

- Medición de temperatura en celdas, caudal y caída de presión del aire en el arreglo.
- Estudiar la influencia de la velocidad del aire y el tipo de ordenamiento de las celdas sobre el enfriamiento de las estas.
- Contrastar las mediciones experimentales de temperatura con las predicciones del modelo paramétrico y simulaciones de CFD.

1.4 Alcances

- No se ahondará en la metodología de las simulaciones, estas sólo serán contrastadas.
- Sólo se utilizarán dos ordenamientos de celdas, uno escalonado y uno alineado.
- Ambos ordenamientos utilizarán las mismas distancias relativas entre celdas S_d y S_t .
- El arreglo experimental contará con un máximo de 30 celdas.

¹ Se entenderá en este informe por arreglo experimental, el equipo capaz de medir el comportamiento de un arreglo o disposición de celdas bajo diversas condiciones de operación.

- Se utilizarán sólo celdas Ión-Litio ICR 26650, ver anexo A.
- No se analizará el proceso de descarga de la celda.

Capítulo 2

2 Antecedentes

Dentro de las propiedades de las baterías de Ión-Litio destacan el bajo peso de sus componentes, su elevada capacidad energética y baja resistencia durante la descarga. Asimismo destaca también su capacidad para funcionar con un elevado número de ciclos de carga y descarga.

Lo anterior ha permitido el diseño de acumuladores livianos, de pequeño tamaño, variadas formas y con un alto rendimiento. Desde la primera comercialización de un acumulador basado en la tecnología Ión-Litio a principios de los años 1990, su uso se ha popularizado en gran cantidad de componentes electrónicos, como baterías de celulares, reproductores portátiles, etc. y asimismo ha surgido como fuente energética en la industria automovilista.

Sin embargo, su rápida degradación y sensibilidad a las elevadas temperaturas resultan ser factores importantes a la hora de decidirse por esta tecnología. En consecuencia de lo anterior el manejo de la temperatura resulta ser un factor extremadamente importante a tomar en cuenta a la hora de diseñar productos que incluyan estos componentes.

2.1 Unidades de una batería

Las baterías están compuestas por ciertas unidades, siendo una la base de la siguiente, como se ve en la Figura 2-1. Resulta importante especificar estas unidades para la mejor comprensión del trabajo.

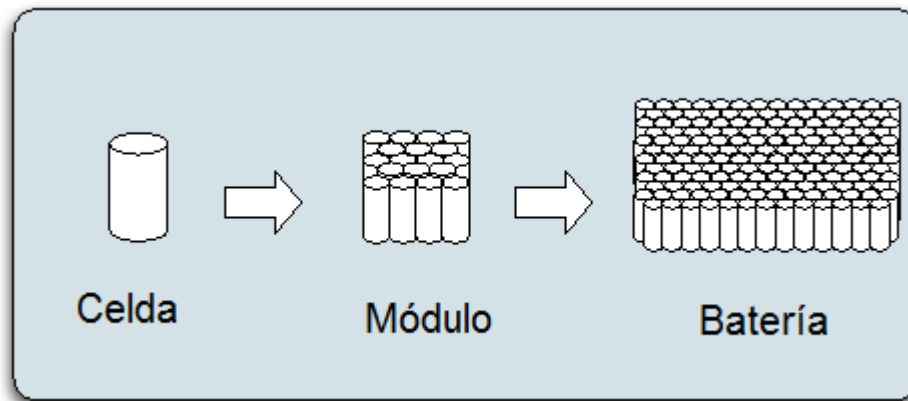


Figura 2-1: Partes de una batería, Fuente: Centro de Energía

- Celda: Es la unidad básica más pequeña. Se pueden agrupar en módulos para formar baterías. Esta unidad es la que determina finalmente las características de la batería en cuanto a capacidad y dependiendo del tipo de conexión entre estas, determina al mismo tiempo la tensión y corriente de la batería, lo que en conjunto da la potencia.
- Módulo: Corresponde a un conjunto de celdas conectadas entre sí, ver Figura 2-2.
- Batería o Pack: Consiste en la conexión de varios módulos entre sí, esta conexión puede incluir elementos complementarios, tales como sensores de temperatura, convertidor de tensión, monitor de estado de carga, ventiladores, etc.



Figura 2-2: Módulo Ión-Litio conformado por 3 celdas, Fuente: www.electan.com

2.2 Celda de Ión-Litio

El concepto celda, se refiere a la unidad más básica dentro de un empaque de batería. Comúnmente se utiliza este componente en el almacenamiento energético de dispositivos electrónicos como celulares, cámaras fotográficas, controles remoto, etc.

La celda de iones de litio, también denominada celda Li-Ion, es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica, estas celdas están compuestas por un ánodo, un cátodo, un separador y un electrolito. Durante la descarga, el electrolito permite el traspaso de iones desde el ánodo hacia el cátodo, mientras que el separador evita el contacto directo entre ambos. Finalmente cuando el circuito entre el ánodo y el cátodo es cerrado, se genera un flujo de electrones desde el ánodo al cátodo, dando lugar a corriente eléctrica, ver Figura 2-3. En el caso de las celdas ión-litio, el electrolito está compuesto por una sal de litio. En este tipo de celdas, el proceso es reversible, por lo tanto son secundarias (recargables). [1]

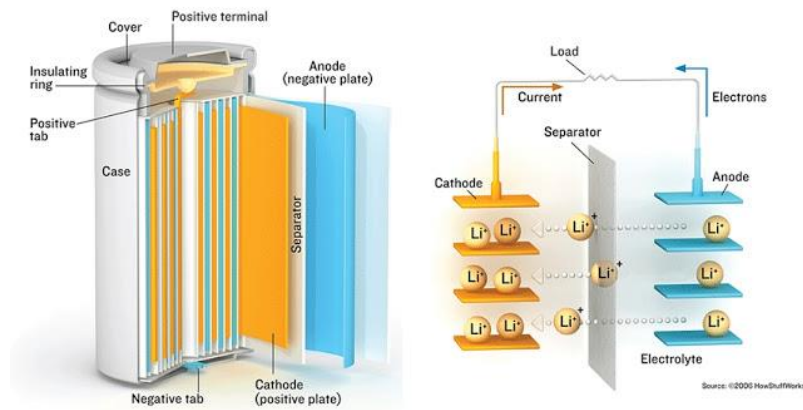


Figura 2-3: Partes y funcionamiento celda Ión-Litio, Fuente: Forococheselectricos.com

2.3 Problemáticas que enfrenta una batería

Resulta importante para este trabajo, la comprensión de las problemáticas presentes en una batería, asociadas al funcionamiento a altas temperaturas y generación de calor.

2.3.1 Problemas de temperatura

Un fenómeno de gran importancia para este proyecto es la generación de calor al interior de las baterías de Ión-Litio durante su uso. Este fenómeno resulta muy relevante para este trabajo, dado que la vida útil y capacidad de la batería es gravemente afectada por las altas temperaturas de operación [2], [3], [4] y [5], asimismo también se ve afectada por la no homogeneidad de temperatura a lo largo de la celda y a lo largo de la batería misma [4], [5].

Se recomienda que la temperatura de las celdas se mantenga en un rango entre los 25°C y 40°C para maximizar su rendimiento, vida útil y aminorar la pérdida de capacidad por envejecimiento térmico [4]. Cabe mencionar que temperaturas de operación muy altas, entre los 70[°C] y los 180[°C], dependiendo de la celda [1], pueden dañar la celda, llegando incluso a la descomposición del interfaz electrolítico (Solid Electrolyte Interface, SEI) de la celda. Lo anterior puede conllevar a la generación de un cortocircuito interno que finalmente conduce a una falla catastrófica, pudiendo la celda incluso explotar [6], poniendo en riesgo a los usuarios.

Dado lo anterior y sumado al alto costo de la tecnología², se hace indispensable el manejo térmico del banco durante su carga y descarga, para aminorar el impacto de la temperatura sobre este, junto con los riesgos asociados a un sobrecalentamiento de las celdas.

2.3.2 Generación de calor en una celda

El calor generado al interior de la celda puede tener varias causas, estas se presentan a continuación [1]:

- Reacción entre electrolito y ánodo.
- Descomposición térmica del electrolito
- Reacción entre electrolito y cátodo.
- Descomposición térmica del ánodo.
- Descomposición térmica del cátodo.
- Cambio de entropía en el material activo del cátodo o el ánodo.
- Corriente fluyendo a través de una celda con resistencia interna.

Por lo general se tiene que la causa predominante en la generación de calor dentro de la batería resulta ser el flujo de corriente a través de ella, el cual dada su resistencia interna produce disipación de energía en forma de calor, ver ecuación (2.1).

$$Q_{celda} = R_{cell} \cdot I^2 \quad (2.1)$$

Con:

- Q_{celda} el calor generado por la celda.
- R_{cell} la resistencia eléctrica interna de la celda.

² Como referencia de su costo, se tiene que la celda utilizada para la experimentación en este trabajo cuesta alrededor de 20 USD, con una capacidad energética de 14,8 Wh y una capacidad de almacenaje de 4000mAh.

- I la intensidad de corriente que pasa por la celda.

2.4 Empaquetamiento de baterías

El empaquetamiento de una batería está dado por la distribución geométrica de las celdas, junto con los otros componentes requeridos para el correcto funcionamiento de ésta, *e.g.* sensores de temperatura, controladores, monitor de estado de carga, contactos eléctricos.

El material y el diseño de la caja en que se contendrán las celdas resultan ser factores relevantes tanto por razones de seguridad, en caso de un desperfecto, como por razones de funcionamiento.

Para el diseño de un banco de baterías se deben tener en cuenta un importante número de parámetros definidos por la aplicación para la que se está diseñando. Esto definirá capacidad de almacenamiento, potencia eléctrica, voltaje y otros parámetros. En conjunto con lo anterior, también se debe tener en cuenta las limitaciones económicas y técnicas.

Un buen diseño del empaquetamiento de una batería resulta crucial, dado que éste definirá su costo y desempeño en la aplicación para la que es diseñado. Cabe destacar que en muchos casos existe un *trade-off* entre las distintas características deseables de una batería, por ejemplo la potencia puede ir en desmedro de la capacidad. Dado lo anterior, diseño óptimo de un banco resulta ser una tarea compleja.

Los aspectos fundamentales que se tratan de resolver por medio de un buen empaquetamiento son los siguientes:

- Aspectos mecánicos: Correcta disipación de calor en la batería, robustez frente a impactos, vibraciones y fallas.
- Aspectos eléctricos: Potencia, voltaje y corrientes adecuados, contactos eléctricos robustos, sistema de control robusto y eficiente.
- Aspectos de diseño: Sistema simple, pequeño, de fácil y segura manipulación.
- Aspectos económicos: Lograr lo anterior manteniendo un precio competitivo, maximizando la vida útil.

2.4.1 Empaquetamiento tipo escalonado y no escalonado

Una de las variables relevantes de diseño es la disposición geométrica de las celdas dentro del arreglo experimental. Si bien existen infinitas formas en las que las celdas pueden ser ordenadas, existen dos disposiciones predilectas a la hora de empaquetar celdas cilíndricas, las cuales son disposición tipo escalonada y no escalonada, ver Figura 2-4.

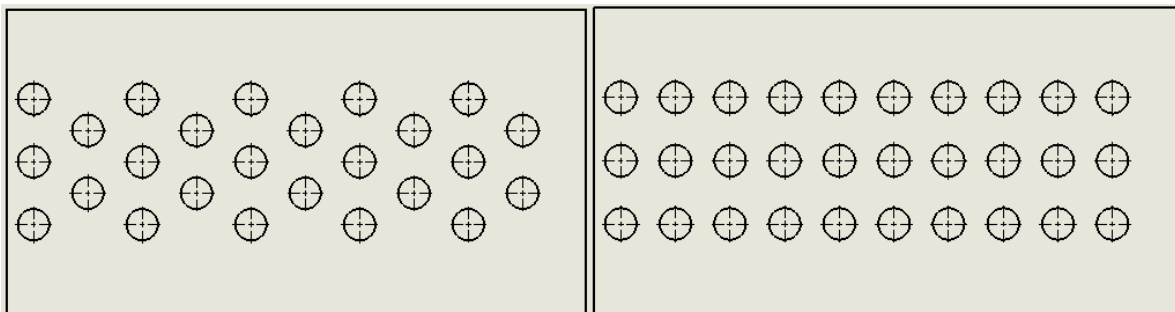


Figura 2-4: Izq. Disposición Escalonada, Der. Disposición No Escalonada

Si bien en términos generales la disposición tipo escalonada tiende a generar una mejor refrigeración de las celdas, ésta es notablemente menos eficiente en cuanto a espacio, cuando el número de celdas por fila es bajo. Lo anterior se hace evidente en la Figura 2-4, donde para un empaquetamiento de 10 columnas y un máximo de 3 celdas por fila, la disposición tipo escalonada logra albergar sólo 25 celdas, mientras que la disposición no escalonada logra albergar 30, para más detalle sobre sus dimensiones, ver anexo Planos Arreglo Experimental.

2.5 Estado del arte en regulación de temperatura

Dadas las problemáticas térmicas presentes en las baterías, se han realizado grandes investigaciones a nivel mundial enfocadas a modelar el comportamiento térmico de estas.

En relación a las publicaciones enfocadas en la regulación de temperatura en bancos utilizando aire como refrigerante, el mayor número de estas se enfoca en la modelación computacional del comportamiento del banco utilizando de softwares de fluidodinámica computacional, CFD, acoplados con modelos eléctricos para simular el calentamiento de las celdas, u modelos netamente teóricos, [2], [3], [4], [5], [7], [8]. Si bien por medio de estas herramientas es posible llegar a resultados de predigan muy bien la realidad, se hace necesario el contraste experimental para dar validez a los resultados.

En cuanto a las publicaciones que sí han corroborado los modelos con resultados experimentales, como son el caso de [3], [4], [5], [7] . Estas han llegado a importantes resultados que se traducen en un buen modelo térmico de las celdas. Sin embargo, en su gran mayoría, este tipo de experimentos se encuentra muy limitado en cuanto a la disposición de las celdas, razón por la cual las optimizaciones de disposición generadas utilizan sólo una variable a optimizar, *e.g.* separación entre celdas en el eje x, puesto que la disposición experimental no permite la optimización de más variables.

A continuación se presenta el trabajo existente a la fecha:

- *Tao Wang et al.* [2] se dedica a la investigación con CFD del empaquetamiento óptimo de una batería de 24 celdas cilíndricas. Esta optimización la hacen en función de la disposición geométrica de las celdas y la localización del ventilador y salida de aire. El objetivo de esta optimización es minimizar las temperaturas máximas de las celdas T_{max} , la máxima diferencia de temperatura a lo largo del banco ΔT y la temperatura promedio del banco \bar{T} , alcanzadas en régimen estacionario. Su investigación se asemeja bastante a la investigación a realizar, pero con la diferencia de que la investigación de *Tao Wang et al.* no es experimental.
- *Hongguang et al.* [3] realiza simulaciones mezclando tres tipos de modelos distintos para la optimización y determinación de distintas variables, tales como caída de presión, distribución de temperatura, etc. Entre los modelos utilizados está presente el software de CFD Fluent. El trabajo realizado es generado utilizando celdas prismáticas las cuales se encuentran ordenadas una frente a la otra, teniendo como parámetro la distancia entre ellas. El modelamiento se enfoca en comportamiento transiente y estacionario del pack. En este caso existe corroboración experimental. Cabe destacar que si bien existe optimización en cuanto a la disposición, la investigación solo abarca dos disposiciones que son las que el autor define como disposición tipo U y tipo Z, siendo la disposición Z la que entrega mejores resultados.

- *L.H. Saw et al.* [4] busca generar un modelo teórico del comportamiento de una batería de celdas cilíndricas utilizando ciclos de descarga de diversos tipos, entre estos (ciclos de descarga) destaca el Simplified Federal Driving Schedule Profile (SFUDS). Utiliza dos tipos de celdas distintas y finalmente abarca la problemática de la integración y selección de celdas en vehículos eléctricos. Dentro de sus conclusiones destaca el descubrimiento de que una potencia de ventilación muy alta puede ser perjudicial para las celdas, si es que estas últimas son las que alimentan a los ventiladores, esto indicaría la existencia de una potencia óptima de ventilación.
- *Xuesong Li et al.* [5] investiga el control de temperatura de una batería de 24 celdas utilizando CFD (Ansys-Fluent) y los valida con los resultados en un túnel de viento para una disposición simple de 8 celdas. En esta investigación el modelo de CFD utilizado es 2D, por el contrario de las otras. Posteriormente con los resultados crea un modelo para predecir el comportamiento, sin embargo el modelo tiene errores de predicción de hasta 3°C para algunos casos. Se considera insuficiente la validación de las simulaciones por medio de una sola disposición experimental simplificada, especialmente cuando se realizan simulaciones en 2D, dado que este tipo de simulaciones no incluye toda la física presente en las simulaciones 3D.
- *Cong Zhu et al.* [7] se dedica al desarrollo de un modelo teórico para la predicción de la temperatura en un banco de 20 celdas prismáticas. Además de la creación de un modelo teórico, *Cong Zhu et al.* descubre la existencia de que dada una potencia del ventilador, existe siempre un óptimo para el coeficiente de resistencia aerodinámica, que entrega la mayor disipación de energía calórica en el banco, lo cual apunta también a la existencia de un óptimo de ventilación.
- *Liwu Fan et al.* [8] realiza una investigación paramétrica sobre la separación entre celdas para una batería de 8 celdas prismáticas por medio de un software de CFD. La optimización se realiza bajo la condición de que la separación entre celdas sea igual para todas. Posteriormente se procede a variar el flujo de aire a través de ellas. El objetivo de la optimización se centra en los criterios de temperatura máxima, promedio y variación de temperatura en la celda. Posterior a todo esto se propone un nuevo diseño con espaciamientos distintos a lo largo de la batería.

Esta investigación pretende corroborar los modelos realizados en CFD con datos experimentales, sin embargo su novedad yace en que la disposición de las celdas puede ser cambiada fácilmente, permitiendo que en futuras investigaciones la optimización pueda abarcar una amplia gama de parámetros existentes para la generación de las disposiciones. Asimismo esta facilidad para experimentar con distintas disposiciones permite que el trabajo experimental sea un complemento de las simulaciones, más que una vía para la validación de estas.

Cabe destacar que la temática tratada es relativamente nueva, las publicaciones referenciadas fueron generadas dentro de los últimos 2 años.

2.6 Modelos a contrastar

Los modelos a contrastar por medio de este trabajo son dos: Los resultados generados por medio de las simulaciones de MVF en Ansys y el modelo paramétrico, el cual fue generado en base a resultados de simulaciones de MVF. Sin embargo ambos modelos toman como supuesto, que el decaimiento térmico de temperatura se ajusta al modelo de decaimiento exponencial y entregan como resultado variables de este último modelo. Luego se hace necesario evaluar la veracidad del

modelo de decaimiento exponencial antes de contrastar los otros modelos. A continuación se explican los modelos.

2.6.1 Modelo de decaimiento exponencial

Como consecuencia del principio de conservación de energía se tiene que:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} \quad (2.2)$$

Con:

- E_{vc} la energía de un volumen de control.
- \dot{E}_{in} la energía que se le entrega al volumen de control.
- \dot{E}_g la energía generada en el volumen de control, puede ser nuclear, eléctrica o química.
- \dot{E}_{out} la energía expulsada del volumen de control.

Tomando como volumen de control a una celda y dado su calor específico la ecuación (2.2) se reescribe como:

$$mc \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_g - \dot{Q}_{out} \quad (2.3)$$

Con:

- m la masa de cuerpo.
- c la capacidad calórica específica del cuerpo.
- T la temperatura del cuerpo.
- t el tiempo.
- \dot{Q}_{in} el calor entregado al cuerpo.
- \dot{Q}_{out} el calor cedido por el cuerpo por concepto de radiación, convección y conducción.
- \dot{Q}_g calor generado por el cuerpo, en este caso debido a la reacción electroquímica.

Puesto que los modelos se enfocan en el enfriamiento post-descarga, el calor generado \dot{Q}_g y de entrada \dot{Q}_{in} se hacen nulos, simplificando la ecuación a:

$$mc \frac{dT}{dt} = -\dot{Q}_{out} \quad (2.4)$$

Expandiendo término del calor cedido, se reescribe la ecuación como:

$$mc \frac{dT}{dt} = -(\dot{Q}_{Cond.} + \dot{Q}_{Conv.} + \dot{Q}_{Rad.}) \quad (2.5)$$

Con:

- $\dot{Q}_{Cond.}$ el calor cedido a través de conducción térmica.
- $\dot{Q}_{Conv.}$ el calor cedido a través de convección.
- $\dot{Q}_{Rad.}$ el calor cedido a través de radiación.

Bajo el supuesto final de que la pérdida de energía se realiza solamente por convección³, se llega a la siguiente ecuación diferencial:

$$mc \frac{dT}{dt} = -hA(T(t) - T_{\infty}) \quad (2.6)$$

Con:

- h el coeficiente de convección.
- A la superficie en contacto con el fluido.
- $T(t)$ la temperatura del cuerpo en función del tiempo.
- T_{∞} la temperatura en el infinito, en este caso temperatura ambiente.

Se define la siguiente variable auxiliar para resolver la ecuación:

$$\theta(t) = (T(t) - T_{\infty}) \quad (2.7)$$

Reemplazando (2.7) en (2.6) se tiene que:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = -\frac{hA}{mc}\theta(t) \quad (2.8)$$

Y se llega a que:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\frac{hA}{mc}t} \quad (2.9)$$

Bajo lo cual se concluye que la temperatura sigue un comportamiento tipo decaimiento exponencial:

$$T(t) = (T_0 - T_{\infty})e^{-\frac{t}{\tau}} + T_{\infty} \quad (2.10)$$

Con:

$$\tau = \frac{mc}{hA} [s] \quad (2.11)$$

Por medio de esta investigación se pretende corroborar el comportamiento tipo decaimiento exponencial y encontrar los τ experimentales para cada caso, posterior esto se utilizarán los resultados de $\tau_{experimental}$ para ver la validez de los modelos paramétrico y de MVF.

³ Es común en transferencia de calor despreciar la pérdida por radiación cuando se está trabajando a bajas temperaturas <100°C. En cuanto a despreciar la pérdida por conducción, esto se hace debido a que la se considera que en la práctica la celda tiene pocas posibilidades de disipar calor por esta vía por la poca superficie de contacto. De todas maneras en el caso de que la conducción si fuese relevante en el problema, al ser linealmente dependiente de la diferencia de temperatura el comportamiento tipo decaimiento exponencial se mantendría, pero variaría la magnitud de τ .

2.6.2 Modelo de MVF

El modelo de Método de Volúmenes Finitos es generado utilizando el programa Ansys para simular el comportamiento térmico de distintas baterías. Utilizando diferentes condiciones iniciales y de borde se logra predecir el comportamiento térmico de cada batería. Puesto que este tipo de herramientas es difícil de utilizar y siempre tiene un grado de error, es necesaria la generación de un arreglo experimental para verificar la veracidad de los resultados. Asimismo la generación del arreglo experimental puede evidenciar errores en las condiciones utilizadas. En base a trabajos anteriores se sabe a priori que el comportamiento de las celdas en estas simulaciones es de tipo decaimiento exponencial.

2.6.3 Modelo paramétrico

Finalmente el modelo paramétrico [9] es una condensación de los dos modelos anteriores.

Por medio de un Ansys se realizaron una gran cantidad de simulaciones de MVF. Estas simulaciones se realizaron variando la separación vertical y horizontal entre celdas y la velocidad del aire de entrada a la batería.

Una vez obtenidos los resultados, se procedió a buscar una ecuación gobernante para τ por medio del software, para buscar relaciones matemáticas intrínsecas, Eureka, llegando a la siguiente relación:

$$\tau(Re_D, S_d, S_t) = \alpha + \frac{\beta}{Re_D} + \frac{\gamma}{S_t \cdot S_d} \quad (2.12)$$

Con:

- $Re_D = \frac{\rho v D_{celda}}{\mu}$, el número de Reynolds relativo al diámetro de la celda y velocidad de entrada, ver Figura 2-5.
- $S_d = \frac{d_h}{D_{celda}}$, la distancia horizontal relativa entre celdas, ver Figura 2-5.
- $S_t = \frac{d_v}{D_{celda}}$, la distancia vertical relativa entre celdas, ver Figura 2-5.

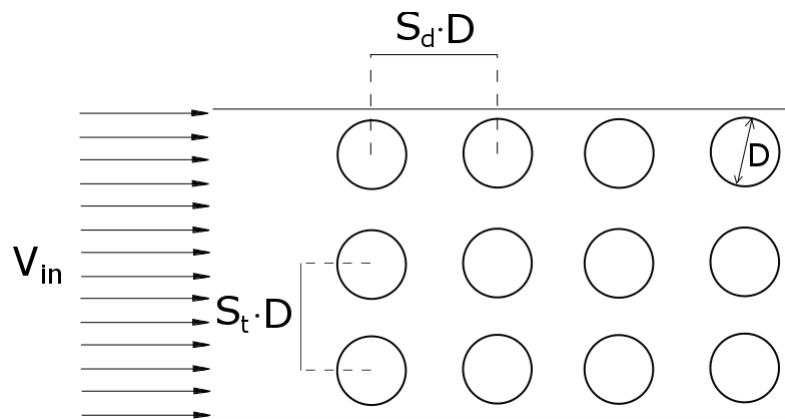


Figura 2-5: Diagrama Explicativo de Variables Utilizadas

La metodología utilizada para la generación de este modelo se presenta en el anexo Metodología Modelo Paramétrico.

Puesto que ambas disposiciones utilizadas en este trabajo se diseñan con las mismas distancias verticales y horizontales entre celdas, los parámetros $S_d = \frac{d_h}{D_{celda}}$ y $S_t = \frac{d_v}{D_{celda}}$ se mantienen invariantes en los experimentos. Dado lo anterior sólo resulta posible evaluar si la dependencia con el Reynolds se mantiene o no. Luego, puesto que S_d y S_t permanecen invariantes, la ecuación (2.12) se puede simplificar a:

$$\tau(Re_D, S_d, S_t) = \delta + \frac{\beta}{Re_D} \quad (2.13)$$

Con $\delta = \alpha + \frac{\gamma}{S_t \cdot S_d}$, constante.

Finalmente puesto que la viscosidad y densidad del fluido permanecen prácticamente invariantes, ya que la temperatura ambiente varía menos de 2[°C] entre distintos experimentos, la ecuación se puede simplificar aún más. Finalmente la ecuación a validar es la siguiente:

$$\tau(v) = \delta + \frac{\varepsilon}{v} \quad (2.14)$$

Con $\varepsilon = \frac{\mu\beta}{\rho D_{celda}}$.

Cabe mencionar que este modelo fue desarrollado para un rango de velocidades de entre 40 y 90 [km/h], equivalentes a 11 y 25 [m/s] respectivamente, pensando en baterías destinadas a electromovilidad refrigeradas por ventilación con el aire circundante. Sin embargo para este trabajo las velocidades utilizadas debiesen ser menor, puesto que la ventilación será por medio de ventiladores, los cuales alcanzan no alcanzan tan altas velocidades de flujo. A pesar de lo anterior, se verificará la validez de éste modelo para las velocidades utilizadas en este trabajo.

2.7 Repetición experimental

Puesto que la memoria contempla la generación de un experimento resulta necesario tener algún grado de certeza de que al repetir un experimento se obtendrán resultados similares. Puesto para distintas repeticiones de experimentos se pueden tener distintas condiciones como por ejemplo temperatura ambiente, y puesto que el enfoque principal está puesto en los resultados en cuanto a τ , los experimentos serán comparados utilizando una variable de temperatura adimensional, la cual se explica a continuación:

De la ecuación (2.7) y (2.9) se tiene que:

$$T(t) - T_\infty = (T_0 - T_\infty)e^{-\frac{hA}{mc}t} \quad (2.15)$$

Con:

- $T_0 = T(t = 0)$
- $\frac{mc}{hA} = \tau$

Dado esto se define la temperatura adimensional:

$$\theta = \frac{T(t) - T_\infty}{(T_0 - T_\infty)} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.16)$$

Como se puede ver en la ecuación (2.16), la temperatura adimensional θ sólo se rige por el tiempo y el parámetro τ , luego no incorpora el ruido proveniente de la temperatura ambiente o incluso la temperatura inicial.

2.8 Requerimientos generales

Como ya se ha explicado, para la validación experimental de los modelos resulta necesaria la construcción e implementación de un equipo capaz de medir el comportamiento de un arreglo de celdas bajo diversas condiciones de operación, este equipo se conoce como arreglo experimental.

La idea es disponer de un arreglo de celdas ordenado de la manera requerida para la validación del modelo, a modo de ejemplo ver Figura 2-6.

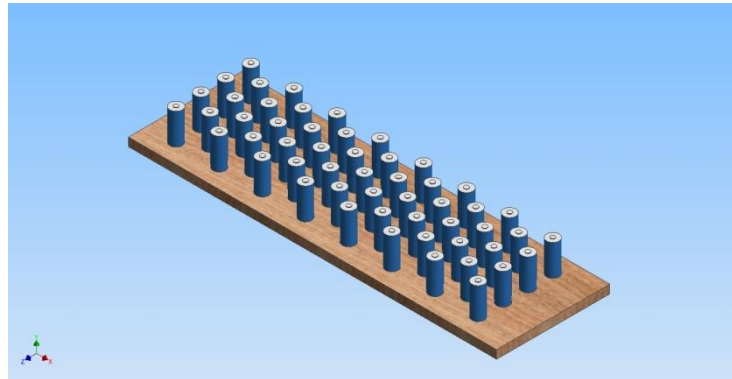


Figura 2-6: Arreglo de Celdas, Fuente: [10]

Este arreglo experimental será expuesto a una ventilación forzada luego de haber descargado las celdas, lo cual generará una disipación de calor. Por medio del módulo se pretende estudiar el comportamiento de las celdas, específicamente cómo cae la temperatura de estas en función del caudal de aire y de la disposición de las celdas. Este equipo debe ser capaz de medir la temperatura de las celdas, la velocidad o caudal del aire y la diferencia de presión.

En un extremo del arreglo experimental se dispondrá de un ventilador, el cual será el encargado de generar la ventilación forzada. Este ventilador debe ser capaz de alcanzar velocidades similares a las que alcanzaría el ventilador de una batería común. Anterior al ventilador se dispondrá de un flujómetro que medirá la velocidad del fluido a la entrada.

En las celdas que se considere necesario se instalarán sensores de temperatura para obtener un seguimiento de su comportamiento.

Finalmente por medio de una tarjeta de adquisición de datos se recolectará la información proveniente de los sensores, para su posterior análisis. A continuación se presenta un diagrama explicativo del módulo, ver Figura 2-7.

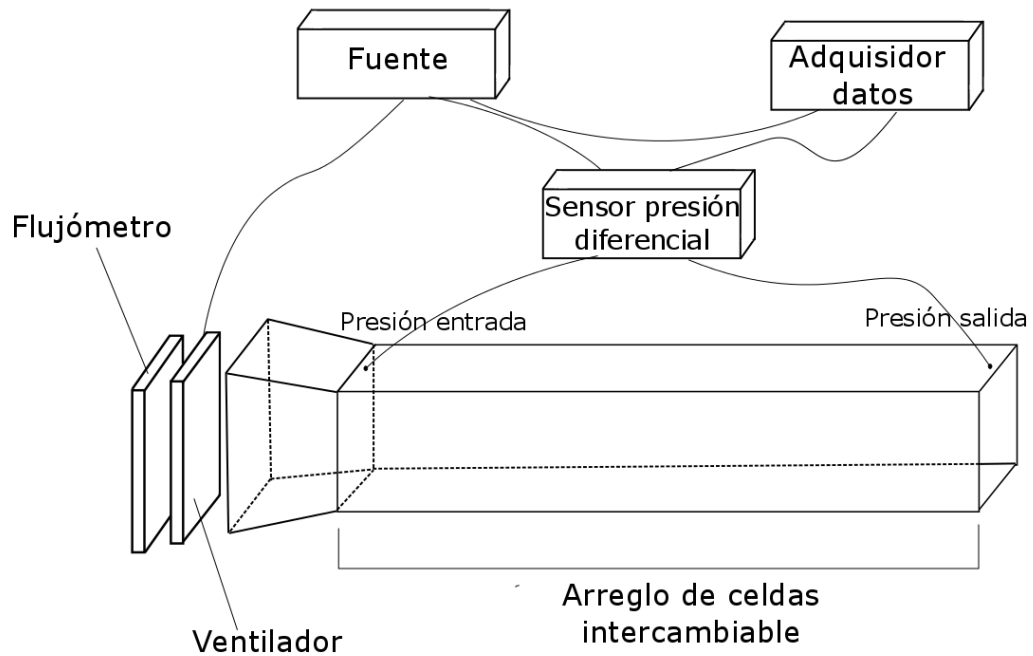


Figura 2-7: Diagrama explicativo módulo experimental

Además de lo expresando anteriormente se tiene como requerimientos adicionales del equipo, que sea fácil de usar, lo más flexible posible y que de espacio a la posibilidad de implementar nuevas disposiciones a futuro, de manera sencilla. Asimismo se requiere que la instalación de celdas sea sin la utilización de soldaduras, para lo cual se propone la utilización de un soporte, en la Figura 2-8 se puede ver un diseño preliminar de soporte de celda generado en un trabajo anterior del Centro de Energía [1], en este soporte la celda se acopla a presión entre las tres patas de la estructura y posteriormente se introduce el cableado para generar contacto eléctrico.

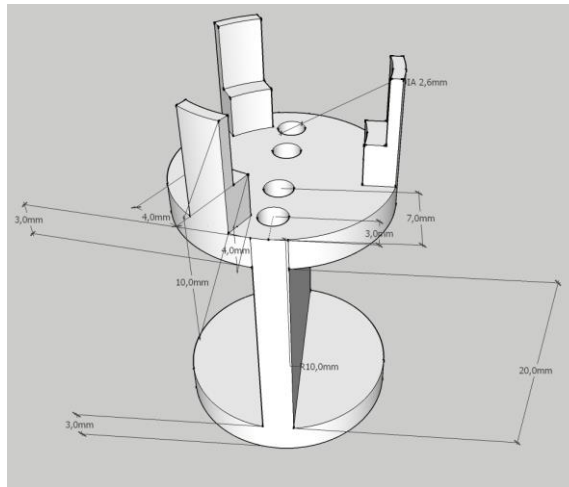


Figura 2-8: Diseño preliminar de soporte de celda, Fuente: [1]

2.9 Especificaciones de la celda Ión-Litio ICR 26650

Como se explicita en el punto 1.4, las celdas utilizadas son del tipo Ión-Litio ICR 26650, ver Figura 2-9, estas celdas son dispuestas por el Centro de Energía de la Universidad de Chile.

Como características principales se tiene que tienen una capacidad de 4000 [mAh] un voltaje de circuito abierto de 3,7 [Volts] y un voltaje al final de la descarga de 2,75 [Volts]. Su temperatura de operación es de 20 a 60 [°C] en descarga. Esta celda es de tipo cilíndrica, con un diámetro de 26 [mm] y una altura de 65,5 [mm]. La hoja de especificaciones completa se encuentra en el anexo Celda Ión-Litio ICR 26650.



Figura 2-9: Celda Ión-Litio ICR 26650

Capítulo 3

3 Metodología

3.1 Metodología general

A continuación se presenta en la Figura 3-1 la metodología general del trabajo a realizar. El trabajo se puede desglosar en 3 etapas, generación de arreglo experimental, experimentación y análisis, cada una de estas etapas con sus respectivas actividades. A continuación se ahondará en cada una:

- **Etapa I: Generación de arreglo experimental.** La primera actividad dentro de esta etapa es el diseño, en esta se levantan los requerimientos del equipo, *e.g.* flexibilidad, número de celdas, posibilidad de acoplar nuevas disposiciones, etc., asimismo en esta etapa se procede a dar las dimensiones del equipo y especificaciones en cuanto a materiales e instrumentos a utilizar. Posterior al diseño, sigue la construcción, donde se procede a construir en su totalidad el equipo e incorporar los instrumentos y equipos que utilizará el arreglo experimental. Finalmente se procede a la puesta en marcha, donde se calibra el equipo con lo cual queda listo para ser utilizado. Con lo anterior termina la etapa de generación del arreglo experimental.
- **Etapa II: Experimentación.** Una vez generado el arreglo se pasa a la etapa de experimentación. Esta etapa se puede desglosar en dos actividades. La primera actividad es la repetición experimental, en esta se procede a repetir al menos una vez, un experimento por disposición, para verificar si los experimentos repetidos dan o no resultados similares⁴. De corroborarse lo anterior se procede a la experimentación propiamente tal, donde se utilizan 2 disposiciones distintas y se generarán 3 experimentos por disposición.
- **Etapa III: Análisis.** Ya obtenidos los datos experimentales requeridos se procede a generar un análisis de los datos obtenidos, con lo cual posteriormente se generan las conclusiones en cuanto a la validez de los modelos y además se procede a generar las recomendaciones en cuanto a posibles trabajos propuestos a futuro y puntos del experimento que podrían ser mejorados. En cuanto a la actividad de análisis de datos, esta será explicada a profundidad más adelante.

⁴La repetición de experimental se utiliza para ver si hay indicios que apunten a una repetitividad experimental. Sin embargo el concepto de repetitividad requiere de la generación de una gran cantidad de repeticiones, y un análisis bastante profundo, el cual está normado. Dado el alto costo del proceso de verificación de repetitividad, éste se deja propuesto para futuras investigaciones.

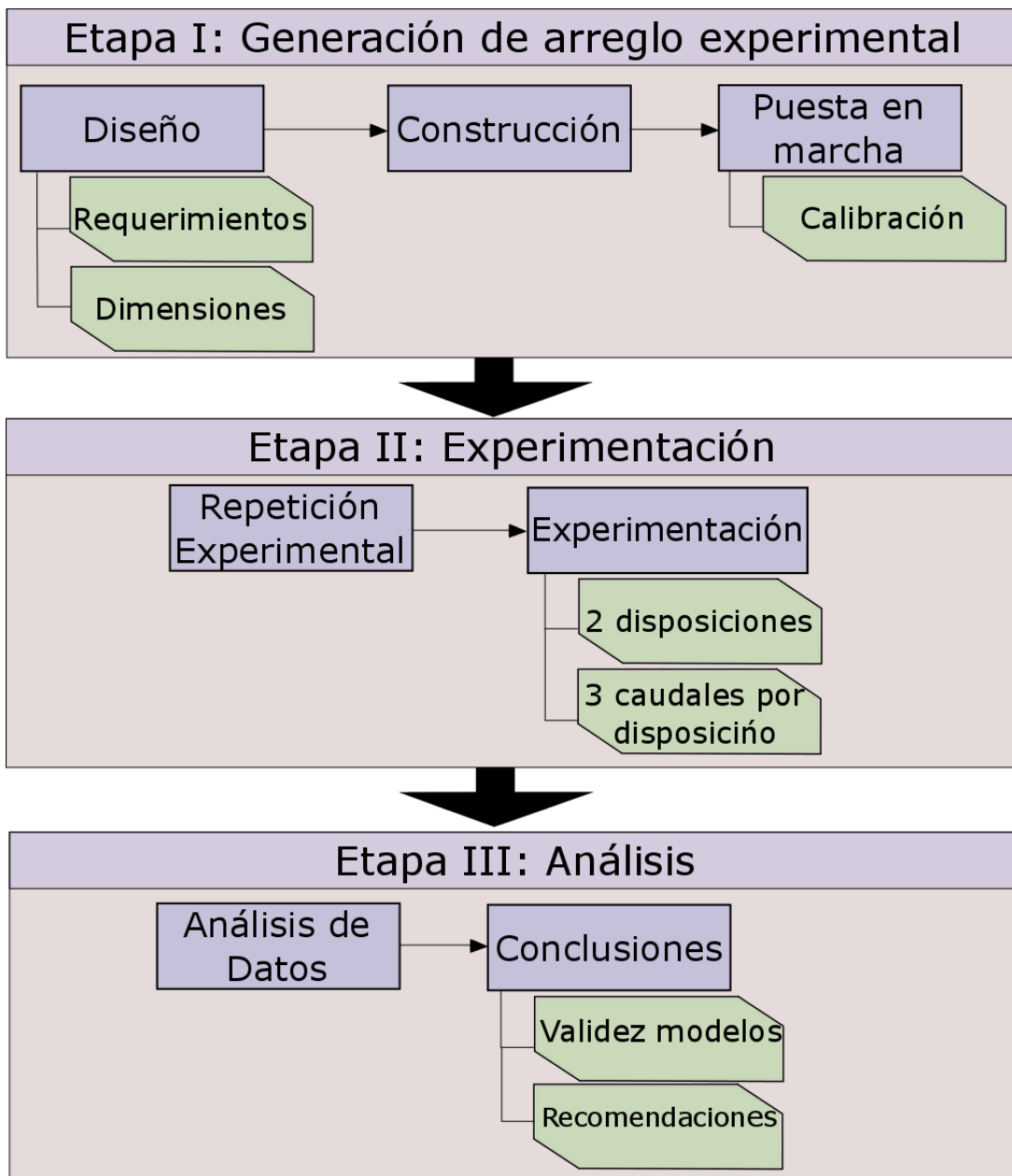


Figura 3-1: Metodología general trabajo

3.1.1 Análisis de datos

La etapa de análisis de datos toma como datos de entrada los generados durante la experimentación, a estos a su vez se les da validez, por medio del contraste de las repeticiones experimentales.

Con los datos de experimentación se genera un ajuste de curva utilizando el modelo de decaimiento exponencial para ver qué tan válido es ese modelo. Posterior a esto se procede a utilizar el parámetro τ como herramienta de contraste. τ es utilizado para generar una comparación entre las disposiciones y velocidades utilizadas en cada experimento y a su vez, por otro lado, es utilizado para validar o rechazar los modelos, paramétrico y simulaciones de MVF, ver Figura 3-2.

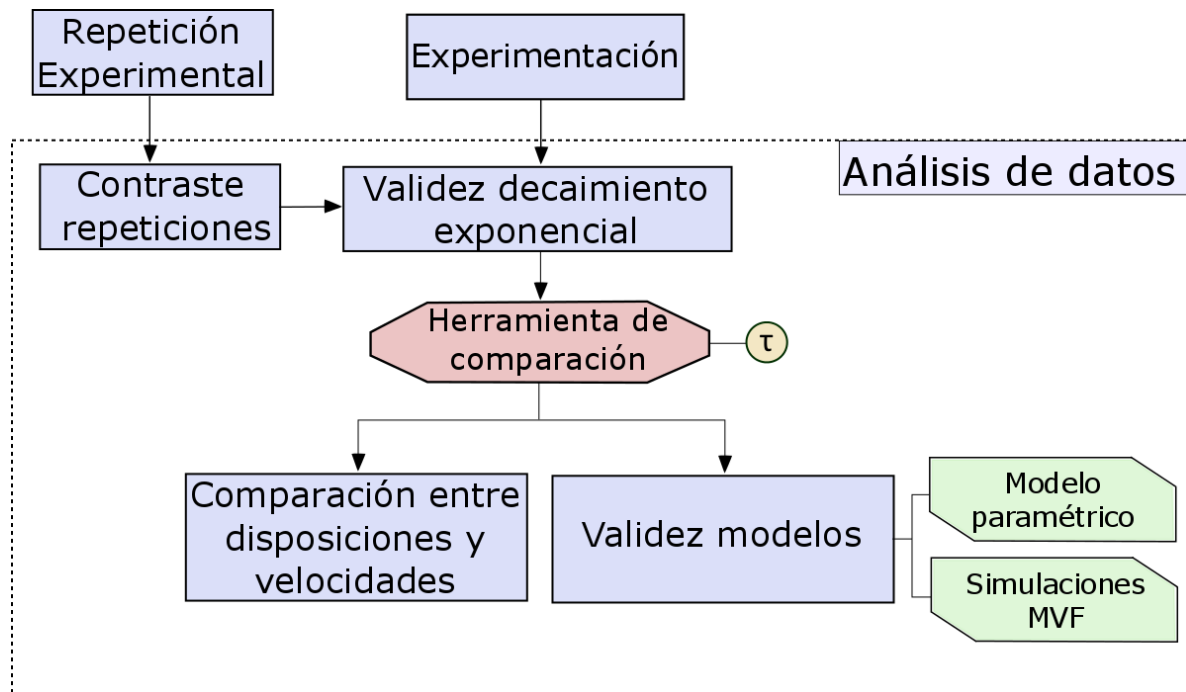


Figura 3-2: Análisis de datos

3.2 Diseño y construcción de prototipo experimental

3.2.1 Prototipo de arreglo experimental

Puesto que el diseño es una etapa compleja, cuyo éxito o fracaso tendría repercusiones a lo largo de todo el proyecto, se decide ser especialmente cauteloso en esta etapa. Como medida para aminorar los posibles errores de diseño y generar una visión más cercana del proyecto se decide generar en una primera instancia un prototipo conceptual del arreglo experimental. Este prototipo si bien no cuenta ni con las medidas del arreglo experimental, ni con el mismo número de celdas, sirve para generar un primer acercamiento al fenómeno, tomar medidas preliminares y entregar información para respaldar correctamente las decisiones que se tomarán sobre el diseño.

3.2.1.1 Montaje del prototipo

En la Figura 3-3 se muestra el montaje del prototipo experimental. Se procedió a la construcción de un arreglo de 5 celdas el cual es enfriado por ventilación forzada mediante un ventilador de 12 Volts.

Las celdas fueron dispuestas equidistantes entre ellas, con una distancia de 39 mm entre centro de cada una. Se dispuso de 2 configuraciones para este prototipo, la primera con 3 celdas en la primera fila y 2 en la segunda fila, en configuración escalonada como se muestra en la Figura 3-3 y la segunda con 2 celdas en la primera y segunda fila y una en la tercera, en configuración alineada, ver Figura 3-4.

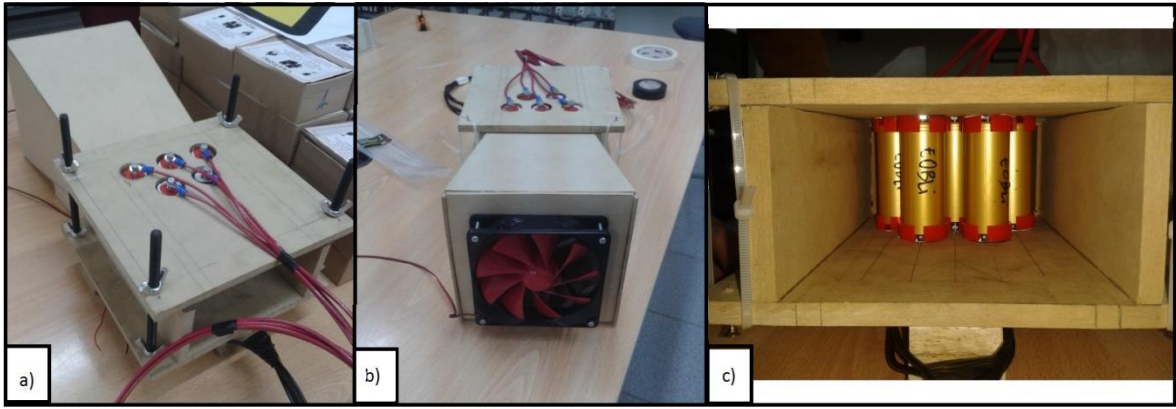


Figura 3-3: Prototipo arreglo experimental disp. escalonada, a) Vista principal, b) Vista frontal, c) Vista posterior

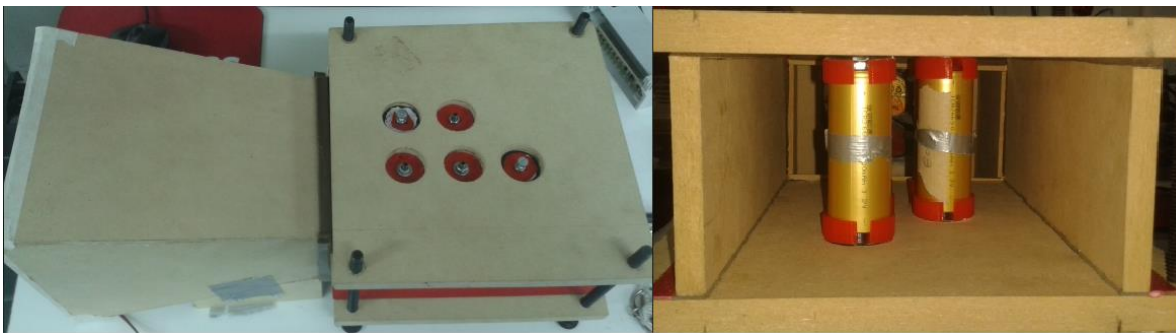


Figura 3-4: Prototipo arreglo experimental disposición alineada

Dado que se trata de un prototipo, este solo cuenta con la capacidad de medir la temperatura de las celdas, no el caudal, ni la caída de presión. El prototipo es capaz de capturar la temperatura de cada una de las celdas y la temperatura ambiente por medio de termocuplas, ver Figura 3-5.

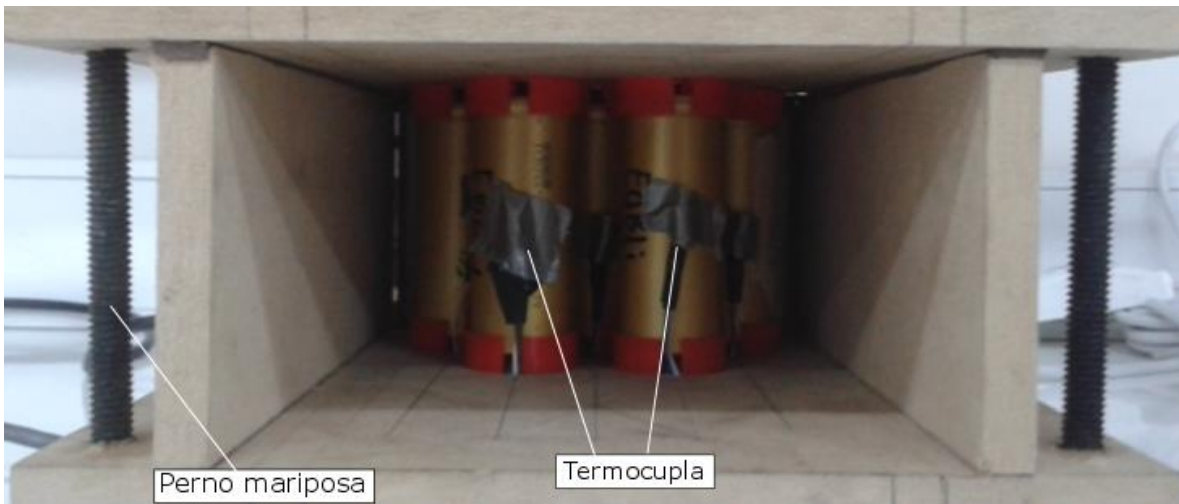


Figura 3-5: Celdas con termocuplas acopladas

3.2.1.1.1 Enumeración de Celdas

Como convención a lo largo de este informe las celdas serán enumeradas de izquierda a derecha y posteriormente de arriba hacia abajo, según lo que muestra la Figura 3-6. Asimismo el eje X se definirá colineal al eje axial del ventilador y su origen se encontrará en el punto rojo mostrado en la Figura 3-6.

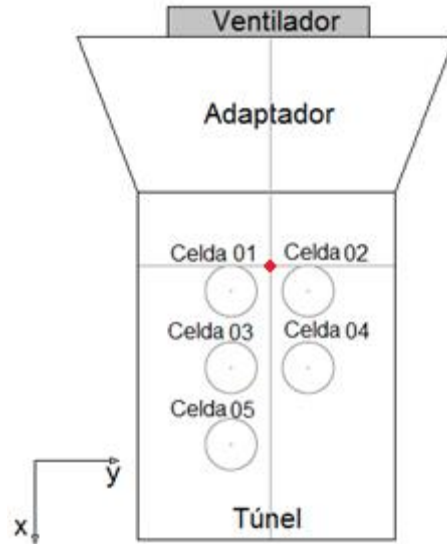


Figura 3-6: Esquema de enumeración de celdas

3.2.1.2 Procedimiento experimental del prototipo

El experimento consiste descargar las 5 celdas a una tasa 3 Amper hora por celda, durante una hora. Esta descarga se logra por medio de la utilización del equipo de carga programable BK Precision 8500, ver Figura 3-7. Luego de que las celdas se descarguen totalmente, se procede inmediatamente a prender el ventilador del prototipo para poder capturar el fenómeno de enfriamiento de estas, ver Figura 3-8



Figura 3-7: Carga programable BK Precision 8500

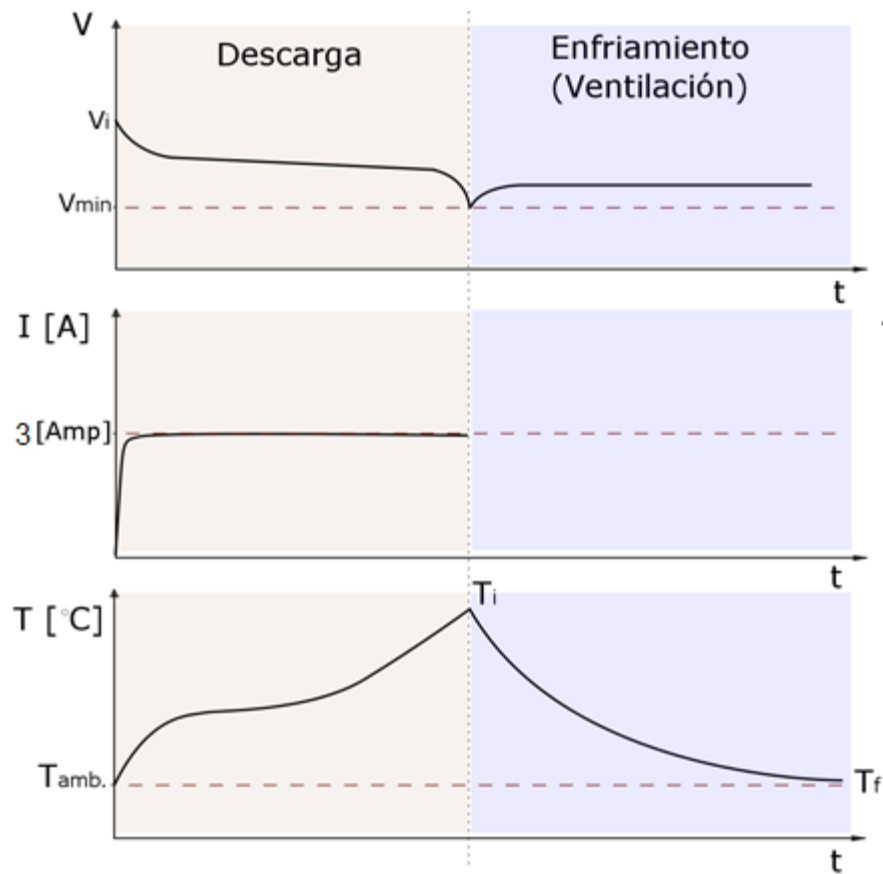


Figura 3-8: Bosquejo de proceso de descarga y ventilación

Los datos de las termocuplas son obtenidos por medio de una tarjeta de adquisición, ver Figura 3-9. Estos son guardados en el computador por medio de LabView.



Figura 3-9: Tarjeta de adquisición de datos

Finalmente los datos son graficados, y por medio del software Mathematica se calculan los τ de enfriamiento de cada celda, utilizando un ajuste de curva a la función de decaimiento exponencial. Posterior a esto se procede a contrastar con los resultados preliminares en MVF.

3.2.1.3 Resultados del prototipo

Como resultado del experimento se obtuvieron las siguientes curvas de comportamiento de las celdas, ver Figura 3-10, Tabla 3-1, Figura 3-11 y Tabla 3-2.

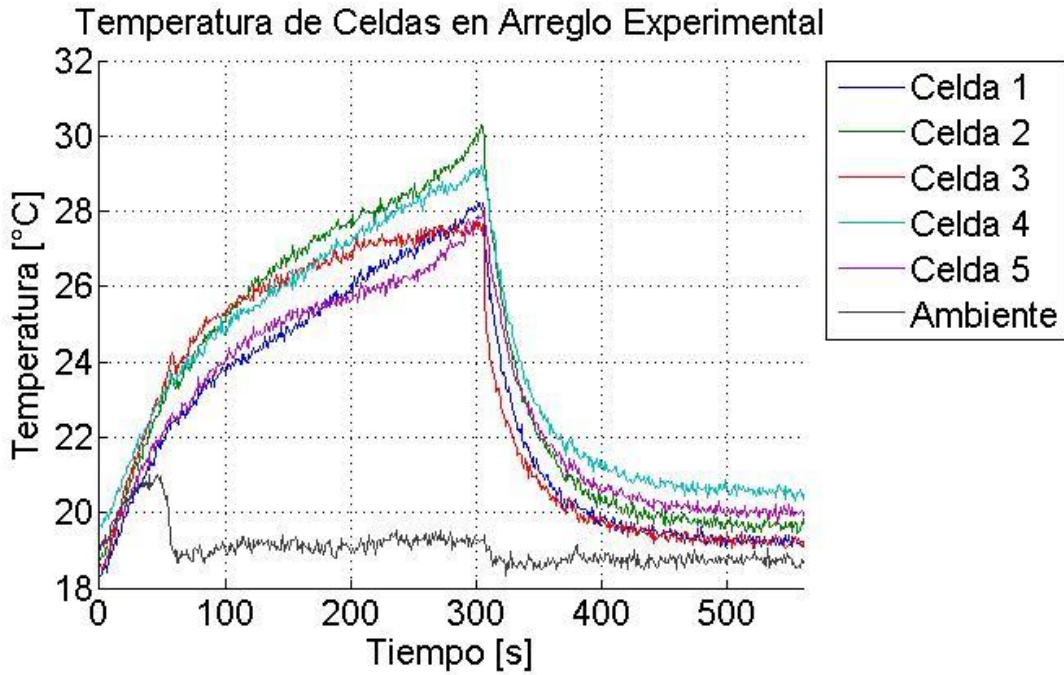


Figura 3-10: Gráfico temperatura celdas, disposición escalonada

Tabla 3-1: τ obtenidos, disposición escalonada

	Celda 01	Celda 02	Celda 03	Celda 04	Celda 05
Tau	454,8	481,8	540,3	576,5	574,9

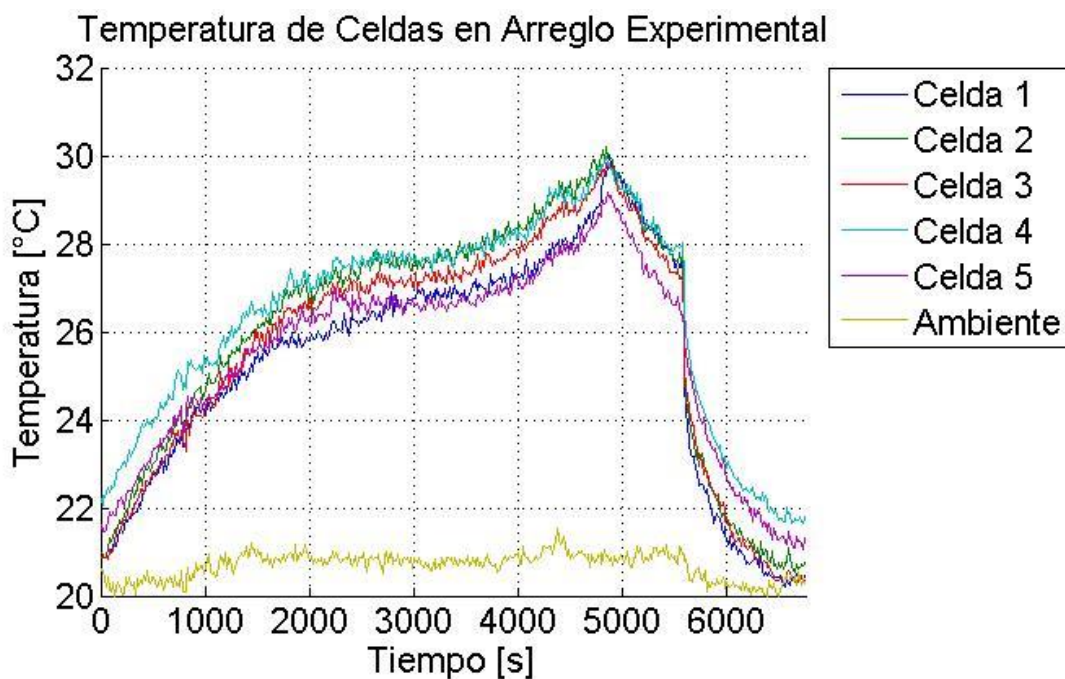


Figura 3-11: Gráfico temperatura celdas, disposición alineada⁵

Tabla 3-2: τ obtenidos, disposición alineada

	Celda 01	Celda 02	Celda 03	Celda 04	Celda 05
Tau	856,1	866,2	729,9	762,2	828,4

3.2.1.4 Contraste con simulaciones en MVF

De manera paralela a estos experimentos, se realizaron simulaciones en Ansys para predecir el comportamiento de estas disposiciones y tener un contraste preliminar del comportamiento teórico *versus* el real.

A continuación se exponen los resultados de su trabajo:

⁵ Durante este experimento existe un desfase entre la desconexión de las celdas en el segundo 4.700 y el encendido del ventilador, segundo 5.600.

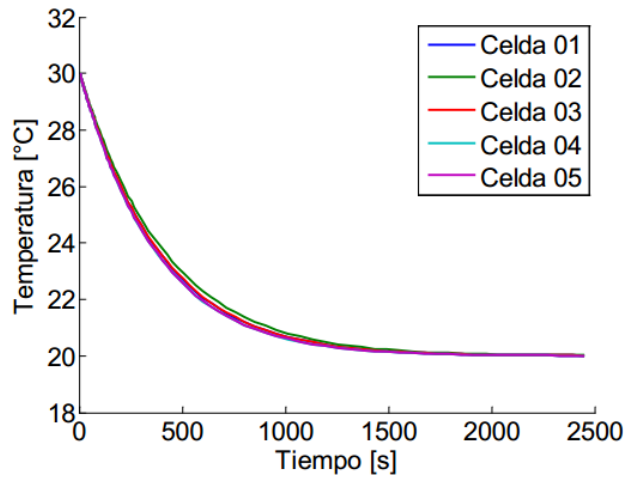


Figura 3-12: Gráfico decaimiento temperatura celdas, disposición escalonada

Tabla 3-3: τ experimentales, simulados y error, disposición escalonada

	Celda 01	Celda 02	Celda 03	Celda 04	Celda 05
Experimental	454,8	481,8	540,3	576,5	574,9
Simulación	381,5	408,3	383,5	367,1	367,8
Error relativo	16,1%	15,3%	29,0%	36,3%	36,0%

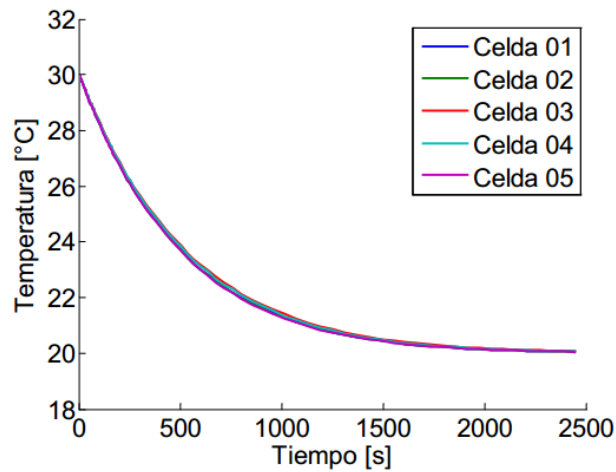


Figura 3-13: Gráfico decaimiento temperatura celdas, disposición alineada

Tabla 3-4: τ experimentales, simulados y error, disposición alineada

	Celda 01	Celda 02	Celda 03	Celda 04	Celda 05
Experimental	810,2	846,4	859,8	897,8	887,3
Simulación	493,5	492,0	513,2	507,5	489,5
Error relativo	39,1%	41,9%	40,3%	43,5%	44,8%

Cabe destacar que dado que la velocidad del ventilador no pudo ser medida por medio de la instrumentación adecuada para la medición (se utilizó un anemómetro de rotor de menor tamaño que el ventilador), existe mayor espacio a error en la velocidad utilizada en las simulaciones del prototipo.

3.2.1.5 Análisis y Conclusiones de Resultados en Prototipo

Como primera observación se puede apreciar un comportamiento entre celdas muy similar en los resultados teóricos, por el contrario de los experimentales. Es notorio que el enfriamiento sucede más rápido en los experimentos *i.e.* menor τ experimental, lo que podría causado por utilizar una velocidad mayor a la real en las simulaciones.

Se hace notoria la gran diferencia en el valor de τ entre las disposiciones, lo anterior se atribuye a que el caso alineado presentó un error en la descarga que causó un gran desfase entre la desconexión de las celdas y el encendido del ventilador, haciendo que el ajuste no sea bueno.

Asimismo se ve claramente una mejor ventilación en las celdas dispuestas en el lado izquierdo del prototipo lo cual podría ser explicado por una desalineación del flujo proveniente del ventilador hacia la izquierda.

Además como resultados relevantes de los prototipos se puede observar que el ventilador tiene un punto ciego, el cual no logra disociarse a lo largo del trayecto hasta la salida. Este fenómeno se produce tanto en ausencia de celdas, como en su presencia. Se presume que el vórtice que genera el ventilador dificulta aún más la disociación de esta zona de caudal nulo. Junto con esto el prototipo logró probar los soportes de las celdas, facilitando el proceso de diseño y mejoramiento de estos.

3.3 Diseño del arreglo experimental

3.3.1 Necesidades que debe satisfacer el experimento

Como se explicó en el punto 2.8, como requerimientos del arreglo experimental se tiene que éste debe cumplir con lo siguiente:

- Una fuente de ventilación que a lo menos cumpla con un caudal similar al de una batería común.
- Capacidad para 30 celdas máximo.
- Dos disposiciones, una en configuración escalonada y otra alineada.
- Que se pueda medir el caudal, temperatura y caída de presión en el arreglo.
- Versátil y de fácil uso.

3.3.2 Justificación del diseño de la estructura

Dado lo presentado en el punto anterior, se procede a generar un diseño del arreglo experimental por medio del software SolidWorks 2013, el cual se presenta a continuación en la Figura 3-14.

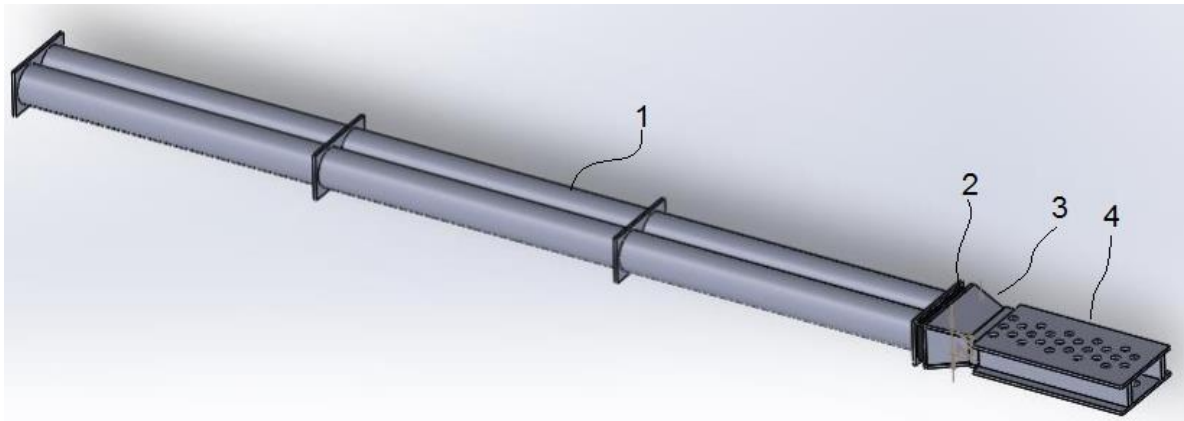


Figura 3-14: Diseño tentativo de arreglo experimental

Este diseño se puede desglosar en 4 componentes:

- 1) Tubos de perfilamientos: Son el encargado de que el aire logre alcanzar un perfil desarrollado. Se utilizó este componente pensando en la necesidad a futuro de medir el perfil de velocidad del fluido antes de que este entre. Por no contar con los equipos necesarios para esto, lo anterior no se pudo realizar en este trabajo.
- 2) Ventiladores: Como se especifica dentro de los requerimientos se dispondrá de dos ventiladores axiales 4412 FNH producidos por la empresa Ebmpapst, estos ventiladores son del mismo tipo que los utilizados por en la batería del auto solar Eolian 4. Las especificaciones de este componente se encuentran en el anexo Ventilador 4412 FNH.
- 3) Adaptador: Como es de esperarse, las medidas de los ventiladores no coinciden con las medidas del túnel de medición. Dado esto se genera esta estructura capaz de conducir el aire hasta el túnel de medición.
- 4) Túnel de medición: El túnel de medición es la zona donde se dispondrán las celdas y sus respectivas termocuplas.

Para ver los planos de las piezas generadas ver anexo Planos Arreglo Experimental.

3.3.2.1 Justificación

Cabe mencionar que no se encontraron estándares específicos que permitieran guía directa para el diseño general del arreglo experimental, sin embargo se tuvieron en cuenta ciertos aspectos generales que influyen en el correcto funcionamiento del equipo. Estos son presentados a continuación.

3.3.2.1.1 Tubos de Perfilamiento

Para la generación del tubo de perfilamiento se decidió utilizar una tubería de PVC de 3 metros. Se eligió este material puesto que tiene una rugosidad absoluta de aproximadamente 0,0015 [mm] que es menor o igual a la rugosidad de los materiales utilizados en ductos de ventilación. Como referencia se tiene que las tuberías de acero galvanizado, utilizado en comúnmente en ductos de ventilación, tienen una rugosidad absoluta de 0,15 [mm], 100 veces mayor a la del PVC. Lo anterior resulta relevante para conseguir una mínima pérdida de carga en las tuberías de perfilamiento.

La elección del largo de estas tuberías es una consecuencia directa de recomendaciones de la norma para medición de caudal en conductos cerrados por medio del método área de velocidades utilizando tubos de pitot IS 14973 : 2001, la cual es idéntica a la norma para medición de caudal en conductos cerrados por medio del método área de velocidades utilizando tubos de pitot ISO 3966. Esta norma establece que para realizar una medición del perfil de velocidad del fluido, es necesario primero que el flujo se encuentre suficientemente desarrollado, y sea estable en la zona de medición. Para lo anterior se especifica que la zona de medición debe tener como mínimo 20 diámetros de distancia con cualquier perturbación anterior a la zona a medir y al menos 5 diámetros de distancia con cualquier perturbación posterior a la zona a medir. Teniendo las tuberías un diámetro interno de 105 [mm], se llega a que la tubería debiese tener como mínimo un largo de 2.625 [mm]. Puesto que las tuberías tienen un largo de fábrica de 3 metros aproximadamente, se decidió mantener su medida original, ya que esto sólo repercutirá de manera positiva en las mediciones de perfil de velocidad que se decidan realizar a futuro.

3.3.2.1.2 Ventilador

Se decide elegir el ventilador 4412 FNH, debido a dos razones principalmente. La primera es que ofrece una relación caudal-tamaño bastante buena, logrando alcanzar velocidades bastante altas para su pequeño tamaño. La segunda es que su utilización en este tipo de aplicaciones ya fue demostrada en otras baterías.

Cabe recalcar que la elección de un ventilador para la realización de las pruebas experimentales se justifica simplemente por el hecho de que este cumpla con las características de un ventilador común que se utilizaría en este tipo de aplicaciones, lo anterior puesto que se desea que el experimento sea lo más cercano posible a la realidad.

3.3.2.1.3 Material del adaptador y túnel de medición

Para la creación de estos componentes se decide utilizar acrílico. Dentro de las propiedades que hacen al acrílico una solución idónea para este tipo de experimentos, se tiene que:

- Tiene un bajo coeficiente de conductividad térmica, $k \cong 0,18 \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$, similar a la conductividad térmica de la madera, $k \cong 0,17 \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$.
- Es un material fácil de trabajar.
- A simple vista no presenta una rugosidad importante a considerar.
- Es transparente, lo cual hace fácil la inspección del arreglo, además de darle una buena estética.⁶

3.3.2.1.4 Adaptador

El adaptador es el resultado de la necesidad de converger el flujo de los ventiladores a un área distinta de la original. Se decidió generar un adaptador que ocupe poco espacio, que distorsione poco el flujo y que sea una solución que en la práctica podría utilizarse, es decir que no pierda el objetivo de ser lo más cercano a la realidad posible.

⁶ Ésta última característica resultó ser una decisión crucial a la hora de experimentar puesto que la fácil inspección disminuyó considerablemente el costo en tiempo asociado a la búsqueda de fallas.

A modo de mantener la versatilidad del equipo se decidió acoplar el arreglo experimental al adaptador por medio de chapas cangrejo, como se muestra en la Figura 3-15.

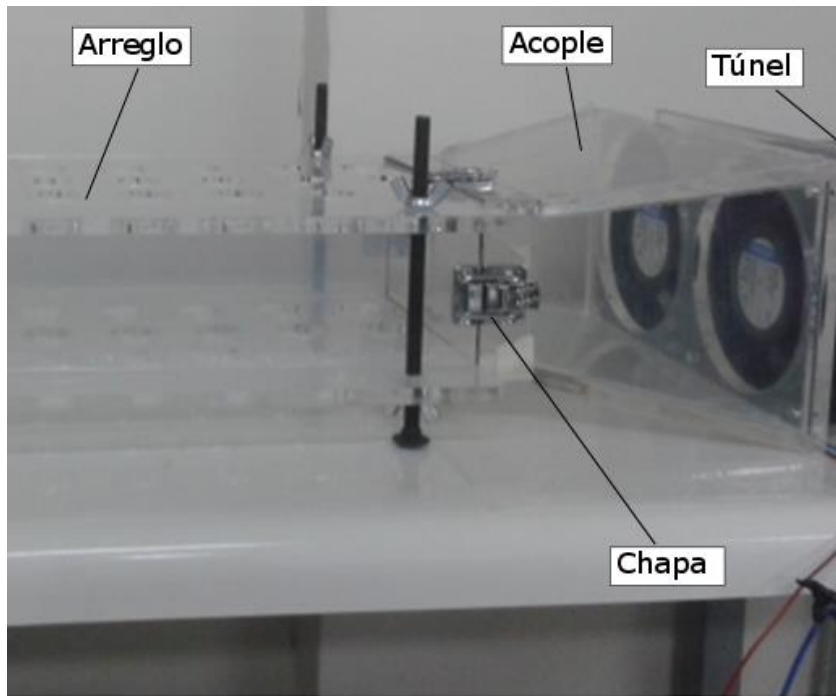


Figura 3-15: Adaptador acoplado a Túnel

3.3.3 Soportes

Como se explicó al principio del capítulo 3.3, una de las características requeridas del diseño es que éste sea de fácil uso y versátil. Dado esto, la instalación de las celdas debe ser por medio de un mecanismo simple y que asegure un buen contacto eléctrico.

Se decidió que el soporte debía tener las siguientes características:

- i. Debe ser poco invasivo en cuanto a la cantidad de superficie que cubre.
- ii. Tener poca influencia en la forma en que el aire ataque a la celda.
- iii. Asegurar el contacto eléctrico.
- iv. De fácil implementación.
- v. Bajo costo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se generó un diseño de soporte capaz de sostener una celda, asegurar el contacto eléctrico y el paso de cables provenientes de las termocuplas, ver Figura 3-16.

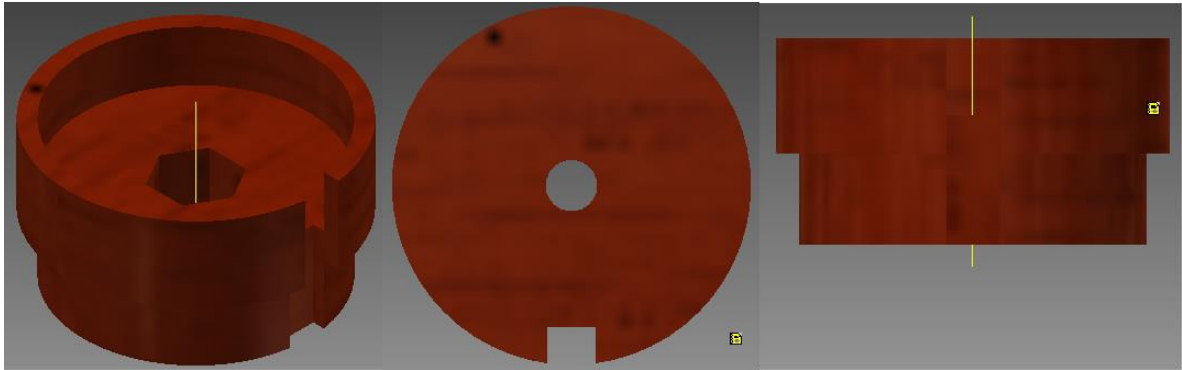


Figura 3-16: Diseño de Soporte Celdas

Este soporte se acopla a un extremo de la celda, manteniéndose sujeto a esta por encaje a presión. Para asegurar un buen contacto eléctrico se dispone de un resorte en su agujero central, el cual empuja al prisionero y este último hace el contacto con la celda, ver Figura 3-17. Luego, por medio de un terminal tipo ojo, la electricidad fluye al respectivo cable de la celda, este cable es conectado por medio de un terminal banana a la resistencia del arreglo experimental, ver Figura 3-18.

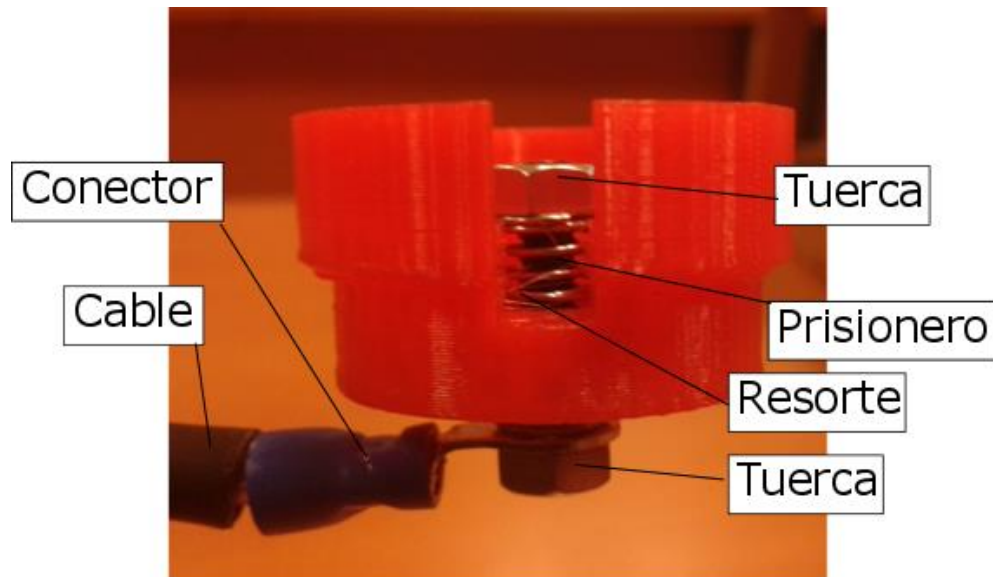


Figura 3-17: Soporte celda armado

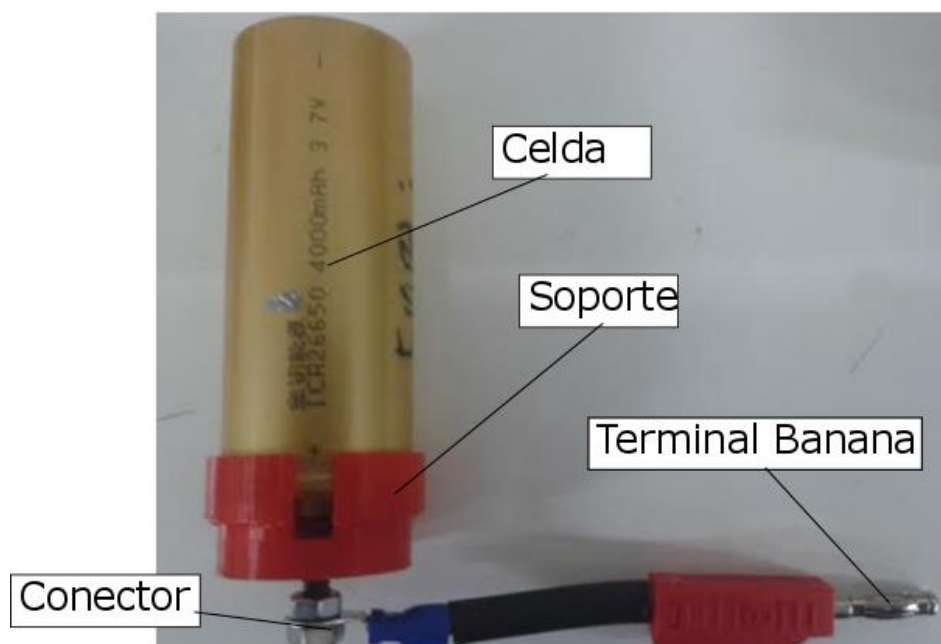


Figura 3-18: Ensamble soporte, conceptual

Puesto que se requieren un total de 60 soportes, generar los soportes vía impresora 3D no resulta factible, ya que las impresoras 3D tienen una tasa de error elevada, se requeriría gran cantidad de material para generarlos y el FabLab no dispone de estos equipos para la producción repetitiva de piezas. Se decide generar los soportes por medio de un proceso de colado utilizando resina MEPUR para la generación de las piezas, este proceso permite la generación rápida y a bajo costo de los soportes. El proceso de fabricación del soporte se encuentra en el anexo Construcción y Calibración.

A continuación en la Figura 3-19 se puede ver el soporte generado y su implementación en el experimento.



Figura 3-19: Soporte definitivo e implementación en experimento

3.3.3.1 Justificación del diseño y los materiales:

3.3.3.1.1 Diseño

Teniendo en cuenta las cuatro características con las que debía cumplir el diseño, la justificación del soporte es la siguiente. La sujeción por encaje a presión es una consecuencia de la necesidad de una fácil implementación. Se trató de hacer poco profunda la zona de encaje, de manera de no cubrir mucha superficie de la celda. Por otro lado las paredes responsables de asegurar el encaje se diseñaron de forma circular, de manera de tener la mínima influencia en la forma en que el aire ataca la celda. Para finalizar, la problemática del contacto eléctrico se resuelve con la implementación de un prisionero con una tuerca en su extremo, la cual es empujada por un resorte en dirección a la celda, asegurando el contacto eléctrico. Cabe mencionar que soportes similares han sido utilizados en investigaciones en bancos de baterías, ver Figura 3-20.

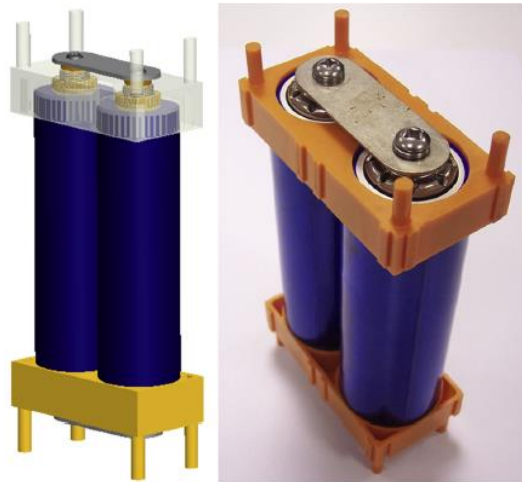


Figura 3-20: Soporte de investigaciones similares, Fuente: [4]

3.3.3.1.2 Materiales

El material escogido para la generación de los moldes fue resina MEPUR. Si bien en un principio se probó utilizando resina de poliéster, esta demostró ser demasiado rígida y frágil. Como consecuencia de lo anterior, al forzar la entrada de la celda en el soporte, la deflexión era mucha provocando que los soportes de resina de poliéster se rompieran, en este punto la resina de MEPUR demostró ser superior, al no fallar. Por otro lado el MEPUR tiene la ventaja de ser menos irritante al contacto humano y de necesitar una proporción 1 a 1 en volumen, luego no se requirió de la utilización de pesas para generar una correcta proporción en la mezcla.

3.3.4 Diseño del cableado

Puesto que una de las principales características de este arreglo experimental debe ser la flexibilidad, se decidió que el cableado eléctrico debe ser versátil, en otras palabras debe ser fácil para el usuario cambiar de configuración eléctrica por ejemplo conectar celdas en serie o en paralelo. Dado esto, se decide que la conexión entre celdas debe ser por medio de conectores banana. A continuación en la Figura 3-21 se pueden ver los cables conectados a sus respectivos

soportes⁷. La conexión cable-soporte se realizó mediante la utilización de un terminal ojo, como se ve en la Figura 7-7.

Cabe mencionar que se utilizó un cable flexible AWG 12 con una aislación para hasta 1000V. El cable es capaz de transmitir 20 Amperes, equivalente a la descarga de 5 celdas en paralelo.



Figura 3-21: Soportes y sus cables respectivos

3.4 Construcción y armado del experimento

Si bien la etapa de construcción y armado del experimento resulta relevante, dada la larga extensión de este punto, no se incluyó en el cuerpo del informe. De todos modos toda la información respecto al proceso de construcción y armado del experimento se encuentra en el anexo Construcción y Calibración.

3.5 Montaje experimental

3.5.1 Instrumentación utilizada

Para la realización de la toma de datos en el arreglo experimental fue requerida una gran cantidad de instrumentación y equipamiento, los cuales se presentan a continuación.

3.5.1.1 *Conversor DC/AC*

Este equipamiento utiliza operando como un inversor. El equipo recibe el voltaje y corriente DC proveniente de la baterías y lo transforma a AC, dándole las características de voltaje y corriente necesarias para que, dadas las resistencias que se disponen en el laboratorio, la descarga se produzca a 4 Amperes.

⁷ Existen 30 cables con conectores banana de color rojo y 30 de color negro. Los colores son asociados al polo positivo y negativo de la celda respectivamente.

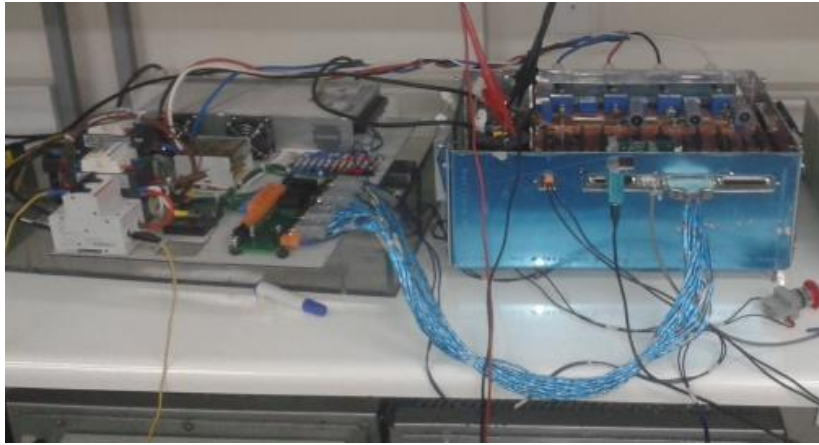


Figura 3-22: Conversor DC/AC

3.5.1.2 Resistencias

Se dispuso de 3 resistencias capaces de disipar la energía proveniente de las celdas.



Figura 3-23: Resistencia

3.5.1.3 iChargers

Un iCharger es un equipo capaz de cargar y monitorear celdas. Se cuenta con 4 iCharger, cada uno capaz de cargar 8 celdas de manera paralela. Estos equipos también fueron utilizados para monitorear el voltaje de las celdas durante la descarga y cargar las celdas.



Figura 3-24: iCharger

3.5.1.4 Fuentes de Poder

El laboratorio de acumuladores dispone de 2 fuentes de poder capaces de entregar hasta 31 Volts para la realización de los experimentos. Estas son utilizadas para alimentar los iChargers y el convertor AC/DC.

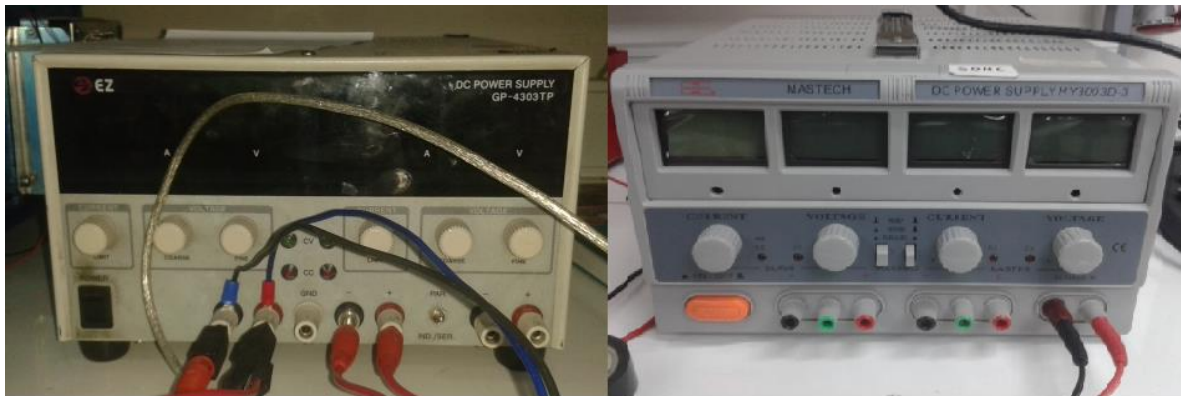


Figura 3-25: Fuentes de Poder

3.5.1.5 Multímetro

Se contó con un multímetro para la medición de voltaje dentro del circuito de la batería.

3.5.1.6 Equipo de medición de temperatura

Se contó con un equipo desarrollado previamente para la medición de temperatura. Este consta de una tarjeta de adquisición de datos análogo/digital de 512 niveles con un rango de entrada de ± 10 V, una fuente de poder pequeña de 13V y 8 termocuplas conectadas a la tarjeta de adquisición.

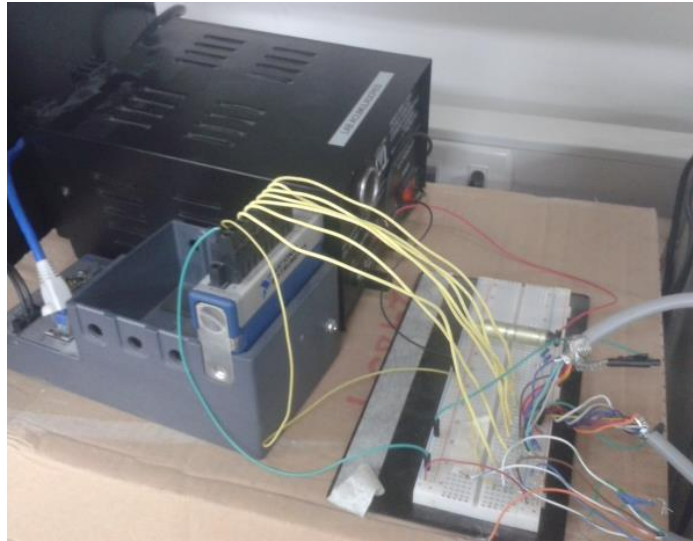


Figura 3-26: Equipo de Medición de Temperatura

3.5.1.6.1 Termocuplas

El equipo de medición de temperatura utiliza 8 termocuplas, de las cuales 6 son para registrar la temperatura de las celdas, y corresponden al modelo LM35DZ, cuya precisión es de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y las últimas dos son utilizadas para registrar la temperatura ambiente y corresponden al modelo LM35DZ, cuya precisión es de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ⁸. En el anexo Datasheet Termocupla se encuentran sus especificaciones.



Figura 3-27: Termocupla

3.5.1.7 Sensor de Presión Phidgets +2kPa y su tarjeta de adquisición de datos

Se utilizó este equipo para medir la caída de presión en el arreglo de celdas. El equipo cuenta con un medidor de presión diferencial, del cual salen dos mangueras, utilizadas para medir la diferencia de presión en dos puntos. El medidor de presión está conectado a una tarjeta de adquisición, la cual se conecta a un computador via USB.

⁸ Se utilizaron estas termocuplas por que se contaba con sólo 6 termocuplas de alta precisión.

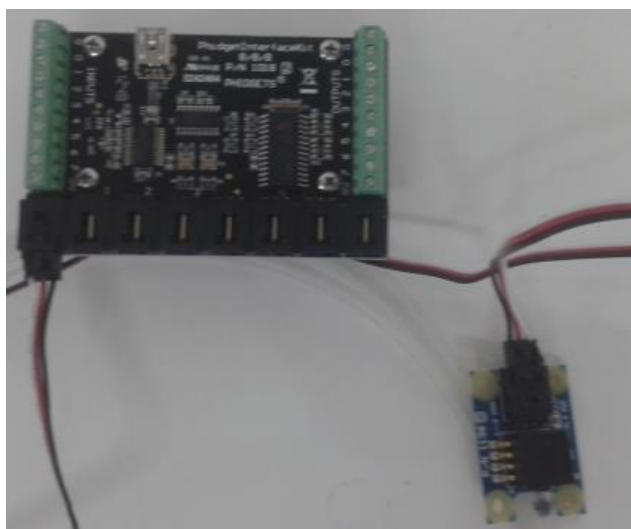


Figura 3-28: Sensor de Presión y Tarjeta de Adquisición

3.5.1.8 Anemómetro de hilo caliente

Este instrumento tiene la posibilidad de medir temperatura además de la velocidad del viento. Finalmente fue utilizado solamente para medir la temperatura ambiente en el experimento para así poder calibrar las termocuplas.⁹



Figura 3-29: Termo Anemómetro ALNOR 8525

3.5.1.9 Flujo metro AirFlow LCA 6000

Este instrumento fue utilizado para medir la velocidad promedio del viento en la entrada de los ventiladores y así despejar el caudal total. Su funcionamiento es el siguiente, el movimiento de aire generado por los ventiladores hace girar el rotor del flujo metro y por medio de un medidor de revoluciones logra calcular la velocidad promedio del aire.

⁹ Si bien en un principio se pensó en utilizar este instrumento para medir el caudal de aire al interior de los tubos de perfilamiento, éste instrumento resultó ser muy grande en relación al diámetro de la tubería. Lo anterior se tradujo en que su gran tamaño interfiriera el fluido aumentando su velocidad.



Figura 3-30: Flujometro AirFlow LCA 6000

3.5.2 Disposición experimental

Por medio de este experimento se pretende medir la temperatura, caída de presión y caudal en el arreglo de celdas. Para lograr lo anterior se tienen las dos siguientes disposiciones experimentales, ver Figura 3-31.

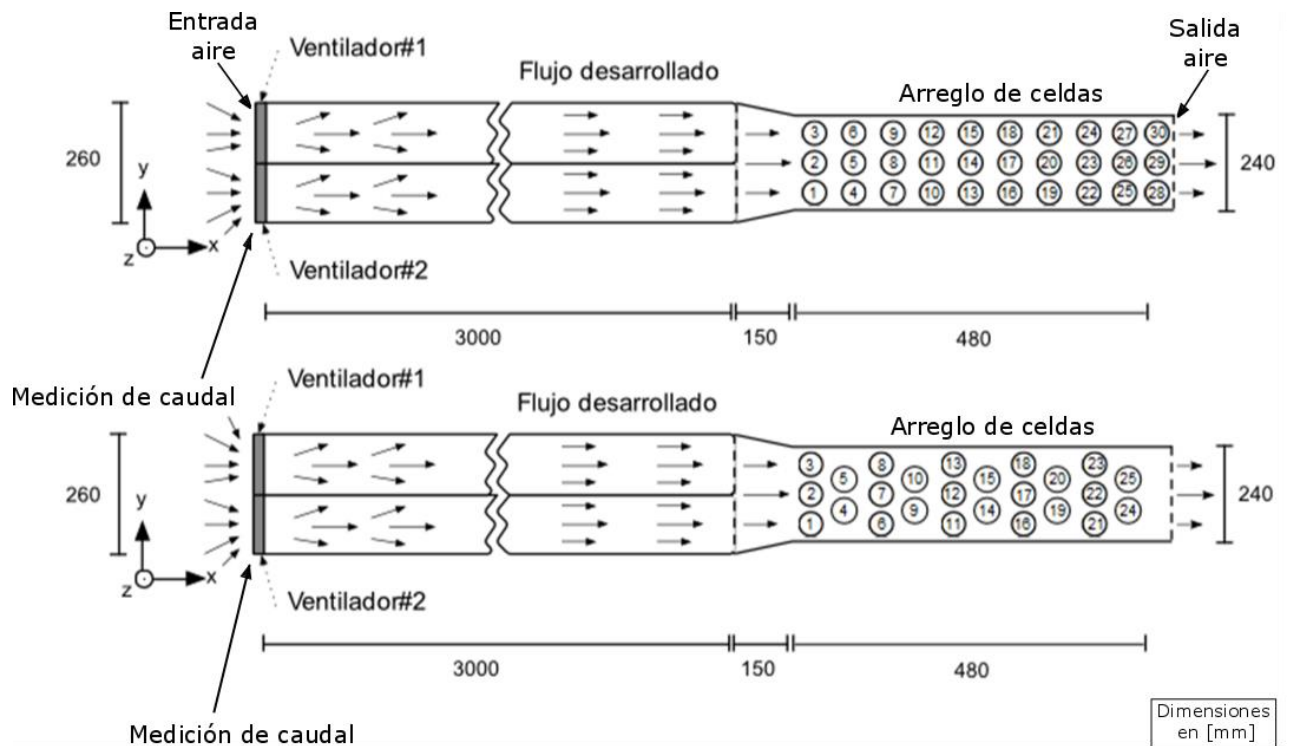


Figura 3-31: Bosquejo Disposiciones Experimentales, Fuente: Centro de Energía

Como se puede observar, lo único que cambia es el ordenamiento y número de celdas, que pasa de ser de tipo alineado con 30 celdas, bosquejo superior, a escalonado con sólo 25, bosquejo inferior. Las celdas fueron enumeradas según el orden explicado en la Figura 3-31. A grandes rasgos el experimento tiene el siguiente funcionamiento, el aire ingresa por medio de los ventiladores situados al comienzo de los tubos, luego alcanza un perfil desarrollado al interior de estos y finalmente, por medio del adaptador, el aire ingresa al túnel, donde procede a enfriar las celdas, la descripción experimental se abordará a profundidad en el 3.5.4. En la Figura 3-32 se puede observar una foto del arreglo experimental operativo.

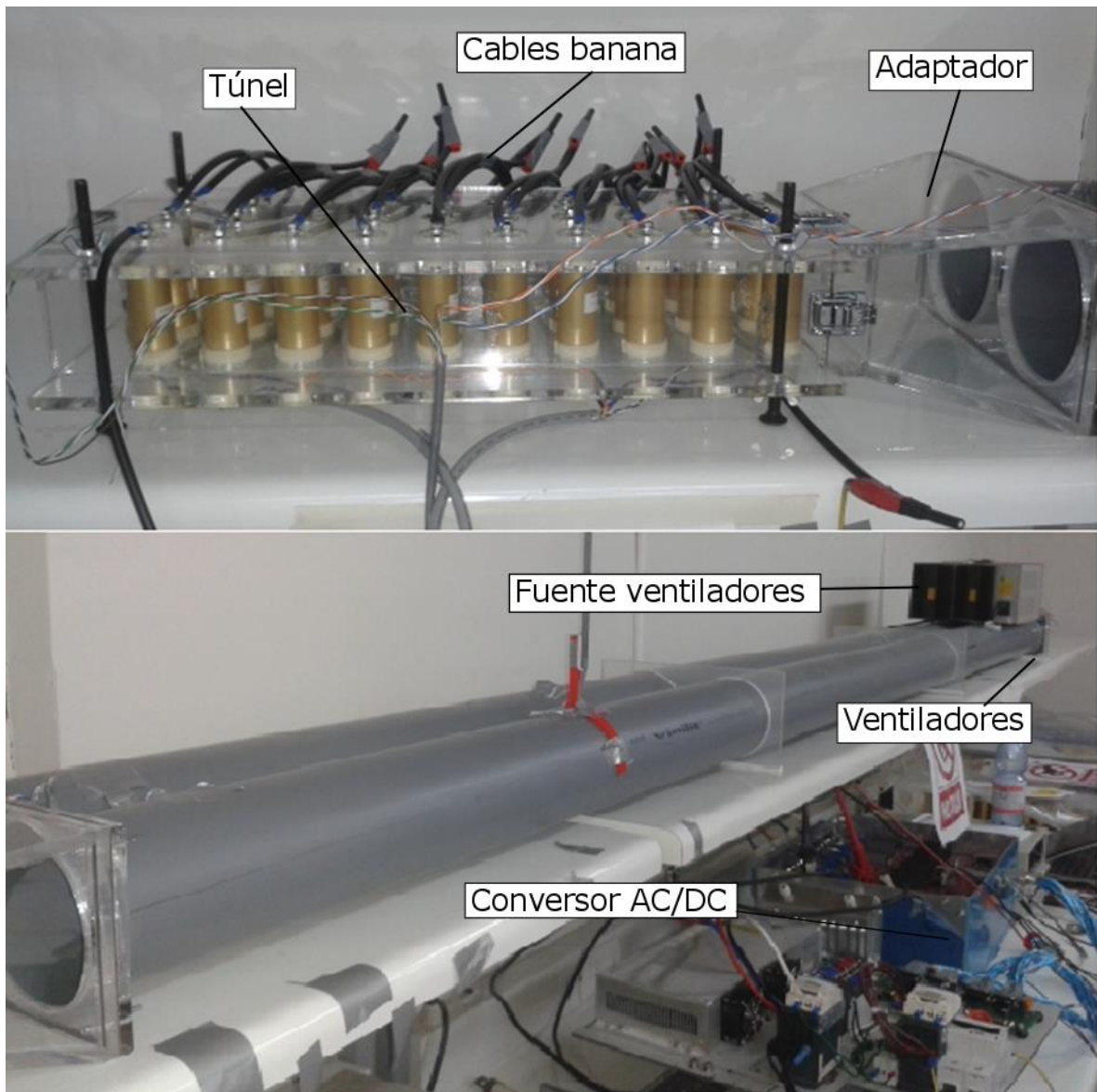


Figura 3-32: Arreglo Experimental

A continuación se ahondará en los detalles de la disposición.

3.5.2.1 Conexión de Celdas

Las celdas se conectaron en serie, y según su numeración, es decir la celda 1 se conectó en serie a la celda 2, luego la 2 a la 3, etc. La razón de este tipo de conexión yace principalmente en que es más fácil trabajar con altas tensiones, que con altos niveles de corriente, además el convertor DC/AC está diseñado para trabajar a altas tensiones. A pesar de lo anterior, es necesario destacar que la configuración en serie resulta ser más riesgosa para el usuario y facilita la generación de arcos eléctricos en las conexiones.

Posteriormente este arreglo de celdas, cuya conexión es en serie, fue conectado al convertor DC/AC, el cual por medio de un software regula la descarga, manteniéndola a 4 [Amperes].

3.5.2.2 Posicionamiento de termocuplas

Por capacidad de la tarjeta de adquisición resulta posible tan solo la utilización de un máximo de 8 termocuplas de manera simultánea. Dada esta limitante, se hace necesario el utilizar estas 8 termocuplas de la manera más eficiente posible.

Se hace evidente que para este tipo de experimentación, la temperatura de entrada o temperatura ambiente y la temperatura de salida, son dos variables que deben ser medidas, puesto que dan información sobre el cambio de estado termodinámico que sufre el aire al absorber la energía disipada por las celdas.

Dado lo anterior se implementa una termocupla para medir la temperatura ambiente, que en su defecto es la temperatura de entrada. En consecuencia de lo anterior se decide instalar afuera de los tubos, como se ve en la Figura 3-33.

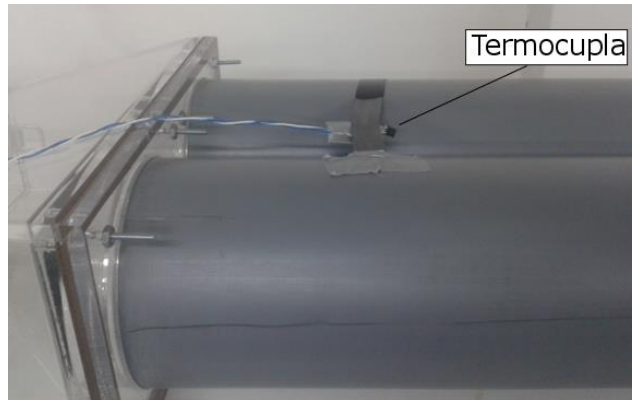


Figura 3-33: Posición Termocupla Temperatura Ambiente

Asimismo se instaló una termocupla a la salida del arreglo de celdas. Esta termocupla fue pegada a una platina de metal utilizando pasta térmica para aminorar la resistencia de contacto. Posteriormente su exterior fue aislado utilizando pegamento termofusible para aislar de interferencias térmicas a la termocupla. Se decide utilizar una platina, puesto que esta logra transferir la temperatura promedio de la zona a la termocupla, evitando que la termocupla mida puntualidades en el perfil de temperatura. La termocupla fue cubierta con aislante y cinta adhesiva para evitar influencias externas a la zona de medición. A continuación en la Figura 3-34 se puede ver la termocupla instalada en el experimento y en la Figura 3-35 se puede ver la localización de estas en el experimento.

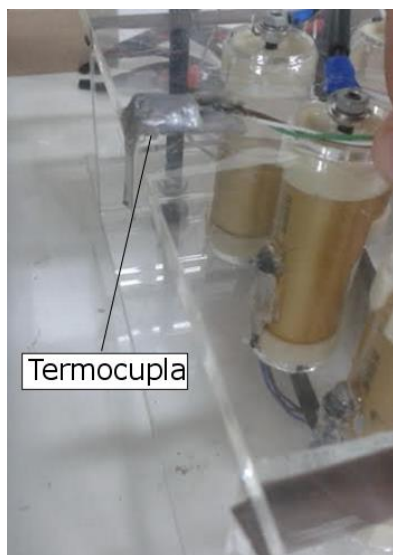


Figura 3-34: Termocupla Temperatura de Salida

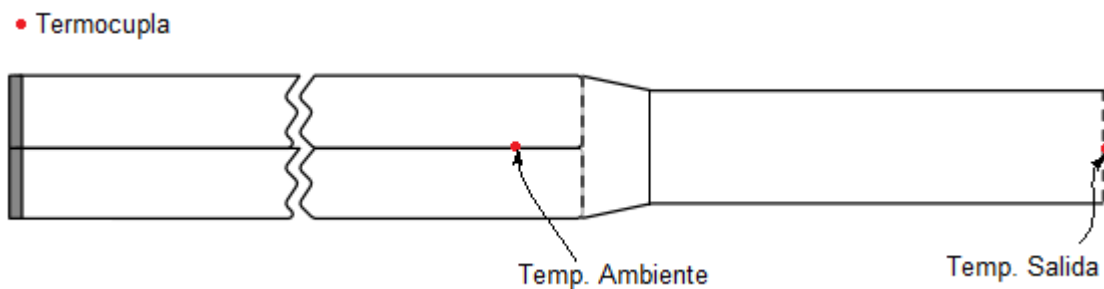


Figura 3-35: Posición Termocuplas Temperatura Ambiente y Salida

Puesto que se disponen de dos termocuplas para medidas de temperatura ambiente y de salida, se dispone de sólo 6 termocuplas para la medición de temperatura de las celdas, estas 6 termocuplas se posicionaron de acorde a lo mostrado en la Figura 3-36.¹⁰

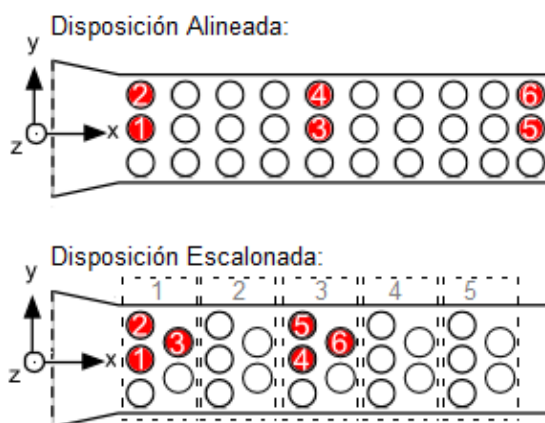


Figura 3-36: Posicionamiento de las Termocuplas según disposición utilizada, Fuente: Centro de Energía

¹⁰ La enumeración utilizada en la figura corresponde a la enumeración de las termocuplas, no de las celdas.

En ambas disposiciones se aprovechó la simetría existente respecto al eje x, es decir la celda N°1 debiese comportarse de la misma manera que la celda N°3, ver numeración celdas en Figura 3-31.

Dada esta simetría en el eje x, se procedió a medir las celdas N° 2, 3, 14, 15, 29, 30 para la disposición alineada, puesto que esta disposición de termocuplas permite interpolar la temperatura de las celdas intermedias.

Por otro lado, para la disposición escalonada se priorizó por tomar los datos de temperatura de 3 de las 5 celdas presentes en cada uno de las 5 subestructuras de 5 celdas, presentes en el arreglo. Así se podrá estudiar el comportamiento de las 3 celdas de las subestructuras, las cuales *a priori* debiesen tener un comportamiento diferente entre ellas. Puesto que lo anterior hace posible la medición en sólo 2 subestructuras de las 5 presentes, se decidió tomar datos en la primera y tercera subestructura, ya que se localizaban en las zonas que más temperatura alcanzaban durante la descarga y mayor temperatura implica una mejor relación error de medición- rango de medición. En resumen, las celdas medidas son las N° 2, 3, 5, 12, 13, 15.

En ambos casos las termocuplas fueron localizadas en la zona posterior de las celdas con respecto movimiento del aire como se muestra en la Figura 3-37.

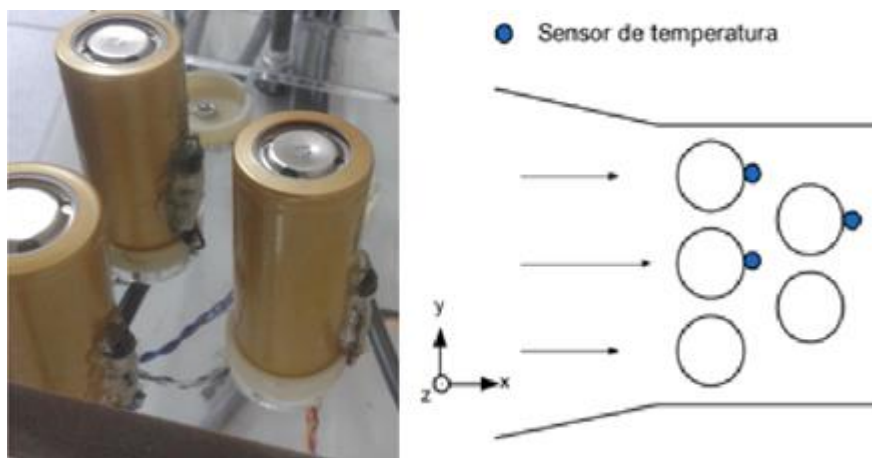


Figura 3-37: Orientación Termocuplas, Fuente: Centro de Energía

Justificación de la posición en la celda

Como se muestra en la Figura 3-37, se dispuso de una termocupla por celda estudiada, la cual se posicionó de manera tal de medir la temperatura en la zona meridiana de la celda.

Se justifica la utilización de una termocupla por celda medida, puesto que la temperatura de esta permanece relativamente homogénea a lo largo de la superficie durante la descarga [11], [12]. Lo anterior sucede producto de la alta conductividad térmica existente en dirección axial en la celda [12]. Esto a su vez fue corroborado por medio de la utilización de una cámara térmica y concuerda con la forma de medición utilizada en otras publicaciones [5], [6].

3.5.2.3 Puntos de medición de caída de presión

La caída de presión resulta relevante para determinar cuanta energía del ventilador se pierde por concepto de roce en el arreglo. Esto resulta relevante, puesto que la distancia entre celdas y el orden entre ellas van a influir tanto en la convección de estas, como en la caída de presión que

genere el arreglo. Puesto que la caída de presión se mide como la diferencia de presión en 2 zonas, es necesaria la medición en 2 puntos.

Ya que hacer perforaciones en el adaptador no resulta conveniente, puesto que esto significaría perforarlo, se decidió realizar la medición en la pared superior del túnel. A continuación en la Figura 3-38 se pueden apreciar los puntos de medición para cada disposición.¹¹

• Punto de Medición de Presión

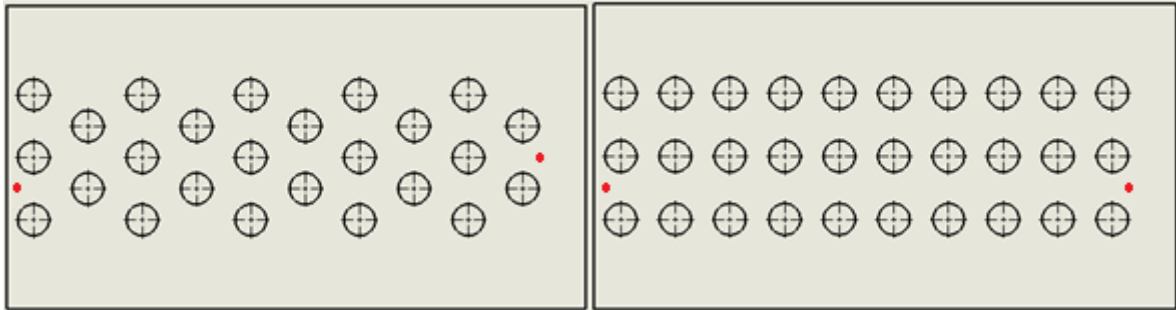


Figura 3-38: Puntos de Medición de Presión

3.5.3 Medición con flujometro

Puesto que para la experimentación se utilizarán ventiladores axiales, debe tenerse en consideración que el movimiento del aire impulsado por estos no es solamente axial, este tiene una leve componente en $\hat{\theta}$, ver Figura 3-39.

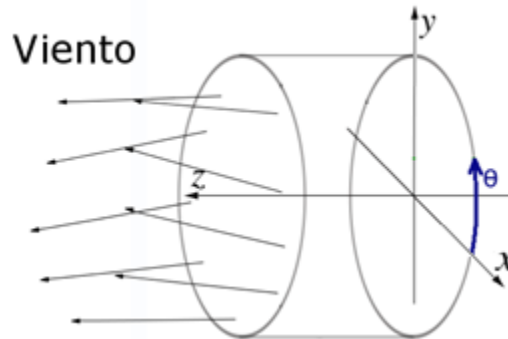


Figura 3-39: Dirección del aire en ventiladores axiales

El Flujometro AirFlow LCA 6000 utiliza un rotor para medir la velocidad axial (\hat{z}) del aire. Sin embargo este rotor puede a su vez ser influenciado por la componente $\hat{\theta}$ en la dirección del aire lo

¹¹ Estos puntos fueron tomados como los más idóneos dadas las posibilidades existentes, sin embargo para futuras disposiciones se recomienda generar una distancia mayor entre la primera celda y el comienzo de la pieza de acrílico, lo mismo se aplica para la última celda. Lo anterior se recomienda para poder darle más espacio al aire para que homogenice su presión estática a lo largo de la sección.

que induciría a un error, haciendo que el equipo entregue datos erróneos en la medición de la velocidad axial.¹² Dado lo anterior, resulta necesario eliminar este error sistemático.

Cabe mencionar que por conservación masa, la velocidad promedio axial debe mantenerse constante a lo largo de los tubos de perfilamiento, no así la componente $\hat{\theta}$, la cual puede ser disipada por concepto de roce.

En vista de lo anterior se realizan una serie de mediciones en que se contrasta la velocidad medida en la entrada de los tubos de perfilamiento con la velocidad medida a la salida de estos, ver Figura 3-41 y Figura 3-40. Por medio de estas mediciones se pretende encontrar una relación entre las velocidades medidas en cada zona, que permita eliminar el error sistemático.

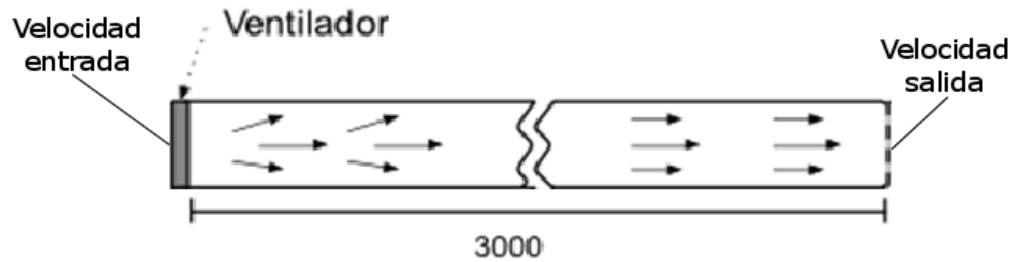


Figura 3-40: Puntos medidos



Figura 3-41: Medición de velocidad de entrada utilizando flujometro

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las mediciones, ver Figura 3-42 y Tabla 3-5.

¹² Cabe mencionar que la componente $\hat{\theta}$ del viento no tiene injerencias en el caudal.

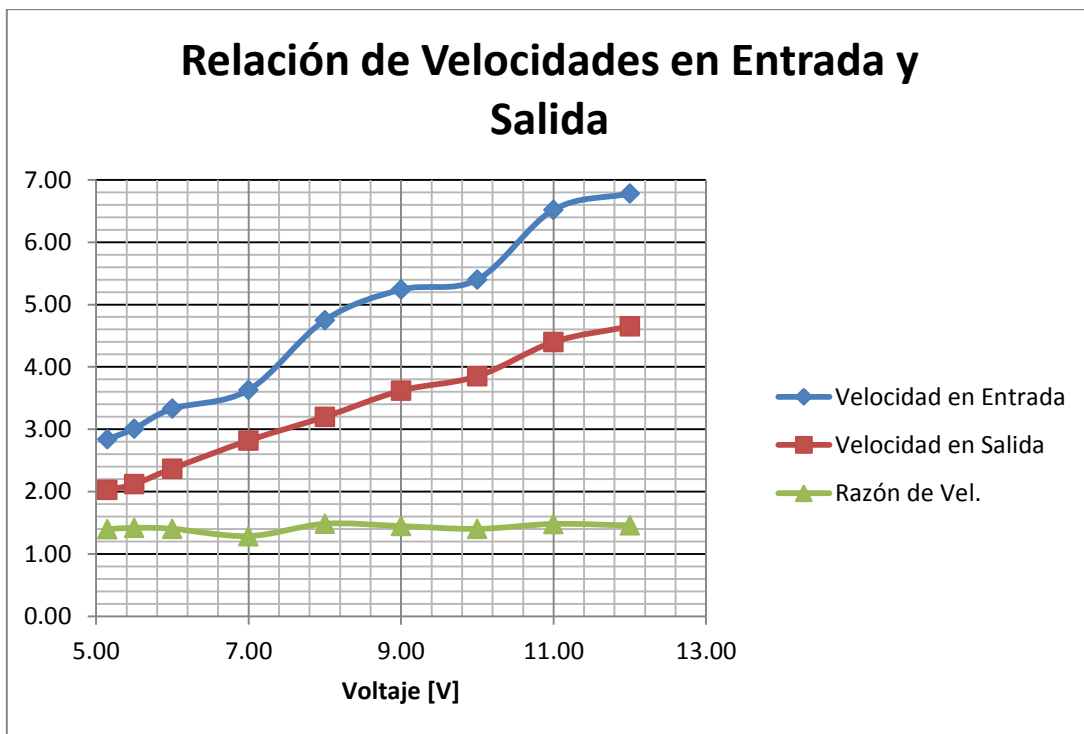


Figura 3-42: Relación de velocidades medidas

Tabla 3-5 "Relación de Velocidades Medidas"

Voltaje	Vel. Promedio Entrada	Vel. Promedio Salida	Razón $\left(\frac{v_{entrada}}{v_{salida}}\right)$
5,15	2,84	2,03	1,40
5,50	3,01	2,12	1,42
6,00	3,33	2,37	1,41
7,00	3,63	2,82	1,29
8,00	4,75	3,20	1,48
9,00	5,24	3,62	1,45
10,00	5,40	3,85	1,40
11,00	6,52	4,40	1,48
12,00	6,78	4,65	1,46
Promedio:			1,42

Los resultados obtenidos avalan que la velocidad medida en la entrada de los tubos no es la misma que la medida a la salida de estos. Dado lo anterior, las mediciones de velocidad tomadas durante los experimentos serán divididas por la razón promedio entre las velocidades 1,42 para así eliminar el error asociado a la velocidad en el eje teta.

3.5.4 Descripción experimental

Una vez armado el arreglo experimental se procede a seguir el *Check List* para realizar el experimento, ver anexo Check List Experimental . Finalmente para la obtención de los datos de temperatura se realiza el siguiente experimento:

1. Se dispone del arreglo de celdas cargadas en su totalidad (se asume que una celda cargada por encima de 4,10[V] está completamente cargada) y conectadas en serie.
2. Este arreglo se acopla al adaptador.
3. Una vez acoplado, se establece el voltaje de los ventiladores y se mide la velocidad del aire utilizando el flujómetro AirFlow LCA 6000, ver Figura 3-43. Posterior a esto se apagan los ventiladores.



Figura 3-43: Medición de Velocidad en Ventiladores

4. Se mide la temperatura ambiente utilizando el Termo Anemómetro ALNOR 8525 y se calibran las termocuplas utilizando el programa de LabView *Prueba4.vi*, que dispone el laboratorio de acumuladores.
5. Se conecta eléctricamente el arreglo al conversor AC/DC, se abre el programa de CCS *cargabat*. Luego se abre el programa de Matlab *Prueba.m*, encargado de guardar los datos voltaje y corriente durante la descarga.¹³
6. Posterior a todo esto se utiliza el archivo *Prueba4.vi* para comenzar a grabar las temperaturas, *Prueba.m* se configura para que comience a grabar datos eléctricos y *cargabat.c* es configurado para comenzar la descarga a 4 [Ampere].
7. Durante la descarga, cuando la primera celda llega a 2,7 [Volts] se corta la descarga y enseguida se encienden los ventiladores ya calibrados al voltaje requerido.
8. Se deja enfriar el arreglo de baterías durante un tiempo mínimo de 30 min.¹⁴
9. Finalmente se apagan los ventiladores y se exportan los datos generados por *Prueba4.vi* y *Prueba.m* para su posterior trabajo.
10. Luego, para la obtención de los datos de caída de presión dentro del arreglo de celdas se conecta el sensor de presión Phidgets $\pm 2\text{kPa}$ al computador. Luego se conectan las mangueras del sensor, al arreglo experimental, se abre el programa

¹³ El conversor AC/DC es programado utilizando un computador externo.

¹⁴ Este tiempo es considerado suficiente para que la celda alcance la temperatura ambiente.

Medición de Presión.vi en el computador del laboratorio y se registran todos los datos en un Excel.

- De este Excel se despeja el promedio del valor medido por el sensor durante la medición, que por lo general oscila en el rango de [490,520], y se utiliza la siguiente ecuación para determinar la caída de presión:

$$\Delta p = \frac{V_{prom.} - (V_0 - 500)}{200} - 2,5 [kPa] \quad (3.1)$$

Con:

- $V_{prom.}$ el valor promedio obtenido de Excel.
- V_0 el valor medido en cuando los ventiladores están apagados.

A continuación se presenta la forma tipo de una descarga eléctrica de las celdas¹⁵, ver Figura 3-44, y un gráfico de la temperatura durante la descarga eléctrica y posterior encendido de los ventiladores, ver Figura 3-45.

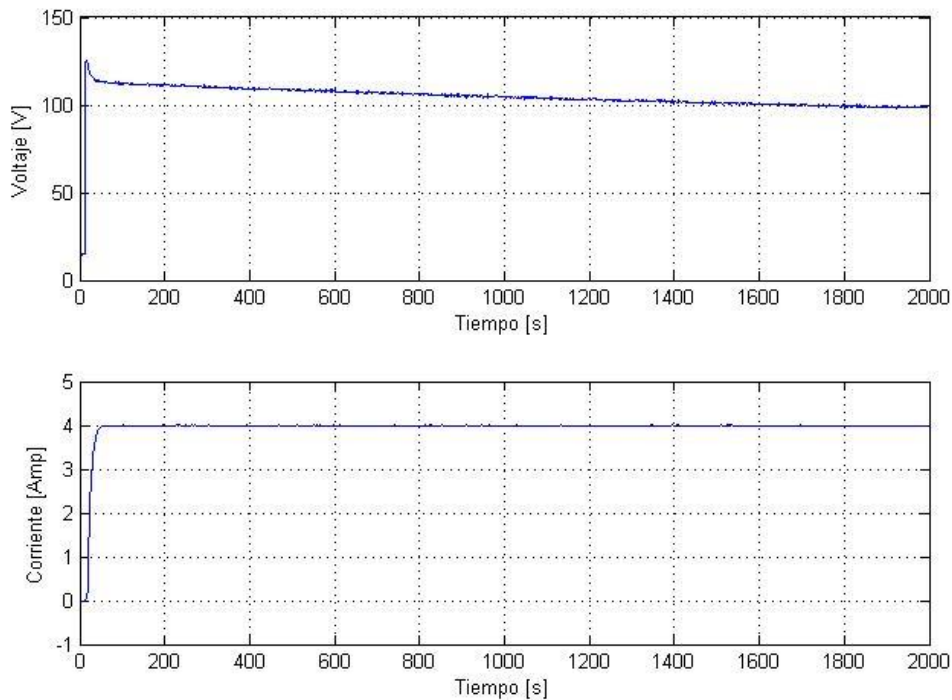


Figura 3-44: Descarga eléctrica tipo

¹⁵ Por problemas con los equipos se perdieron datos de las descargas de varios experimentos, dado lo anterior no se incluye en el próximo capítulo los datos de la descarga.

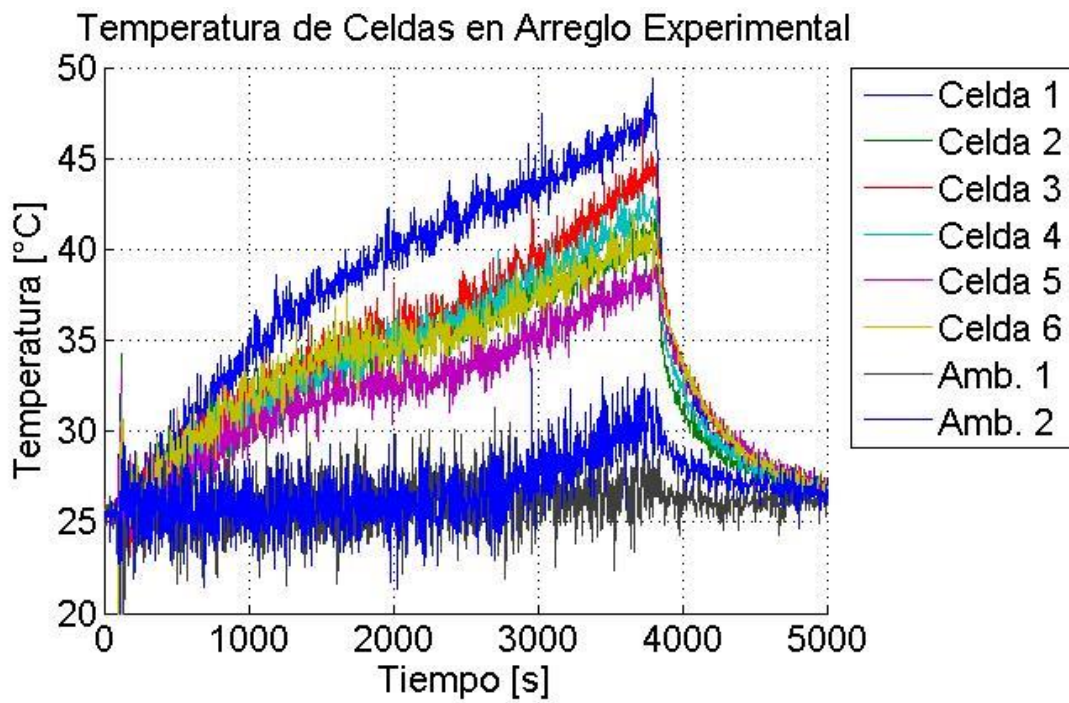


Figura 3-45: Temperatura durante descarga y ventilación

Capítulo 4

4 Resultados experimentales

4.1 Temperatura de las celdas

Como se explicó previamente, este trabajo se enfoca en el enfriamiento de las celdas. Dado esto, sólo se evalúa en el periodo posterior a la descarga.

Cabe destacar que los experimentos son nombrados según orden en que fueron realizados. Este orden puede no ser muy lógico para el lector, pero debe mantenerse de esta manera puesto que así fueron almacenados computacionalmente y enumerarlos de otra manera impediría volver a analizar los datos para contrastarlos con este informe.

A continuación se muestra un resultado tipo. El resto de los resultados se encuentra en el anexo Resultados Térmicos.

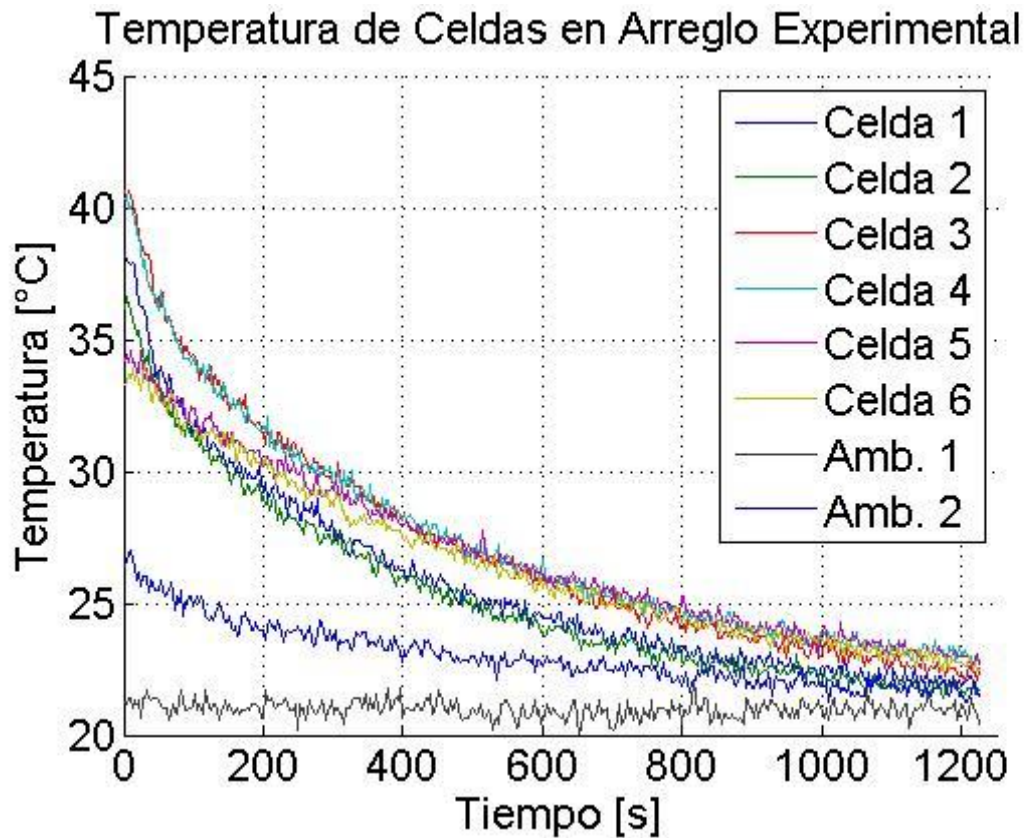


Figura 4-1: Experimento 1, disposición alineada, caudal 74,6 [m³/hr]

4.2 Caída de Presión

A continuación se presenta una tabla resumen con los resultados en caída de presión ordenados por tipo de arreglo y posteriormente caudal de ventilación, ver Tabla 4-1¹⁶.

Tabla 4-1: Caída de presión en Arreglo de Celdas

Exp.	Tipo de Arreglo	Voltaje Ventilador	Caudal [m ³ /hr]	Vel. Entrada [m/s]	Caída de Presión [Pa]
1	Alineado	5.55	74.6	1.8	19.43
3	Alineado	8.50	122.9	3.0	49.85
2	Alineado	11.00	152.6	3.8	79.02
9	Alineado	11.00	152.6	3.8	79.02
6	Escalonado	5.90	75.9	1.9	21.29
5	Escalonado	8.13	109.3	2.7	46.47
8	Escalonado	8.13	109.3	2.7	46.47
11	Escalonado	9.01	122.1	3.0	56.62
10	Escalonado	11.21	153.0	3.8	81.27

A continuación se presentan los resultados graficados, ver Figura 4-2.

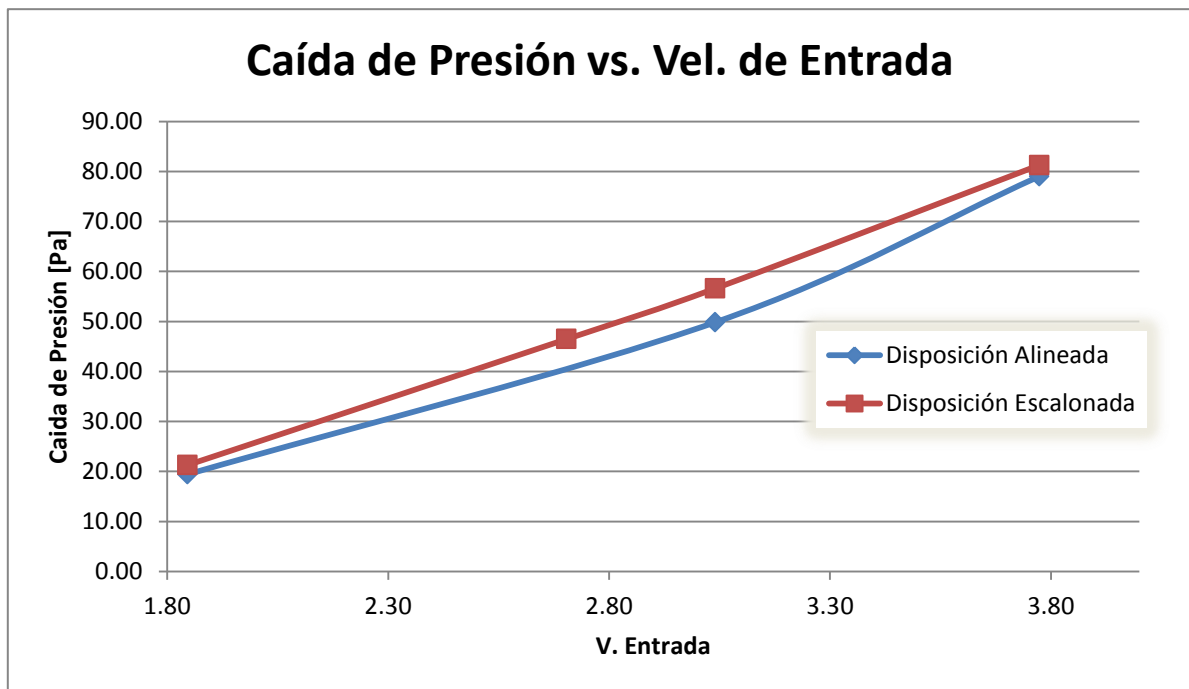


Figura 4-2: Caída de presión en Arreglo de Celdas

¹⁶ La medición de la caída de presión se realizó posterior a la etapa de experimentación con descarga eléctrica. Esto se realizó calibrando los ventiladores según los voltajes de cada experimento. Como consecuencia de lo anterior para experimentos con voltajes iguales y misma disposición de celdas, la caída de presión que se utilizó es la misma.

Capítulo 5

5 Análisis de resultados experimentales

5.1 Repetición experimental

Para probar repetición, se decidió generar la repetición de sólo un experimento por disposición. Lo anterior debido al alto tiempo requerido para la generación de cada experimento. Los experimentos repetidos fueron el exp. 2 (disposición alineada, $caudal = 152,6 \left[\frac{m^3}{hr} \right]$) y el exp. 5 (disposición escalonada, $caudal = 109,3 \left[\frac{m^3}{hr} \right]$). Sin embargo, por razones externas a ésta memoria, se generaron adicionalmente 6 repeticiones del exp. 2, las cuales fueron incluidas en éste análisis. Resumiendo, se tiene un total de 7 repeticiones del exp. 2 y 1 repetición del exp. 5.

Como se explicó en el punto Repetición experimental 2.7, la comparación entre experimentos se realizará utilizando una temperatura adimensionalizada:

$$\theta(t) = \frac{\theta(t)}{\theta(t=0)} = \frac{(T(t) - T_f)}{(T_i - T_f)} \quad (5.1)$$

Posterior a esta adimensionalización se procedió a graficar los promedios $\bar{\theta}(t)$ de cada celda, acotados por su desviación estándar, graficar los promedios $\bar{\theta}(t)$ de cada celda acotados por los máximos y mínimos obtenidos $max(\theta)$ y $min(\theta)$ y a su vez graficar la desviación estándar de cada celda en función del tiempo. A continuación se presentan los resultados obtenidos en repetitividad, ver desde Figura 5-1 a Figura 5-6.

Como se puede ver en estos resultados, el experimento muestra una desviación estándar se mantiene bastante baja, por lo general con un valor menor a 0,1.

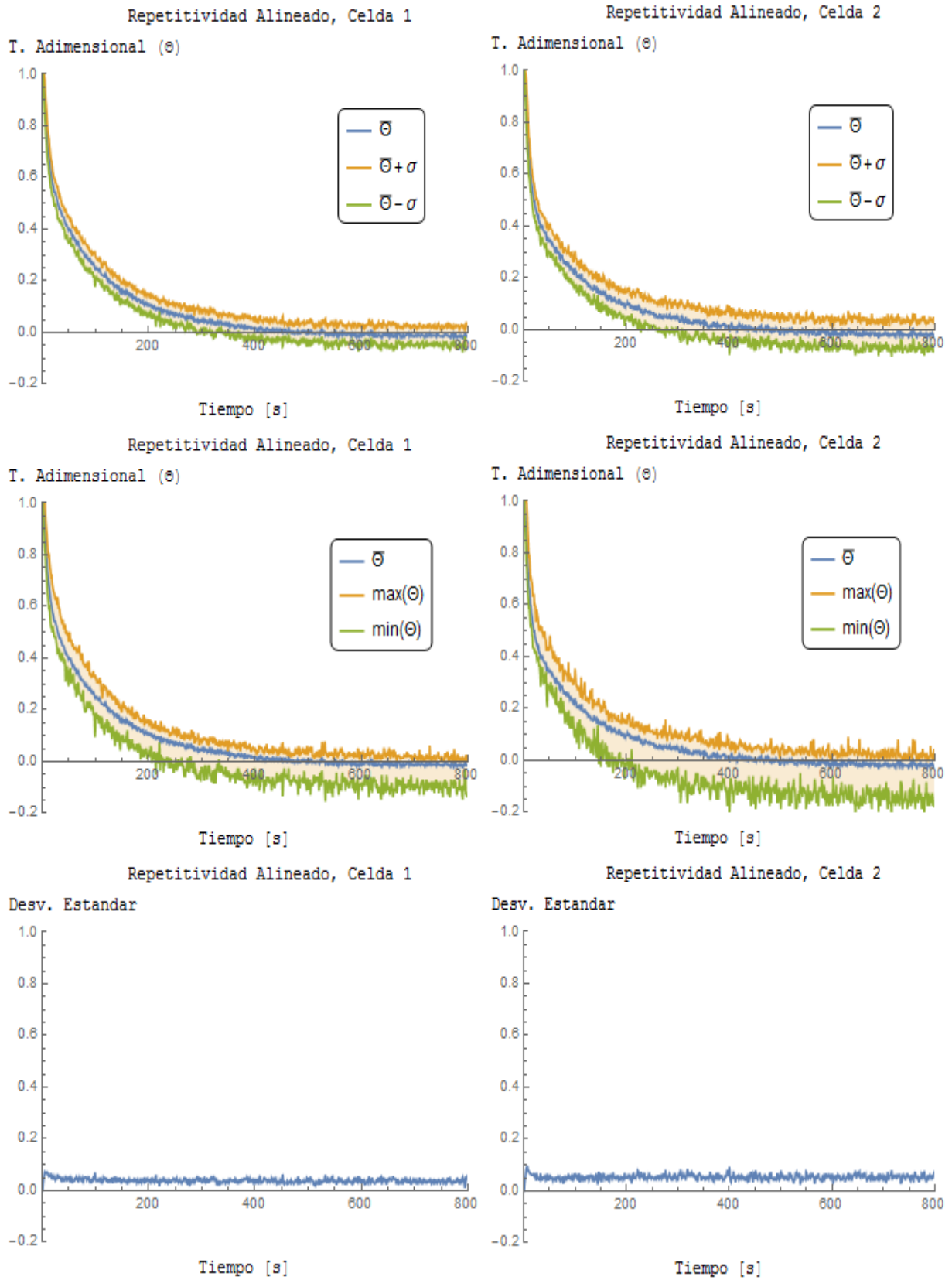


Figura 5-1: Repetitividad exp. 2, celda 1 y 2

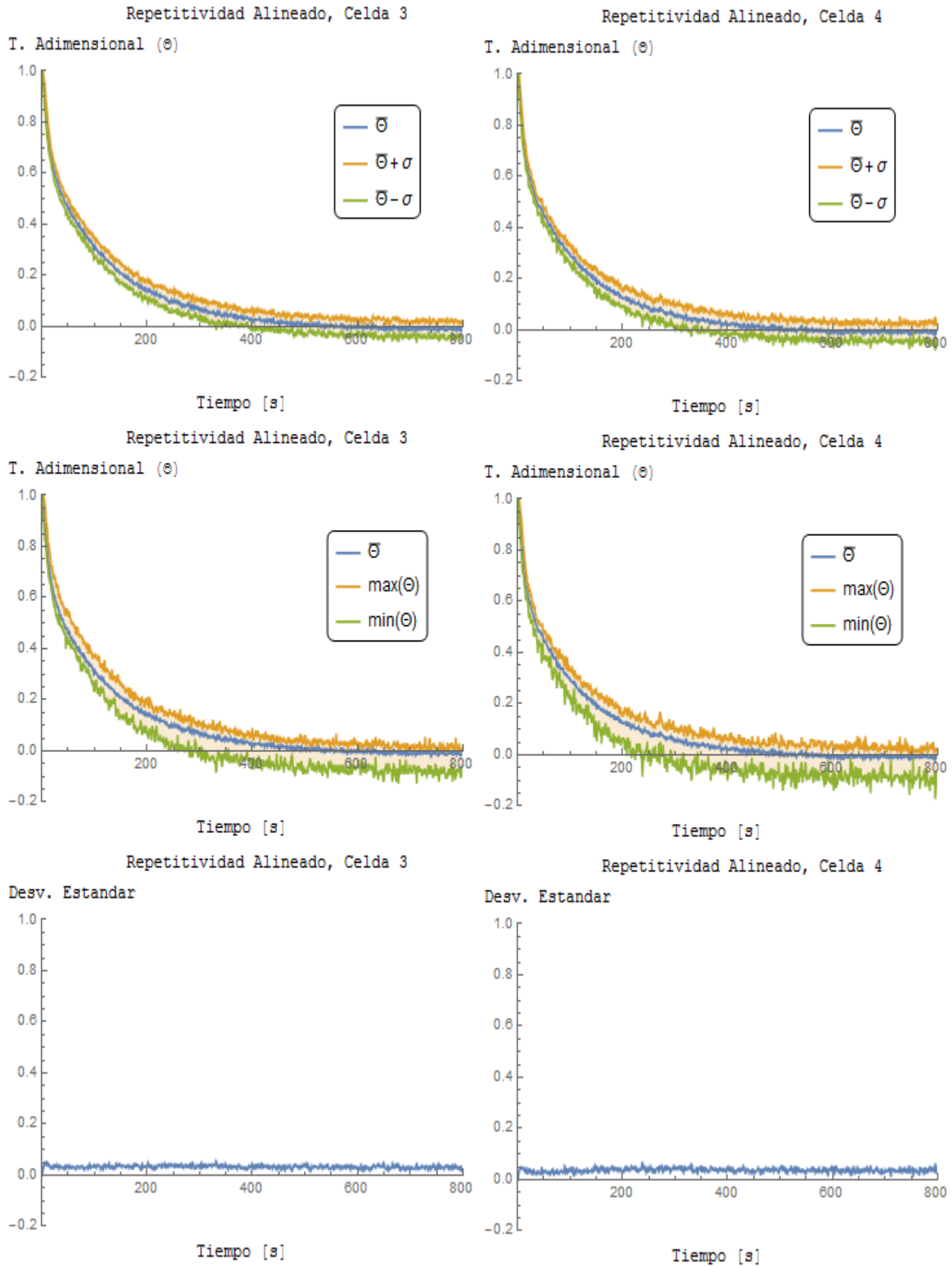


Figura 5-2: Repetitividad exp. 2, celda 3 y 4

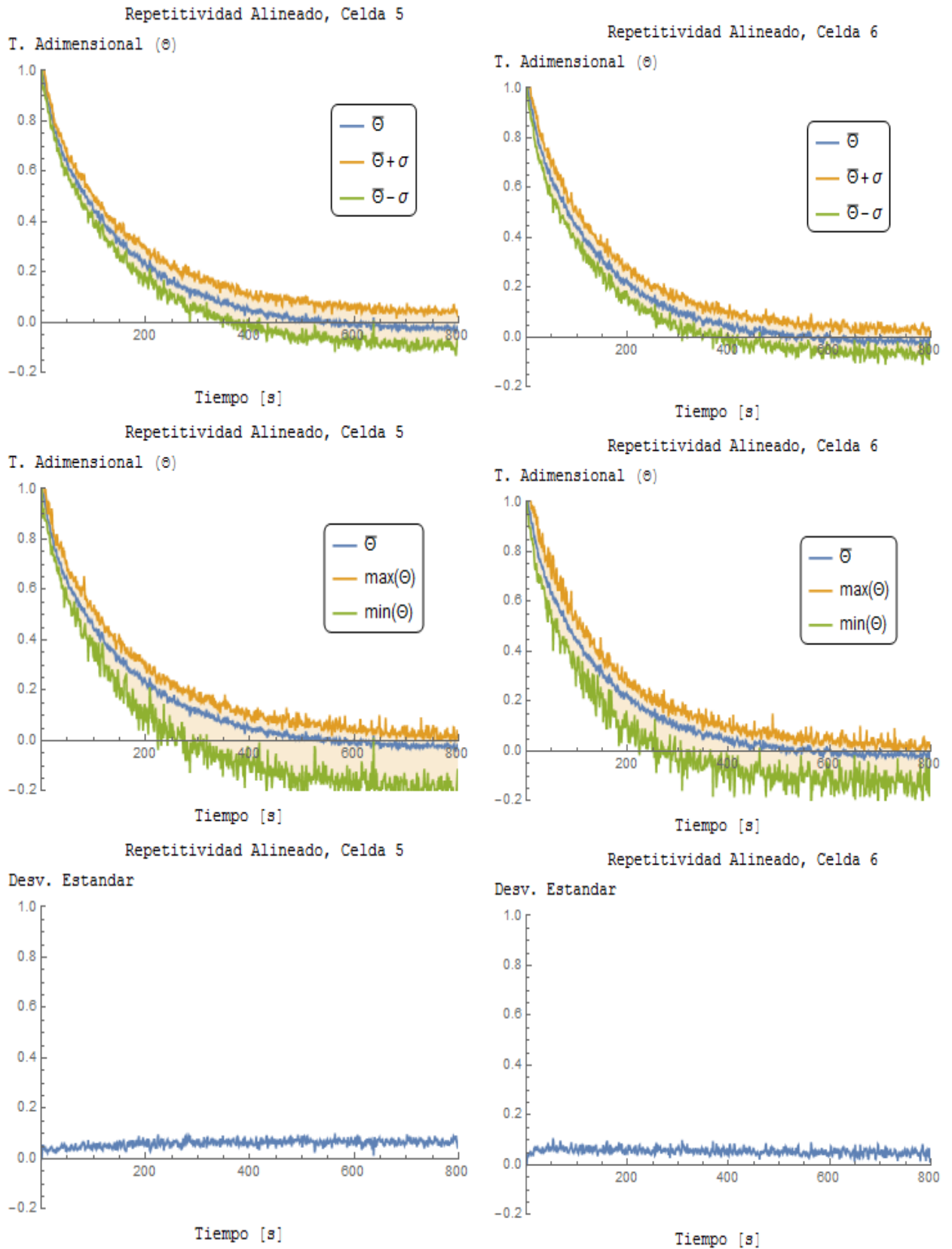


Figura 5-3: Repetitividad exp. 2, celda 5 y 6

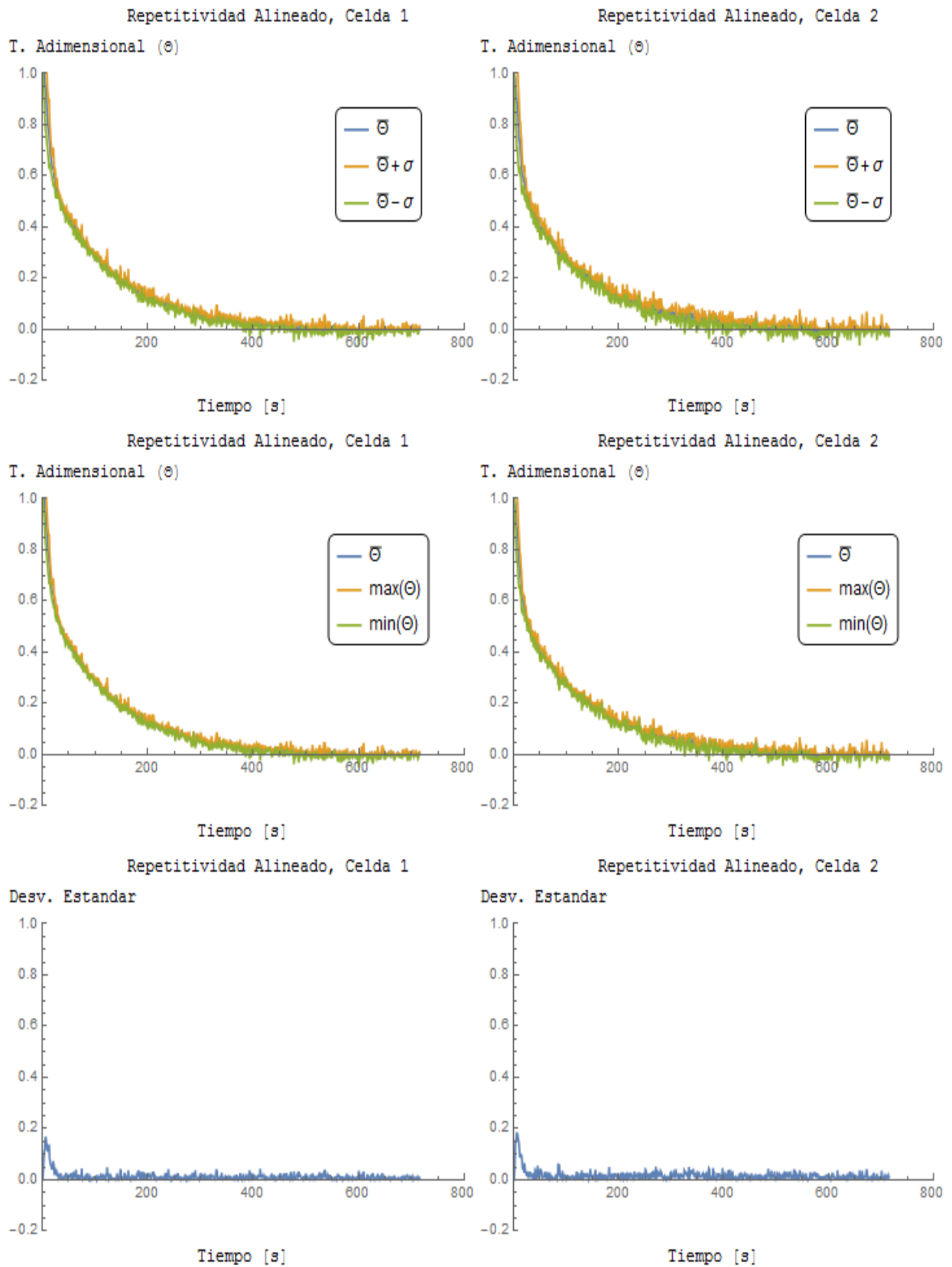


Figura 5-4: Repetitividad exp. 5, celda 1 y 2

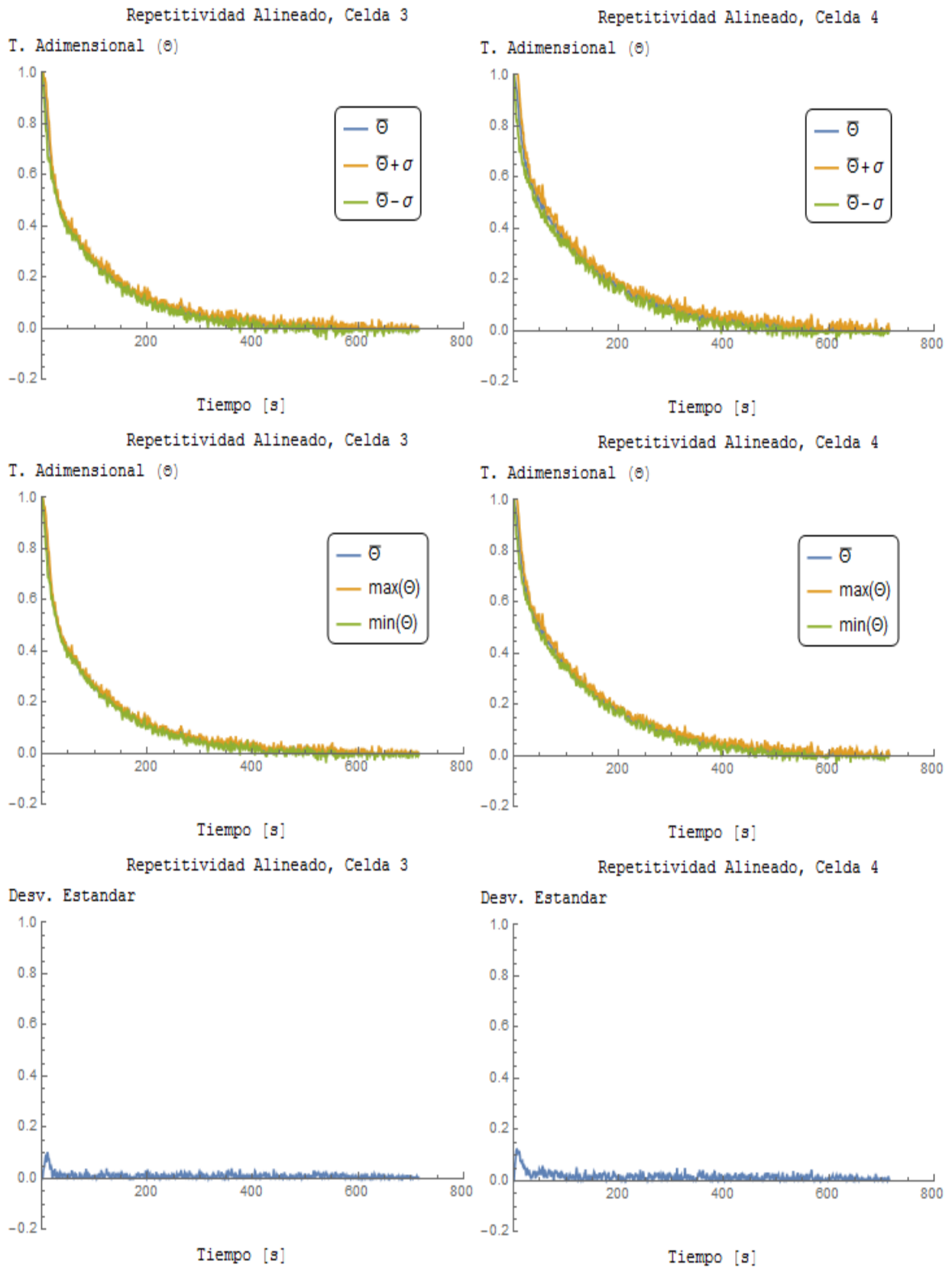


Figura 5-5: Repetitividad exp. 5, celda 3 y 4

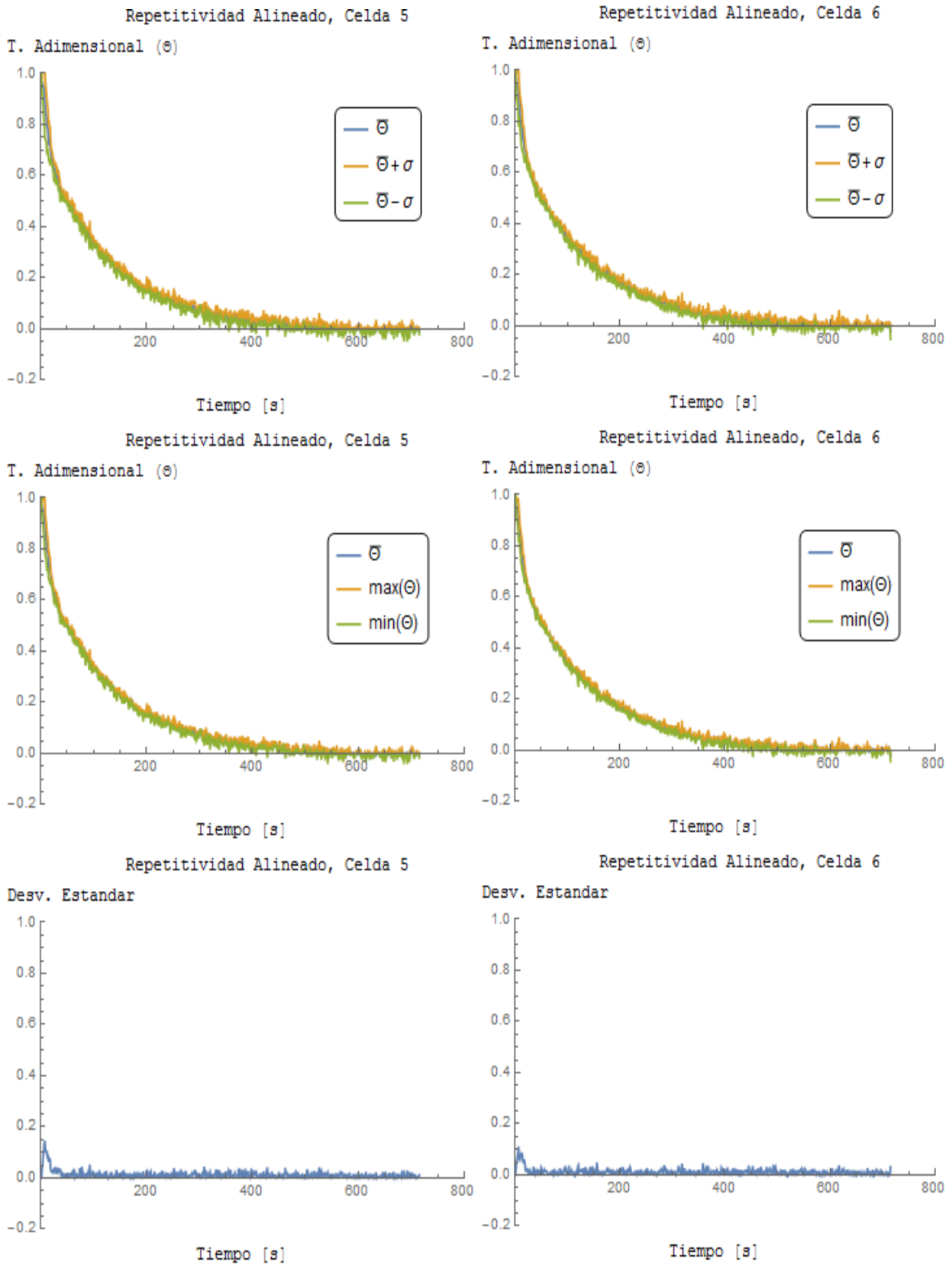


Figura 5-6: Repetitividad exp. 5, celda 5 y 6

5.2 Comportamiento tipo decaimiento exponencial

5.2.1 Ajuste de curvas a modelo exponencial

Ya obtenidos los resultados se procede a ajustar el modelo de decaimiento exponencial a las curvas de enfriamiento de las celdas.

Para esto se ajustan una curva del tipo:

$$T(t) = (T_i - T_f)e^{-\frac{t}{\tau}} + T_f \quad (5.2)$$

Con:

- T_i la temperatura al momento en que comienza la ventilación.
- T_f el promedio de la temperatura para los últimos 20 datos.
- τ el constante de decaimiento.

Para el ajuste se impone que el nivel de confianza no sea inferior a 0,9 y se ajusta τ hasta minimizar el error. Todo lo anterior fue realizado por medio del programa *Incerteza Comp. (FMK).nb*.¹⁷

A continuación, a modo de ejemplo se muestran los graficos del ajuste de la celda 1 a la 6 del experimento 1, el cual corresponde a una disposición alineada, con un caudal de $74,6 \left[\frac{m^3}{hr} \right]$, ver Figura 5-7. El resto de los gráficos se encuentran en el anexo Resultados Ajuste Exponencial.

¹⁷ Este programa también entregó los gráficos presentados en anexos.

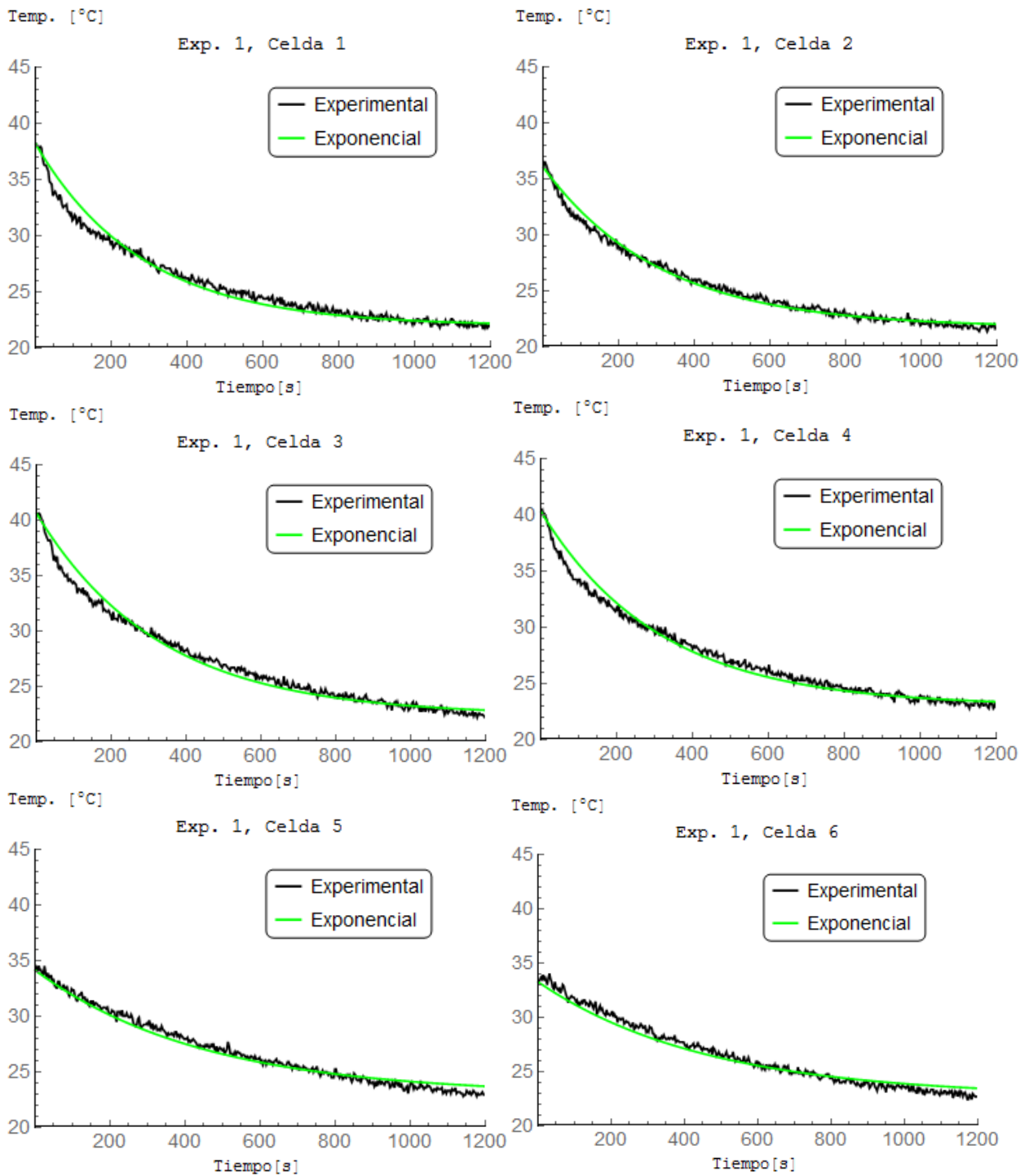


Figura 5-7: Ajuste Exponencial Exp. 1

Puesto que mostrar los resultados para cada una de las celdas requeriría mucho espacio, se presenta una tabla resumen con los resultados obtenidos de los ajustes de curva. Estas tablas presenta el τ obtenido, el coeficiente de determinación “*R cuadrado*” y el máximo error de temperatura asociado al modelo. Ver Tabla 5-1 y Tabla 5-2.

Tabla 5-1 "Tabla τ disposición alineada"

Disposición Alineada											
Exp. 1			Exp. 3			Exp. 2 AVG					
Caudal		74.60[m3/hr]	Caudal		122.90[m3/hr]	Caudal		152.60[m3/hr]			
Celda	τ [s]	r2	ΔT [°C]	τ [s]	r2	ΔT [°C]	τ [s]	r2	ΔT [°C]		
1	281.7	0.9998	2.2	268.0	0.9996	2.8	195.5	0.9993	3.4		
2	309.8	0.9999	1.4	240.6	0.9997	3.3	157.8	0.9993	3.6		
3	327.2	0.9998	2.0	317.1	0.9996	2.9	248.4	0.9993	3.7		
4	313.7	0.9999	1.9	282.6	0.9996	3.3	234.4	0.9994	3.2		
5	446.6	0.9999	1.3	469.8	0.9999	1.9	387.0	0.9997	1.6		
6	459.4	0.9999	1.5	432.4	0.9999	1.0	372.7	0.9997	1.4		
Vel.		1.84 [m/s]		Vel.		3.04 [m/s]		Vel.		3.77 [m/s]	

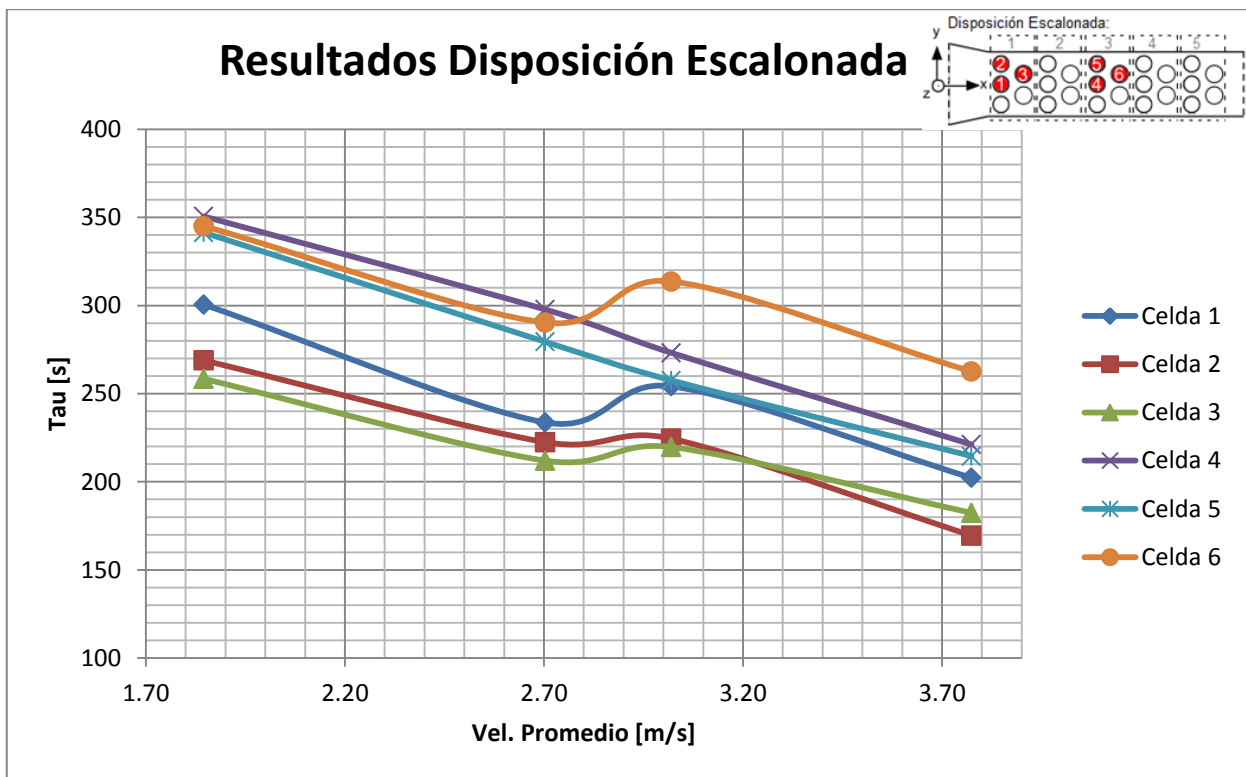


Figura 5-9: Gráfico τ vs. vel, disposición escalonada

5.2.2 Validez comportamiento tipo decaimiento exponencial

A partir de los datos obtenidos en el punto 5.2.1, se concluye que el modelo de comportamiento tipo τ no es válido. Más allá de que su coeficiente de determinación se sea alto, no se considera válido el modelo, puesto que una diferencia entre el modelo y la realidad de hasta 4,4 [°C] es demasiado alto tomando en cuenta lo recomendado es que las celdas no tengan una diferencia de más de 5[°C] entre sí. Además de esto se tiene que el error es mayor en las zonas de mayor temperatura, donde la precisión del modelo se hace más necesaria.

5.2.3 Razón de la Invalidez

Resulta difícil generar un análisis que sea tajante en cuanto a la razón de invalidez del modelo exponencial, puesto que la celda es un componente complejo y su comportamiento puede obedecer a fenómenos que competen más al ámbito de la química que la mecánica. Sin embargo se pueden descartar ciertas causas y apuntar a las probables.

En cuanto a la posibilidad de que una parte importante del calor haya sido disipado por conducción térmica, esto resulta improbable, dada la baja conductividad térmica del acrílico. Sin embargo en el caso de que esta hubiese sido una vía importante de disipación de calor, no hubiese constituido en un cambio de comportamiento, puesto que la disipación por esta vía es lineal, igual que la convección, luego el coeficiente τ hubiese tenido información de esta conducción, pero no hubiese cambiado el comportamiento tipo exponencial. En cuanto a la pérdida de calor en forma de radiación, se considera que la pérdida por esta vía es despreciable, puesto que se está trabajando a temperaturas de hasta 45 [°C], lo cual bajo como para que este fenómeno alcance a ser relevante.

Principalmente el comportamiento presenciado es atribuido a fenómenos internos de tipo endotérmicos que suceden al terminar la descarga. Actualmente existe bibliografía que hace referencia a este tipo de fenómenos, tales como *Schoeffert* [13]. Luego lo que se supone es que al terminar la descarga existe un reordenamiento de los electrones, el cual produce un aumento de voltaje entre los polos de las celdas. Este reordenamiento debe requerir de energía para llevarse a cabo, lo cual genera una abrupta caída de temperatura al comienzo de la descarga. La otra opción sería que el calor específico varíe en función de la temperatura, alterando el comportamiento térmico de las celdas. Cabe destacar que este decaimiento rápido de temperatura se ve neutralizado en las celdas ubicadas más atrás, puesto que el aire que perciben ya fue calentado por las celdas delanteras compensando la rápida caída de temperatura.

5.3 Comparación entre disposiciones y velocidades

Si bien la curva de comportamiento tipo decaimiento exponencial no se ajusta muy bien al comportamiento experimental, actualmente τ resulta ser el único parámetro de comparación entre los experimentos, razón por la cual se utilizará para compararlos.

Para la comparación se realizó el siguiente proceso. Puesto que comparar celda con celda no entrega datos fáciles a la comprensión, se decide comparar los promedios de las celdas de los experimentos y especificar la desviación estándar para dar luces de la diferencia en el comportamiento entre celdas. Si bien para la disposición escalonada se utilizó el promedio de todas las celdas, para la alineada sólo se utilizaron los valores de las celdas 1 a la 4 para esto. Lo anterior puesto que la celda 5 y 6 se posicionaron en una zona en donde para la disposición escalonada no se realizaron mediciones.

Asimismo se evaluaron las razones entre los comportamientos:

$$\text{Razón de Decaimiento} = \frac{\bar{\tau}_{Alineada}}{\bar{\tau}_{Escalonada}} \quad (5.3)$$

$$\text{Razón de Desviación} = \frac{\sigma_{Alineada}}{\sigma_{Escalonada}} \quad (5.4)$$

- Con σ la desviación estándar.

A continuación en la Tabla 5-3 se puede ver la de comparación entre disposiciones y velocidades.

Tabla 5-3 "Comparación entre Disposiciones y Velocidades"

Velocidad Promedio [m/s]	Disposición	τ Promedio [s]	Razón de Decaimiento	Desviación Estándar [s]	Razón de Desviación	Experimentos
1.8	Alineada	308.1	0.99	16.5	0.44	Exp. 1
	Escalonada	310.8		37.2		Exp. 6
3.0	Alineada	277.1	1.08	27.6	0.88	Exp. 3
	Escalonada	257.1		31.4		Exp. 11
3.8	Alineada	209.0	1.00	35.3	1.18	Exp. 2 y Eq.
	Escalonada	208.7		29.9		Exp. 10

Junto con esto se presentan los resultados graficados, ver desde Figura 5-10 a Figura 5-12.

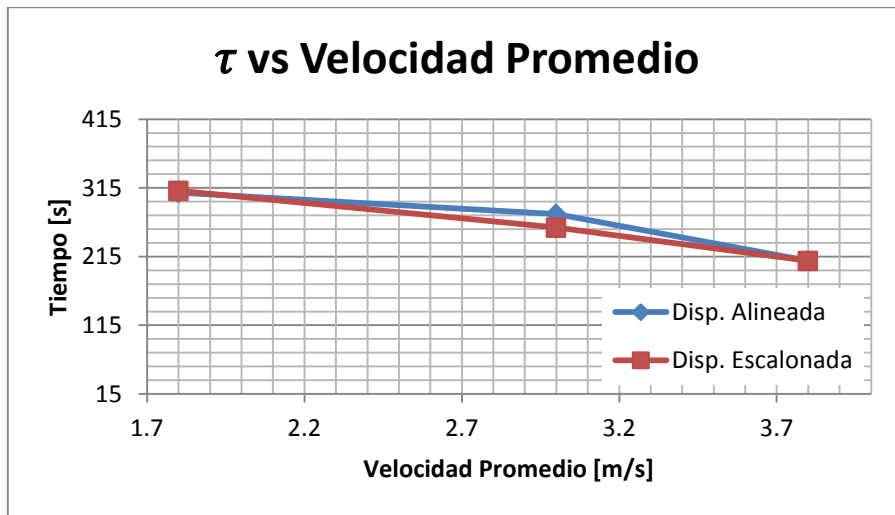


Figura 5-10: Comparación de enfriamiento entre disposiciones

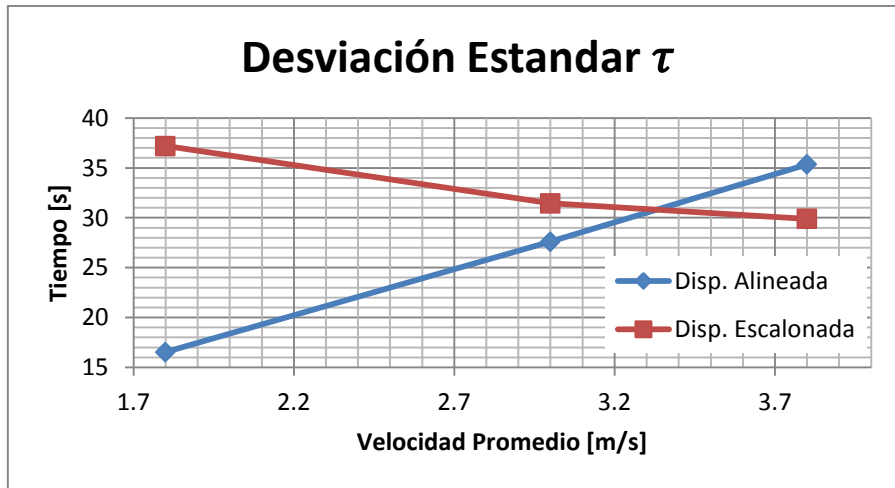


Figura 5-11: Comparación de desviaciones estándar entre disposiciones

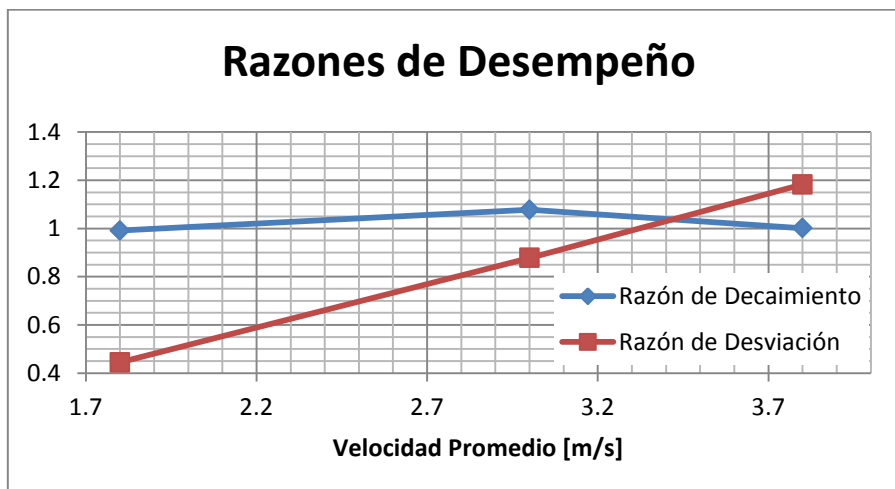


Figura 5-12: Razones de Desempeño en función de la velocidad

Si bien ambas disposiciones muestran tener un τ promedio que se mantiene similar entre ellas para distintas velocidades de entrada, la disposición escalonada muestra tener una distribución de temperaturas más homogénea entre celdas a altas velocidades, que además esta distribución disminuye al aumentar la velocidad.

Cabe mencionar que los de resultados se concluye que ninguna disposición es absolutamente que la otra, la elección de una sobre la otra depende principalmente de la velocidad de ventilación, siendo la homogeneidad de temperatura la variable que más cambia dependiendo de la velocidad. A su vez hay que tener presente que la disposición alineada logra incluir un mayor número de celdas en el mismo espacio que la disposición escalonada. Esto se hace más notorio para un bajo número de celdas por fila.

5.4 Comportamiento tipo modelo paramétrico

5.4.1 Ajuste de curvas a modelo paramétrico

A continuación se presentan nuevamente los gráficos de τ en función de velocidades de entrada, ver Figura 5-13 y Figura 5-14.

Como se explicó anteriormente, la función a ajustar es la siguiente:

$$\tau(v) = \delta + \frac{\varepsilon}{v} \quad (5.5)$$

Por medio del programa *FittingParamétrico(FMK).nb*, se obtuvieron los siguientes ajustes de la ecuación del modelo paramétrico, ver Tabla 5-4. Estos ajustes se hacen sobre los resultados de τ obtenidos de manera experimental, los cuales varían en función de la velocidad.

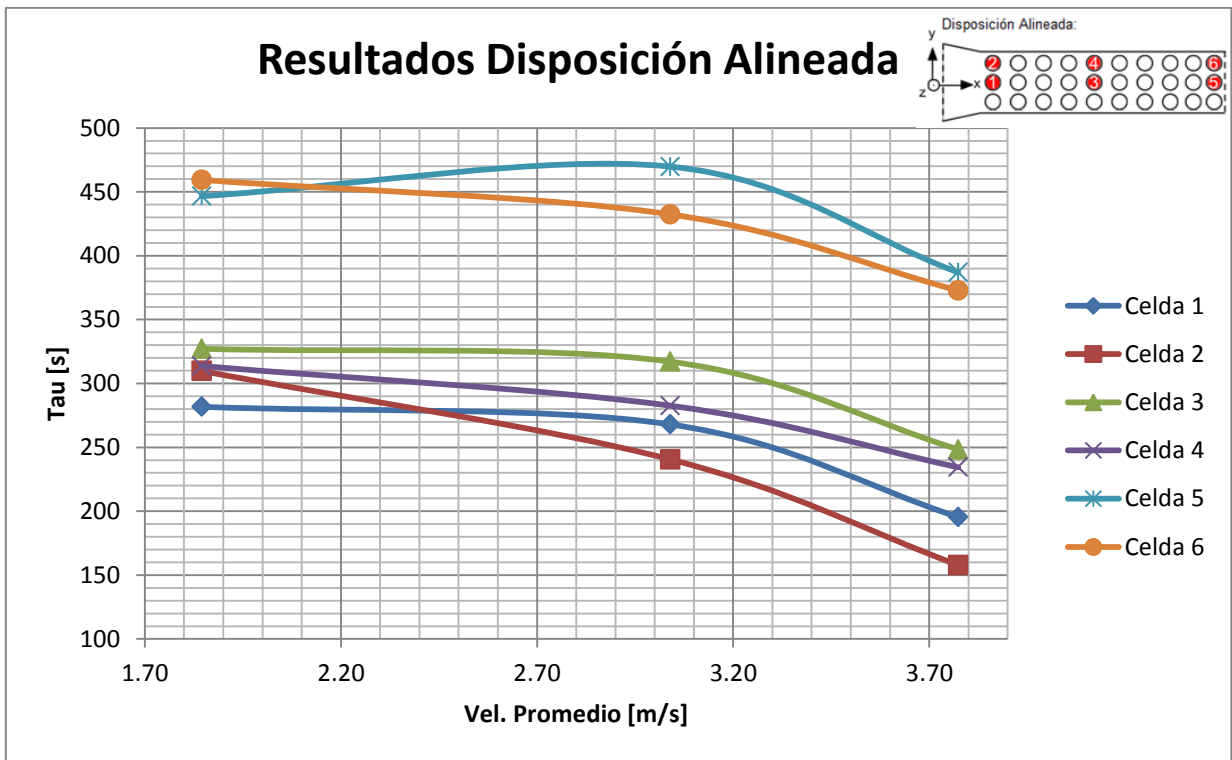


Figura 5-13: Gráfico τ vs. velocidad promedio, disposición alineada

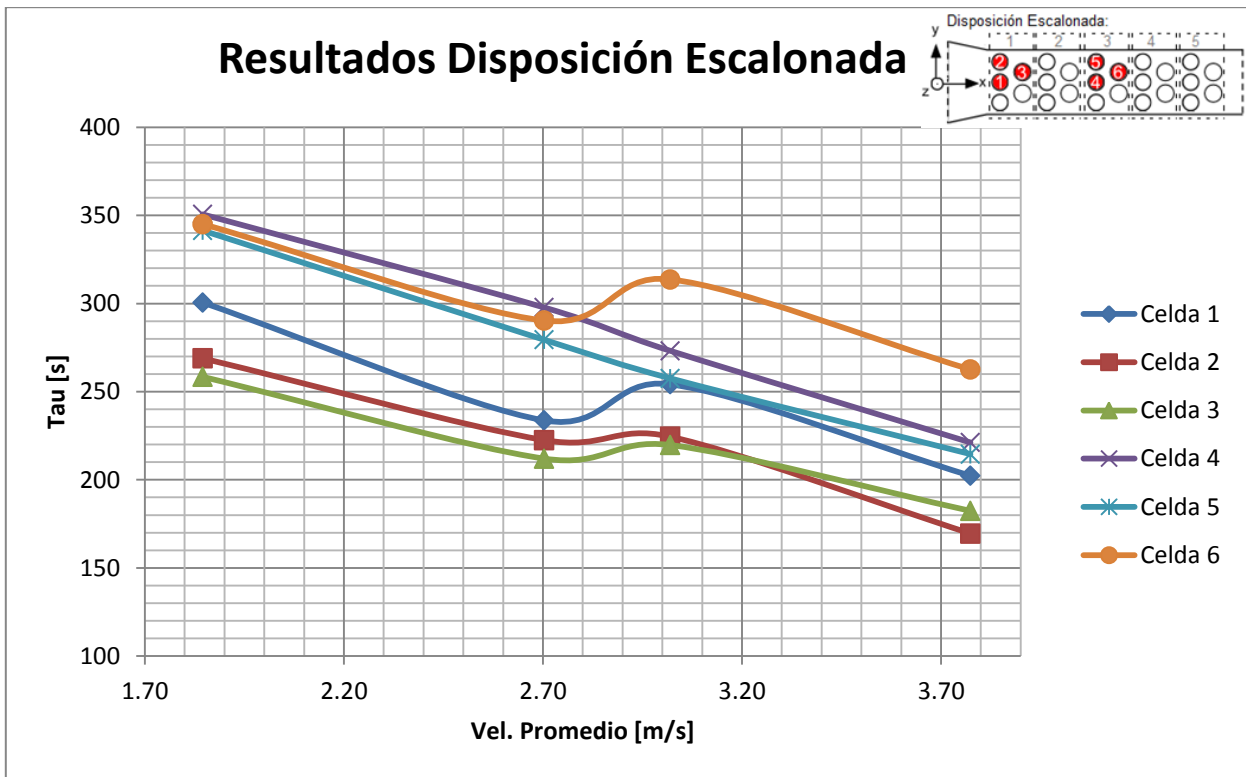


Figura 5-14: Gráfico τ vs. velocidad promedio, disposición escalonada

Tabla 5-4: Resumen ajuste paramétrico.

Celda	Celdas Alineadas				Celdas Escalonadas			
	Delta [s]	Epsilon [m]	R2	MaxErr [s]	Delta [s]	Epsilon [m]	R2	MaxErr [s]
1	153.9	249.4	0.991	32.0	125.2	324.8	0.997	21.4
2	49.7	492.2	0.992	29.0	99.9	322.1	0.997	17.9
3	212.5	224.6	0.994	30.7	122.6	253.4	0.999	13.2
4	181.9	251.0	0.998	18.2	120.0	439.4	0.998	15.3
5	383.8	133.9	0.995	42.0	106.9	441.2	0.999	9.3
6	320.8	265.9	0.998	24.1	203.3	264.2	0.998	22.9

Como se puede ver en la Figura 5-15 y Figura 5-16, si bien el ajuste en algunos casos se asemeja a la curva, existe una clara diferencia en cuanto a la tendencia que tienen ambas curvas. Se hace evidente que la tendencia experimental tiende más a ser convexa, mientras que el modelo paramétrico es por definición una función cóncava, puesto que su segunda derivada es positiva.

A modo de profundizar más esta aseveración se realizó un ajuste polinómico a las curvas experimentales, ver Tabla 5-5. La función ajustada es la siguiente:

$$f(v) = a_1 \cdot v^2 + a_2 \cdot v + a_3 \quad (5.6)$$

- Con v la velocidad promedio del aire.

De ser a_1 negativo, la función es convexa y viceversa. Dado lo anterior se tiene que en el caso alineado todas las curvas experimentales son convexas y en el caso escalonado la constante a_1 se acerca al cero evidenciando un comportamiento predominantemente lineal.

Tabla 5-5 "Ajuste Polinómico del Comportamiento Paramétrico"

Celda	Celdas Alineadas			Celdas Escalonadas		
	a1	a2	a3	a1	a2	a3
1	-181.4	808.8	-593.1	6.3	-83.2	430.1
2	-154.0	619.6	-309.3	-7.3	-9.2	309.2
3	-174.8	783.4	-523.0	3.2	-55.9	349.1
4	-98.9	413.4	-112.5	-3.5	-47.8	450.8
5	-245.7	1144.6	-828.7	6.7	-103.6	509.8
6	-133.8	576.9	-149.8	0.5	-42.3	419.0

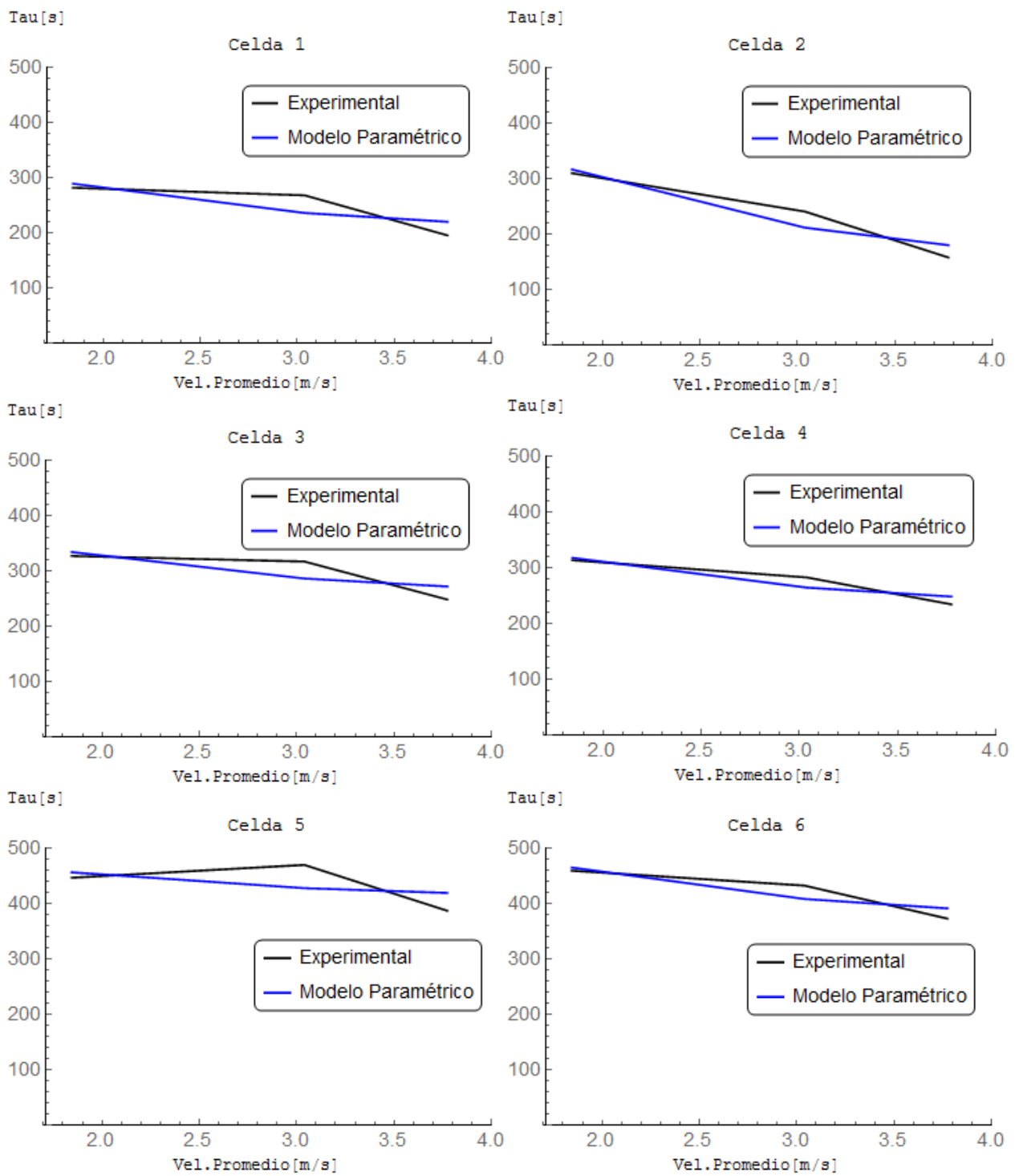


Figura 5-15: Ajuste Curvas Paramétricas en Disposición Alineada

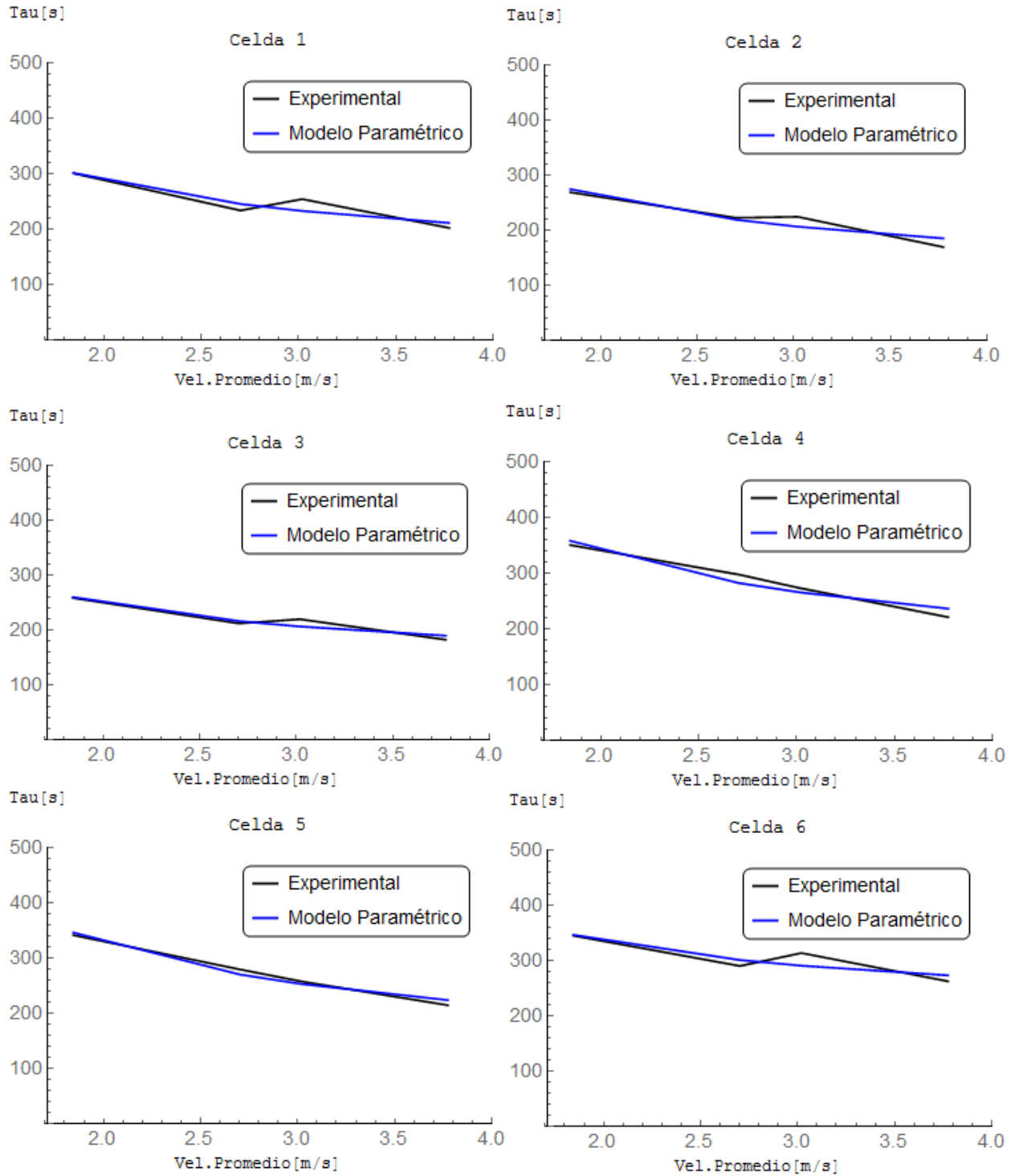


Figura 5-16: Ajuste Curvas Paramétricas en Disposición Escalonada

5.4.2 Validez del modelo paramétrico

Como se explicó anteriormente el ajuste de las curvas logra cubrir bastante bien los valores alcanzados experimentalmente. Sin embargo lo anterior no dice mucho dada la baja cantidad de datos tomados (es bastante fácil obtener bajo error al ajustar una curva a 3 puntos). Luego para analizar a mayor profundidad, es necesario observar si las tendencias presentes en ambas curvas son similares, para esto, se verifica si existe congruencia entre las segundas derivadas de los datos.

Como se muestra en la Tabla 5-5, la segunda derivada de los resultados experimentales es negativa para el caso alineado y cercana a cero para el caso escalonado. Ambos comportamientos entran en contradicción con el modelo paramétrico, puesto que su segunda derivada es siempre positiva. Luego conforme a lo anterior, la tendencia de las curvas no condice con la del modelo paramétrico apuntando a que, para otros valores experimentales fuera del rango de medición, el modelo no predecirá el comportamiento térmico de las baterías.

5.4.3 Razón de la invalidez

Las razones de invalidez pueden ser diversas, desde que el software de CFD no logró representar el comportamiento real, hasta que no se tiene suficiente información de la disipación de calor en las celdas. Sin embargo dentro de las principales causas, estaría que el modelo paramétrico fue generado utilizando velocidades entre 40 y 90 [km/h], puesto que claramente estas velocidades no se asemejan a las presenciadas en los experimentos, que se encuentran en el rango entre los 6 y 14 [km/h]. Dado esto, no resulta extraño que el comportamiento experimental sea distinto del predicho por el modelo, ya que las turbulencias experimentadas a las velocidades experimentales no son comparables con las simuladas, de hecho es posible que incluso no existen turbulencias para las velocidades más bajas. Sumado a lo anterior existen muchos casos de transferencia de calor, en que la convección sigue una tendencia distinta dependiendo de si es que el fluido se encuentra en un régimen turbulento, de transición o de flujo laminar.

5.5 Método de volúmenes finitos

5.5.1 Ajuste de curva de decaimiento exponencial a resultados de MVF

Una vez obtenidos los resultados generados por CFX en Ansys, se procedió a ajustar los datos para determinar τ correspondiente a cada curva, lo anterior se logró por medio del programa *EvaluaciónMVF.nb*, ver anexo EvaluaciónMVF. Puesto que el ajuste mostró ser muy similar a la curva entregada por MVF, no resulta necesario graficar todas las curvas, sólo se mostrarán los τ obtenidos. A continuación se presenta el gráfico con mayor error, 0,301[°C], y mayor coeficiente de determinación “*R cuadrado*”, de 0.999999945. Ver Figura 5-16.

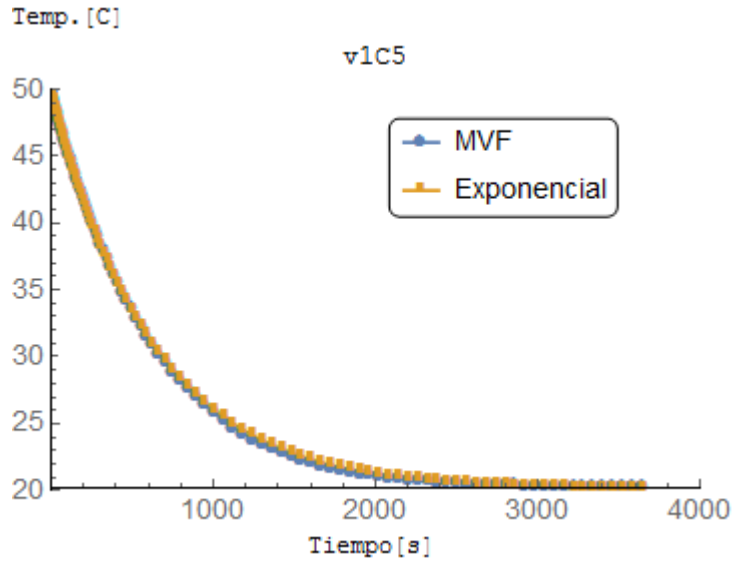


Figura 5-17: Resultados MVF y ajuste exponencial, celda 1, Velocidad de entrada= 1,8 [m/s], equivalente a Exp. 1

Para determinar la validez de los resultados en MVF se calculó el error de simulación de la siguiente manera:

$$\text{Error de Simulación}^{18} = \frac{\tau_{MVF} - \tau_{exp}}{\tau_{exp}} \cdot 100\% \quad (5.7)$$

Asimismo se determinó también el promedio de esta simulación y la desviación estándar. Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 5-6.

¹⁸ No se utilizó el valor absoluto, puesto que así se pueden ver sesgos, positivos o negativos, en los valores de τ predichos por las simulaciones.

Tabla 5-6: Resultados MVF y contraste con resultados experimentales

Disposición	Resultados en Simulaciones					Resultados Experimentales			Comparación	
	Vel. [m/s]	Celda	τ	R2	MaxErr	τ	R2	Exp.	Error Simulación	
Alineada	1.8	1	637.8	1.000	0.117	281.7	0.9998	1	126%	
	1.8	2	631.8	1.000	0.119	309.8	0.9999		104%	
	1.8	3	548.9	1.000	0.140	327.2	0.9998		68%	
	1.8	4	590.0	1.000	0.132	313.7	0.9999		88%	
	1.8	5	624.8	1.000	0.309	446.6	0.9999		40%	
	1.8	6	561.0	1.000	0.139	459.4	0.9999		22%	
	3.0	1	417.9	1.000	0.148	268.0	0.9996	3	56%	
	3.0	2	415.1	1.000	0.148	240.6	0.9997		73%	
	3.0	3	358.8	1.000	0.150	317.1	0.9996		13%	
	3.0	4	394.2	1.000	0.149	282.6	0.9996		39%	
	3.0	5	431.2	1.000	0.159	469.8	0.9999		-8%	
	3.0	6	383.1	1.000	0.150	432.4	0.9999		-11%	
	Alineada	3.8	1	348.0	1.000	0.150	195.5	0.9993	2 y Eq.	78%
		3.8	2	345.9	1.000	0.150	157.8	0.9993		119%
		3.8	3	305.3	1.000	0.170	248.4	0.9993		23%
		3.8	4	331.2	1.000	0.166	234.4	0.9994		41%
		3.8	5	358.1	1.000	0.150	387.0	0.9997		-7%
		3.8	6	333.4	1.000	0.150	372.7	0.9997		-11%
Escalonada	1.8	1	626.3	1.000	0.119	300.6	0.9996	6	108%	
	1.8	2	635.1	1.000	0.118	268.9	0.9997		136%	
	1.8	3	614.5	1.000	0.122	258.4	0.9995		138%	
	1.8	4	555.5	1.000	0.137	350.6	0.9998		58%	
	1.8	5	574.9	1.000	0.133	341.4	0.9999		68%	
	1.8	6	560.3	1.000	0.136	345.1	0.9999		62%	
	3.0	1	412.1	1.000	0.149	254.2	0.9997	11	62%	
	3.0	2	419.4	1.000	0.148	224.5	0.9998		87%	
	3.0	3	433.4	1.000	0.148	219.7	0.9996		97%	
	3.0	4	394.3	1.000	0.149	273.2	0.9997		44%	
	3.0	5	411.6	1.000	0.149	257.6	0.9998		60%	
	3.0	6	395.3	1.000	0.149	313.7	0.9998		26%	
	Escalonada	3.8	1	343.6	1.000	0.150	202.3	0.9998	10	70%
		3.8	2	350.2	1.000	0.150	169.5	0.9998		107%
		3.8	3	369.1	1.000	0.150	182.4	0.9996		102%
		3.8	4	337.7	1.000	0.150	221.2	0.9993		53%
		3.8	5	354.6	1.000	0.150	214.6	0.9996		65%
		3.8	6	339.4	1.000	0.150	262.6	0.9993		29%
							Promedio	62%		
							Desv. Estándar	41%		

5.5.2 Validez de las simulaciones

Se puede observar en la tabla anterior que el error promedio es de un 62%, con una desviación estándar de 41%, dado esto resulta claro que las simulaciones por MVF no predicen el comportamiento con precisión. Sin embargo, dado que los resultados presentan un importante sesgo positivo, estas simulaciones podrían perfectamente ser utilizadas, a la hora de diseñar, para acotar los valores que puede alcanzar τ , ya que el error de simulación más bajo fue de -11%, bastante cercano al experimental.

5.5.2.1 Diferencias entre el modelo y el experimento

Dada la naturaleza del modelo, resulta necesaria la utilización de simplificaciones y supuestos para la obtención de resultados.

5.5.2.1.1 Condiciones de borde

Los perfiles de velocidad no pudieron ser obtenidos experimentalmente, puesto que no se contó con equipo para esto. Dado esto, para la entrada del aire al arreglo se utilizó un perfil de tipo ventana, el cual calza con el caudal utilizado en la experimentación. Esta simplificación hace calzar los caudales, pero no logra igualar los perfiles de velocidad.

Para la generación de las simulaciones se utilizaron paredes adiabáticas para la simplificación del problema. Esto contrasta con la realidad en que si bien las paredes de acrílico resultan ser buenas aislantes, permiten el paso calor.¹⁹

5.5.2.1.2 Condiciones iniciales

La temperatura de término de descarga del arreglo experimental y la de las simulaciones no siempre calzaron del todo, puesto que esta temperatura varió entre experimentos, se utilizó la simplificación de que todas las celdas partían a 50[°C] en las simulaciones. De todas maneras esto resulta poco relevante, puesto que τ depende de cómo varía la diferencia de temperatura $\theta(t)$, no de su valor absoluto $T(t)$.

5.5.3 Razón de invalidez

Existen diversas razones que podrían haber influido en la invalidez de este modelo. A continuación las más probables:

- Como se explicó en el punto 5.2.3, probablemente existan fenómenos endotérmicos que sucedan después del proceso de descarga y este tipo de fenómenos no fue incluido en las simulaciones, luego el comportamiento no debiese seguir el experimental.
- El caudal medido puede haber tenido algunas diferencias en relación a la realidad, luego estas diferencias pueden asociarse a un error sistemático en la predicción de la temperatura, razón por la cual los resultados de Ansys tuvieron un importante sesgo positivo. Esta diferencia se explicaría principalmente por el hecho de que el flujometro se veía influenciado por la componente en teta del flujo de aire.

¹⁹ En las simulaciones asimismo se obvió la disipación de calor vía radiación.

- El MVF no logra predecir el comportamiento del fluido debido a que hay fenómenos que no pueden ser descritos por las ecuaciones gobernantes de este método, *i.e.* Navier Stokes.
- La celda puede tener un calor específico dependiente de la temperatura, contrario a lo supuesto en las simulaciones.

5.6 Resultados preliminares con modelos fractales

Este modelo consiste en el perfeccionamiento del comportamiento tipo decaimiento exponencial. Actualmente existen diversos fenómenos físicos los cuales no pueden ser explicados por medio de la difusión normal. Muchos de estos fenómenos han sido exitosamente modelados utilizando el fenómeno de difusión anómala, la cual puede ser representada utilizando derivadas fractales [14].

Por medio de este modelo se ha logrado generar un mucho mejor ajuste de la curva a los resultados experimentales, ver Figura 5-18. Sin embargo no se profundizará en éste, puesto que escapa de los alcances de éste informe.

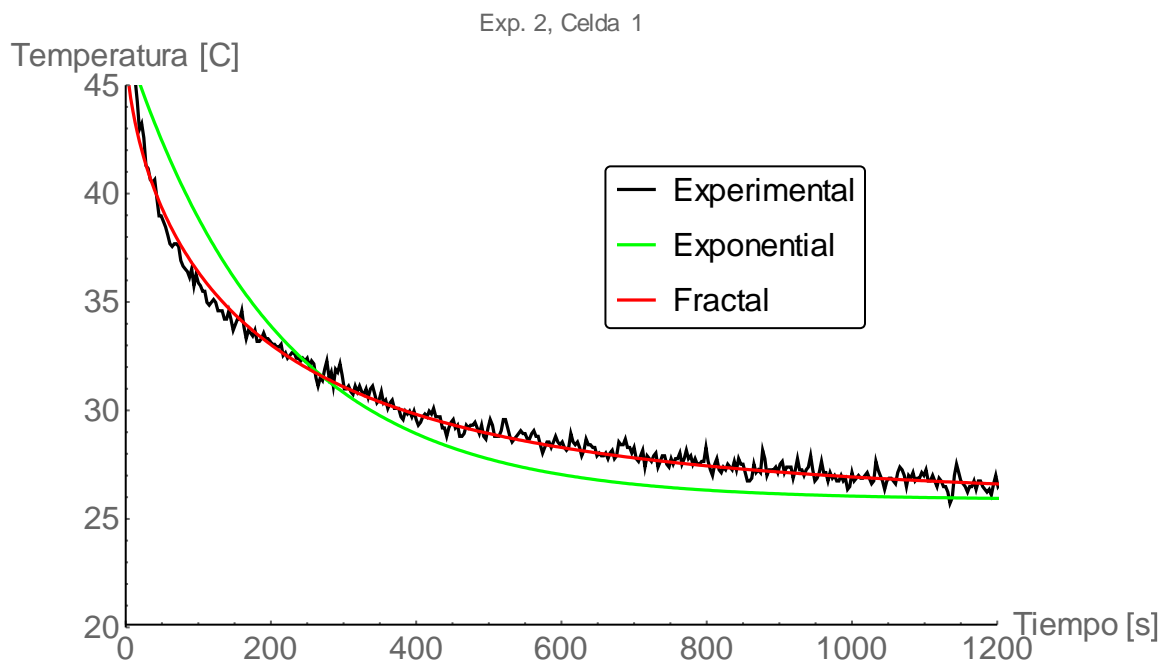


Figura 5-18: Ajuste Utilizando Modelo Fractal

Capítulo 6

6 Conclusiones

6.1 Validez de los modelos

6.1.1 Comportamiento tipo decaimiento exponencial

Si bien el modelo de decaimiento exponencial se acerca al comportamiento experimental, éste no predice con la certeza requerida el comportamiento de las celdas. Dado esto el modelo, para esta aplicación, se considera inválido, sin embargo la similitud que tiene con el comportamiento experimental, indica que el modelo no dista mucho de la realidad. Luego sería necesario perfeccionarlo para lograr llevar el error a rangos aceptables.

6.1.2 Modelo paramétrico

El modelo paramétrico no se ajusta a los resultados experimentales obtenidos. La razón de su invalidez se asocia con la incongruencia entre los rangos de velocidad utilizados para su generación y las velocidades utilizadas durante la experimentación. Dado lo anterior no se descarta su validez para velocidades mayores a 40 [km/hr].

6.1.3 Método de volúmenes finitos

Si bien el modelo de MVF no predice la realidad con suficiente exactitud, pero dado su sesgo positivo, éste puede ser utilizado para acotar superiormente el valor de τ . Luego si se logra generar una transformada que logre traspasar los valores de τ a algún modelo con menor error asociado, podría utilizarse este tipo de simulaciones para acotar superiormente el comportamiento de las celdas.

6.2 Comparación entre disposiciones y velocidades

La disposición alineada presenta un τ promedio similar al de la disposición escalonada y una menor pérdida de carga. Sin embargo la disposición escalonada muestra una desviación estándar entre los taus mucho menor, lo cual habla de temperaturas más similares entre celdas. De todas maneras se tiene que tener presente que la disposición alineada logra incluir un mayor número de celdas en el mismo espacio que la disposición escalonada. Esto se hace más notorio para un bajo número de celdas por fila.

6.3 Otros

Aunque la creación de un estándar experimental para la generación de este tipo de experimentos esta fuera del alcance de este trabajo, la justificación del diseño, generación de un procedimiento experimental, junto con la elaboración de un Checklist, contribuyen en post de esta estandarización, pudiendo ser considerados como los primeros pasos en esa dirección.

6.4 Recomendaciones

6.4.1 Perfil de velocidades

Para las simulaciones por Método de Volúmenes Finitos podría ser positivo el conocer con exactitud el perfil de velocidad proveniente de los tubos. Dado esto a futuro podría evaluarse la compra de un anemómetro de hilo caliente capaz de medir el perfil de velocidad en el tubo o incluso en el adaptador, sin distorsionar el mismo perfil que se está midiendo. Lo anterior podría entregar información importante en cuanto al comportamiento de las primeras celdas a las que ataca el fluido, puesto que estas reciben el flujo de manera distinta a la que lo reciben las celdas posteriores. Asimismo ayudaría a generar un perfil de velocidad en las simulaciones que fuese similar al existente en los experimentos.

6.4.2 Modelo fractal

Según lo mostrado en el punto 5.6, este modelo podría predecir con mayor precisión el comportamiento de las celdas. Como consecuencia de esto, se ha comenzado a investigar la modelación de estas utilizando cálculo fraccionario. Asimismo sería interesante generar una variación del modelo paramétrico pero utilizando derivadas fractales para predecir el comportamiento de las celdas.

6.4.3 Comportamiento térmico-químico

Resulta necesario un mayor entendimiento de los fenómenos internos de la celda para lograr entender esta rápida caída de temperatura que no es capaz de predecir el comportamiento tipo decaimiento exponencial. Puesto que este comportamiento es principalmente atribuido a fenómenos internos de la celda, resultaría ventajoso el entender estos comportamientos desde un punto de vista más químico para lograr entender las variables presentes en el problema y cómo influyen. Asimismo se podría corroborar esta hipótesis de que el comportamiento térmico fuera de lo normal está dado por procesos internos de la celda de tipo endotérmicos.

6.4.4 Potenciar el enfriamiento en los bordes de las celdas

S. J. Drake et al. [12] muestra en su publicación que la conductividad térmica de una celda es anisotrópica²⁰, teniendo en su caso particular una conducción dos órdenes de magnitud mayor en la dirección axial que en la radial. Puesto que los extremos de las celdas consisten en el 28,4% de la superficie total de la celda, resulta atractiva la idea de disipación de calor de la celda utilizando algún tipo de soporte que potencie la transferencia de calor por los extremos, por ejemplo un soporte que incluya un arreglo de aletas en la zona de contacto eléctrico y que utilice una pasta térmica que sea conductor eléctrico para evitar resistencia térmica de contacto, ver Figura 6-1 a modo de ejemplo. Asimismo potenciar la disipación por los extremos disminuiría los gradientes térmicos al interior de la celda, potenciando su vida útil.

²⁰ Por anisotrópica entiéndase que varía según la dirección, *e.g.* la conductividad en dirección axial es distinta a la radial.

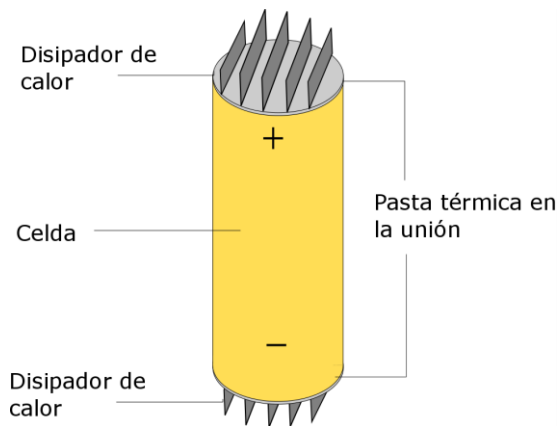


Figura 6-1: Bosquejo Conceptual de Soporte

Cabe mencionar que el diseño de un soporte de este tipo debe tomar en cuenta que en la zona en que se está trabajando es fácil generar cortocircuitos.

6.4.5 Modelo de convección idéntica en columnas

Se cree el coeficiente de convección h entre celdas de una misma columna no debería variar significativamente a lo largo del arreglo, lo anterior dado que el coeficiente de convección está dado por la difusión del aire y no por la diferencia de temperatura. Es decir, en la Figura 6-2, la celda 3 debe tener un coeficiente de convección h_3 similar a la celdas presentes en la misma columna (celdas: 8, 13, 18, y 23) y lo análogo debe suceder para las otras columnas.

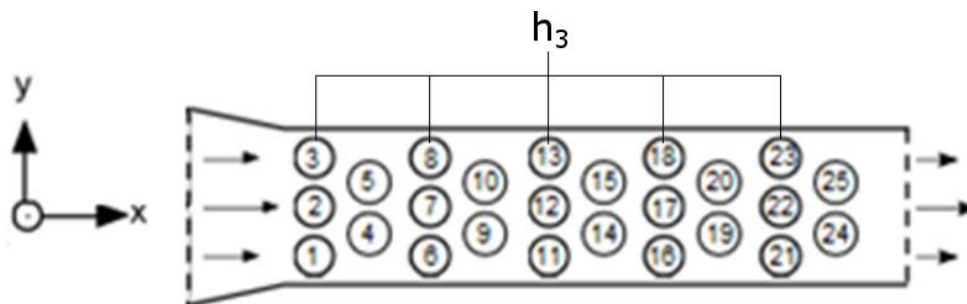


Figura 6-2: Disposición Escalonada

Dado esto, podría generarse un modelo que utilice un coeficiente de convección por columna y por medio de la potencia disipada estimar la temperatura del aire a lo largo del arreglo. Así podría utilizar la temperatura del aire que percibe cada celda para poder estimar la potencia disipada en calor y la temperatura de las celdas.

De todas maneras un modelo de este tipo debe generarse una vez solucionado el problema del no comportamiento tipo decaimiento exponencial, pero un modelo de este tipo tendría la ventaja de necesitar tan sólo un coeficiente de convección por columna ya que extrapolaría este coeficiente al resto de las celdas de cada columna.

6.4.6 Encontrar velocidad óptima de ventilación

Por medio de este experimento fue posible encontrar la pérdida de carga que produce el arreglo para distintas velocidades. Estos datos son útiles para encontrar la velocidad óptima a la que se debiese ventilar, según el criterio que se desee optimizar (eficiencia energética, vida útil, etc.)

6.4.7 Mejoras al arreglo experimental

A futuro sería positivo incorporar un mayor número de termocuplas al arreglo experimental. Fuera de esto, la mayor complicación que tiene el experimento es en cuanto a la medición del caudal. Se hace necesaria la utilización de un equipamiento estándar para la medición del caudal. Este equipamiento debe ser acoplado fácilmente al equipo y la velocidad del aire en dirección teta no debe influir en sus mediciones. Si bien el Flujometro AirFlow LCA 6000 logró ser suficiente, este se ve influenciado por las velocidades en dirección teta entregando datos menos certeros.

En cuanto a la conexión eléctrica de las celdas, a futuro podría evaluarse el generar una caja eléctrica a la cual se conecten los cables banana y por medio de esta caja generar el tipo de circuito requerido por el usuario. Lo anterior disminuiría los tiempos de configuración del arreglo experimental de manera significativa, pero más importante aún lograría que el experimento sea más seguro para el usuario y disminuiría la posibilidad de una conexión errónea por confusión del usuario.

Es importante destacar para futuras disposiciones de las celdas, que el túnel generado resultó ser 1 a 2 [mm] más alto que la altura de las celdas con los soportes. Esto facilitó la desconexión de las celdas durante el experimento, haciéndolo menos robusto a fallas. Para futuras disposiciones debe tratarse de evitar este error para así disminuir las desconexiones de celdas.

6.4.8 Otros

Para la futura implementación de nuevos arreglos de celdas, se recomienda que el proceso de generación de las piezas de acrílico se realice por medio de maquinado con CNC y no por medio de cortadora laser. Lo anterior puesto que el corte de laser genera superficies curvas que no pueden ser pegadas utilizando cloroformo.

7 Bibliografía

- [1] F. Smith, P. Castelletto M. Galleguillos, "Informe Interno," Centro de Energía, Santiago de Chile, Informe Interno 2013.
- [2] K.J. Tseng, Jiyun Zhao, Zhongbao Wei Tao Wang, "Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies," *Applied Energy*, vol. 134, no. 1, pp. 229--238, 2014.
- [3] Regan Dixon Hongguang Sun, "Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack," *Journal of Power Sources*, vol. 272, pp. 404--414, December 2014.
- [4] Y. Ye, A.A.O. Tay L.H. Saw, "Electro-thermal analysis and integration issues of lithium ion battery for electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 131, pp. 97--107, October 2014.
- [5] Fan He, Lin Ma Xuesong Li, "Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation," *Journal of Power Sources*, vol. 238, pp. 295--402, September 2013.
- [6] S.J. Drake, D.A. Wetz, J.K. Ostanek, S.P. Miller, J.M. Heinze, A. Jain K Shah, "An experimentally validated transient thermal model for cylindrical Li-ion cells," *Journal of Power Sources*, vol. 271, pp. 262--268, December 2014.
- [7] Xinghu Li, Lingjun Song, Liming Xiang Cong Zhu, "Development of a theoretically based thermal model for lithium ion battery pack," *Journal of Power Sources*, vol. 223, pp. 155--164, February 2013.
- [8] J.M. Khodadadi, A.A. Pesaran Liwu Fan, "A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 238, pp. 301-312, September 2013.
- [9] Jorge Reyes, "Modelamiento Térmico de Empaques de Baterías de Litio," Universidad de Chile, Santiago, Memoria 2012.
- [10] Jorge Reyes, "Informe Interno," Centro de Energía, Santiago, Informe Interno 2014.
- [11] S.J. Drake, D.A. Wetz, J.K. Ostanek, S.P. Miller, J.M. Heinzl, A. Jain K. Shah, "Modeling of steady-state convective cooling of cylindrical Li-ion cells," *Journal of Power Sources*, vol. 258, pp. 374--381, July 2014.
- [12] D.A. Wetz, J.K. Ostanek, S.P. Miller, J.M. Heinzl, A. Jain S.J. Drake, "Measurement of anisotropic thermophysical properties of cylindrical Li-ion cells," *Journal of Power Sources*, vol. 252, pp. 298--304, April 2014.
- [13] S. Schoeffert, "Thermal batteries modeling, self-discharge and self-heating," *Journal of*

Power Sources, vol. 142, no. 1-2, pp. 361--369, March 2005.

- [14] Hongguang Sun, Xiaodi Zhang, Dean Korosak Wen Chen, "Anomalous diffusion modeling by fractal and fractional derivatives," *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 59, no. 5, pp. 1754--1758, March 2010.

8 Anexos

A. Celda Ión-Litio ICR 26650

Battery Building Group

Web: www.batterybuilding.com

Email: market@batterybuilding.com

Tel: 0086-755-36936922

Fax: 0086-755-81470802

LITHIUM ION BATTERY SPECIFICATIONS

Type: 26650-4000mAh

Prepared:

Checked:

Approved:

Battery Building Group

Web:www.batterybuilding.com

Email: market@batterybuilding.com

Tel:0086-755-36936922

Fax:0086-755-81470802

1.Intention

The product specification is applied to the lithium ion battery of the above mentioned type for the Ningbo EAST Lithium ion battery co.,ltd, avoiding the errors from the different testing conditions and methods.

2.Battery Category and Type

2.1 category: Rechargeable lithium-ion battery

2.2 type : **26650-4000mAh**

3.Battery Group Specifications

No	Item	characteristics	comment
1	Capacity	4000mAh	Standard charge and discharge
2	Open circuit Voltage	3.70V	
3	Charge limit voltage	4.20±0.05V	Standard:4.20V
4	Charge cut-off current	0.01C ₅ A or 20mA	
5	End of Discharge voltage	2.75V	
6	Standard charge	After the battery charged at constant-current of 0.2C ₅ A to the charge limit voltage , then charge at constant-potential of 4.2V to the Charge cut-off current.	
7	Standard discharge	Discharged at 0.2C ₅ A to the end of discharge voltage	
8	The biggest constant Charge current	1C ₅ A	
9	The biggest constant Discharge current	2C ₅ A	
10	Operating temperature and Humidity	Charge:0-45℃, discharge:-20-60℃ below 85%RH	
11	Storage temperature and Humidity	Best:-20℃---30℃, lowerthan 45℃ below 85%RH	

Battery Building Group

Web:www.batterybuilding.com

Email: market@batterybuilding.com

Tel:0086-755-36936922

Fax:0086-755-81470802

12	Dimensions	$\Phi 26.2 \times 66.2 \pm 0.2$	Diameter and Height
13	Weight	About $95 \pm 3g$	

4. Appearance

No serious mechanical scratches, cracks, corrosion, deformation, leakage and other defects of cell surface had been found, and product identification were clear.

5.Characteristic

5.1 Electrical Performance

No	Item	Standard	Test method
1	Open-Circuit Voltage	$3.7 \pm 0.15V$	Voltmeter was used to test the battery with 50-60% charged
2	Initial resistant	$\leq 26m\Omega$	AC impedance 1kHz was used to test the battery with 50-60% charged
3	0.2C ₅ A discharge	$\geq 4000mAh$ The smoothness of charging and discharging curve	Under the temperature of $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ conditions. After standard charged, stand by 10min and then discharge at 0.2C ₅ A to the voltage of 3.0V. Charge/discharge cycle can be conducted for 3 times before meeting the Standards (the same below) .
4	Cycle life	800 times discharge capacity \geq initial capacity*80% ,	Testing the initial performance of battery. Under the temperature of $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ conditions.After standard charged, discharge at 0.2C ₅ A to the voltage of 3.0V, and charge at 0.2C ₅ A to the voltage of 4.2V,then at constant-potential charge to the Charge cut-off current, resting for 10min and begin the next charge and discharge cycles.
5	High temperature discharge	discharge capacity \geq initial capacity *85% No obvious outside damage, no leakage, no smoke, no explosion	Testing the initial performance of battery. After standard charged, then store it at $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ for 2 hours, under this condition, discharge at 0.2C ₅ A to the voltage of 3.0V, after store it at room temperature for 2 hours, then test the final performance of battery .
6	Low temperature discharge	discharge capacity \geq initial capacity *60% No obvious outside damage, no leakage, no smoke, no explosion	Testing the initial performance of battery, After standard charged, then store it at $-20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ for 16-24 hours, under this condition, discharge at 0.2C ₅ A to the voltage of 3.0V,after store it at room temperature for 2 hours, test the final performance of battery .
7	Normal Storage	Residual capacity \geq initial capacity *85% Recovery capacity \geq initial capacity *90%	Testing the initial performance of battery. Stored for 28 days after standard charge at temperature of $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, discharged at 0.2C ₅ A to the discharge cut-off voltage, then test the residual capacity, then the test of Recovery capacity is carried on.

Battery Building Group

Web:www.batterybuilding.com

Email: market@batterybuilding.com

Tel:0086-755-36936922

Fax:0086-755-81470802

5.2 Safety performance

No	Item	Standard	Test method
1	Thermal Shock Test	no burst and no fire in 30min	Put the fully-charged battery in oven, heating up at 3~7°C/min, starts to time after the temperature rises 130°C, keeping the temperature for 1h.
2	Short-Circuit Test	no burst and no fire	After charged the battery fully, use the wire to short-circuit (wire resistance will be extremely 30~50 hao Europe).
3	Overcharge Test	no burst and no fire	After discharged at 1C ₅ A to the 3.0V voltage, the battery was charged at 3C ₅ A to 4.8V, then at constant-potential of 4.2V to the Charge cut-off current. constant voltage for 8 hours.

5.3 Reliability performance

No	Item	Standard	Test method
1	High temperature Test	No the appearance and the electrical performance change	Put the fully-charged battery in the oven which keep constant temperature(90°C) for 2 hours
2	Low temperature Test	No the appearance and the electrical performance change	Put the fully-charged battery at at -20°C for 2 hours, then rest at room temperature for 2 hours
3	High temperature and humidity test	No the appearance and the electrical performance change	put the fully-charged battery at 45°C and constant relative humidity(90~95%) for 2 hours, then rest at room temperature for 2 hours
4	Vibration Test	No the appearance and the electrical performance change, no burst and no fire	After full charged, put the battery on the shake table, and vibrate for 0.5h as follows: frequency is 10-55Hz, amplitude is 1.6(p-p), each X \ Y \ Z positive and negative direction experiments 1 time respectively.
5	Drop Test	No the appearance and the electrical performance change, no burst and no fire	After the battery fully charged, drop from 1.9m to the 15mm hard plank on the floor, each positive and negative direction experiments 2 time respectively.

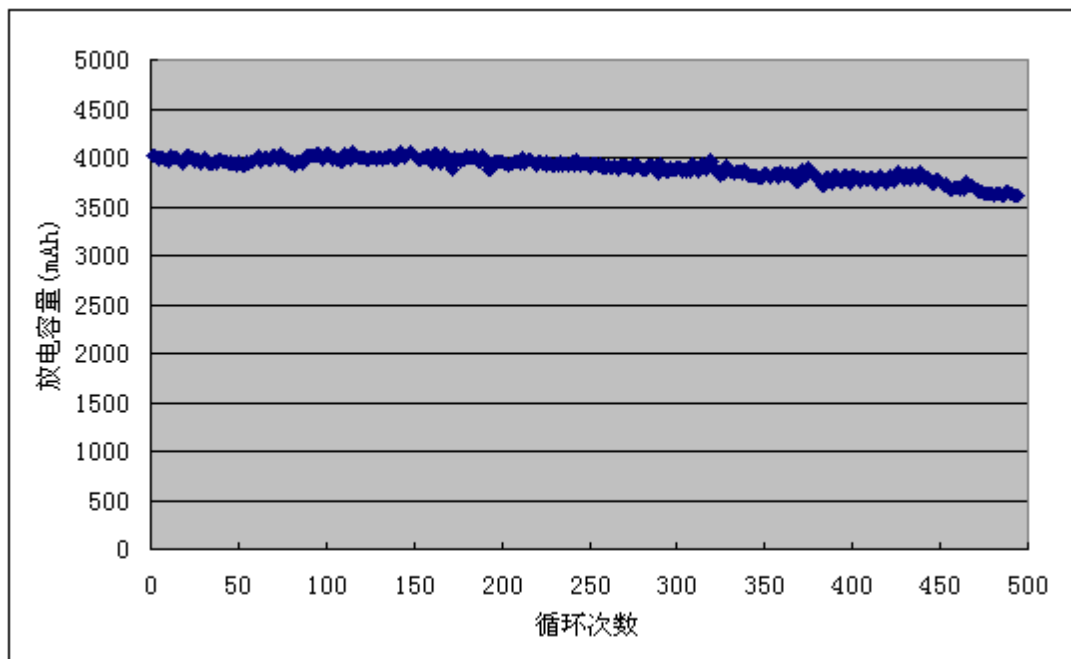
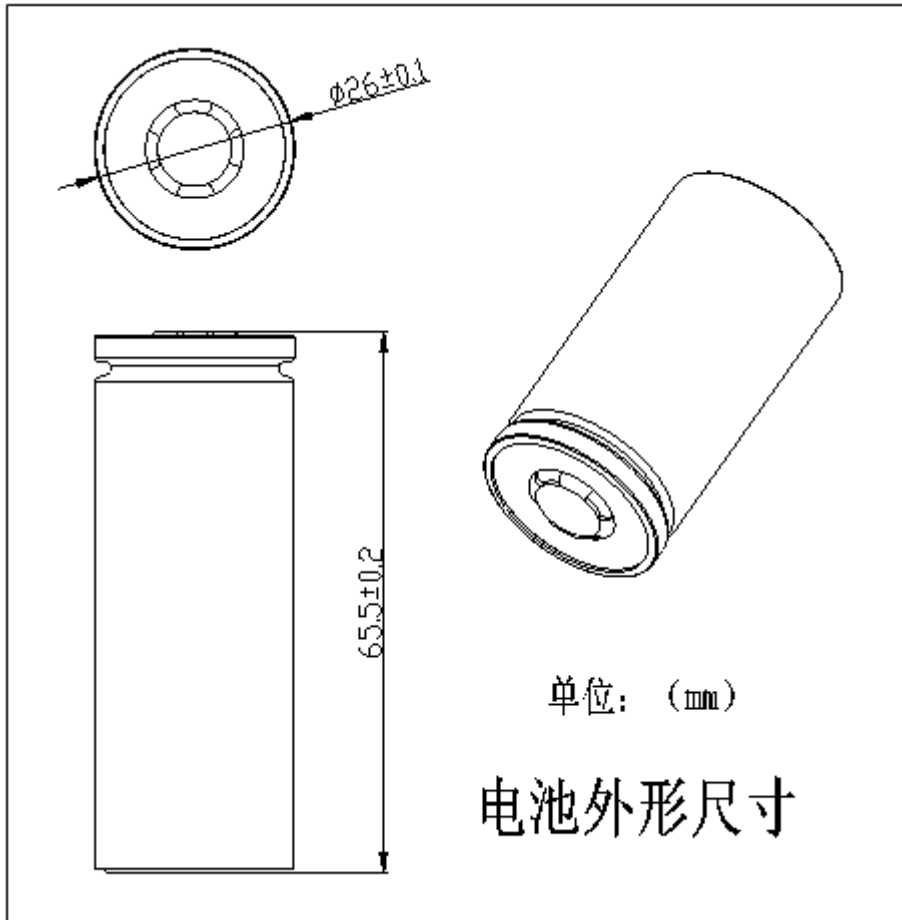
Battery Building Group

Web:www.batterybuilding.com

Email: market@batterybuilding.com

Tel:0086-755-36936922

Fax:0086-755-81470802



6. Standard testing environment

temperature: $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$, relative humidity: $45 \pm 20\%$ (unless other demand)

Battery Building Group

Web:www.batterybuilding.com

Email: market@batterybuilding.com

Tel:0086-755-36936922

Fax:0086-755-81470802

7. Protection function

When the lithium ion battery working voltage and the current higher than the permission voltage and current, the electrolyte will possibly decompose, which would affect the batter safety performance. if the voltage is lower than 1.0V, and the performance will be worsen. the protective device and protect line board must be provided to prevent the battery to appear sufficiently, has put with the overflow phenomenon.

8. Letter of responsibility

The consumer must observe the Ningbo East Lithium-ion battery Limited company standards document and the document following annotation use battery strictly, because misuse will cause the battery overheated, or have the fire and the detonation, regarding the accident caused by not observe the standards document the, we are not responsible for it.

9. Attentions before charging

Connect up the charger before connect up the battery pack

10. Packing instruction

The instruction must as follows

! Dangerous

- * Do use the specified charger and observe charging requirement.
- * Use the battery only in designated equipment.
- * Do not heat the battery or throw the battery into fires.
- * Do not leave behind the battery in nearby the fire hazard either the temperature surpass 60°C, also do not carry on the charge in these environment.
- * Do not invest the battery in the water, also do not get wet.
- * Do not put the battery with the necklace, the hair clip, the coin or the bolt and so on the metal goods , also do not store up together the battery with the above goods.
- * Do not use the metallic conductor to short-circuit the battery positive and negative extremely.
- * When loading the equipment, pays attention to the battery positive and negative not to instead install extremely.
- * Do not use the sharp goods to pierce the battery.
- * Do not carry on the decomposition to the battery.
- * Do not use the serious scar or the distortion battery.
- * Before using the barrery, please detail reading operating manual, not the suitable operation possibly cause the battery get hot, catches fire, the detonation, the destruction or the battery capacity weaken.

! Caution

- * Do not discard the battery in a heater, washing-machine or pressure vessel.
- * If the battery gives off generates heat, strange odor, becomes discolored or deformed, or in any way appear abnormal during use, charging or storage, immediately remove it and stop using it.
- *If the battery leaks and the electrolyte to the skin or clothing, immediately wash with water.
- * If the battery electrolyte gets into the eyes, do not rub the eyes, instead, rinse the eyes with clean water, and immediately seek medical attention.

! Attention

Battery Building Group

Web: www.batterybuilding.com

Email: market@batterybuilding.com

Tel: 0086-755-36936922

Fax: 0086-755-81470802

- * Before using the battery, you should read the specifications, usage instruction and some attentions carefully to learn its application method and areas.
- * Before charging the battery, you should read the specifications.
- * Before putting the battery in the instrument or taking off, you should read the specifications carefully.
- * If the battery's working time is much less than usual, please go to maintenance or replacement the battery.
- * When you don't use the battery, please take off and store it at low temperature and low humidity environment.
- * Do not charge use and store the battery in a location where static electricity and magnetic field is great,
- * In case the battery terminals are dirty, please clean the terminals with a dry cloth before use.
- * The temperature of the battery in use can not be exceeded the following requirements:
 - charging temperature: 0°C to 45°C
 - discharging temperature : -20°C to 60°C

The end

B. Ventilador 4412 FNH

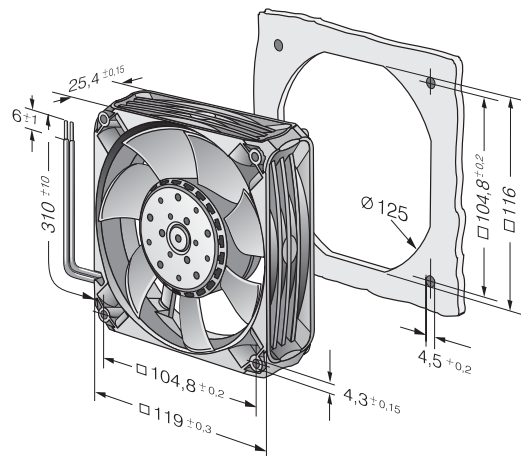
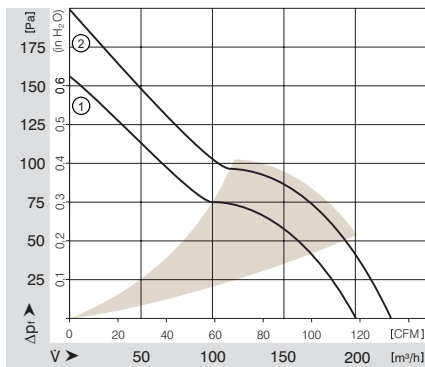
DC Axial Fans

Series 4400 FN 119 x 119 x 25 mm

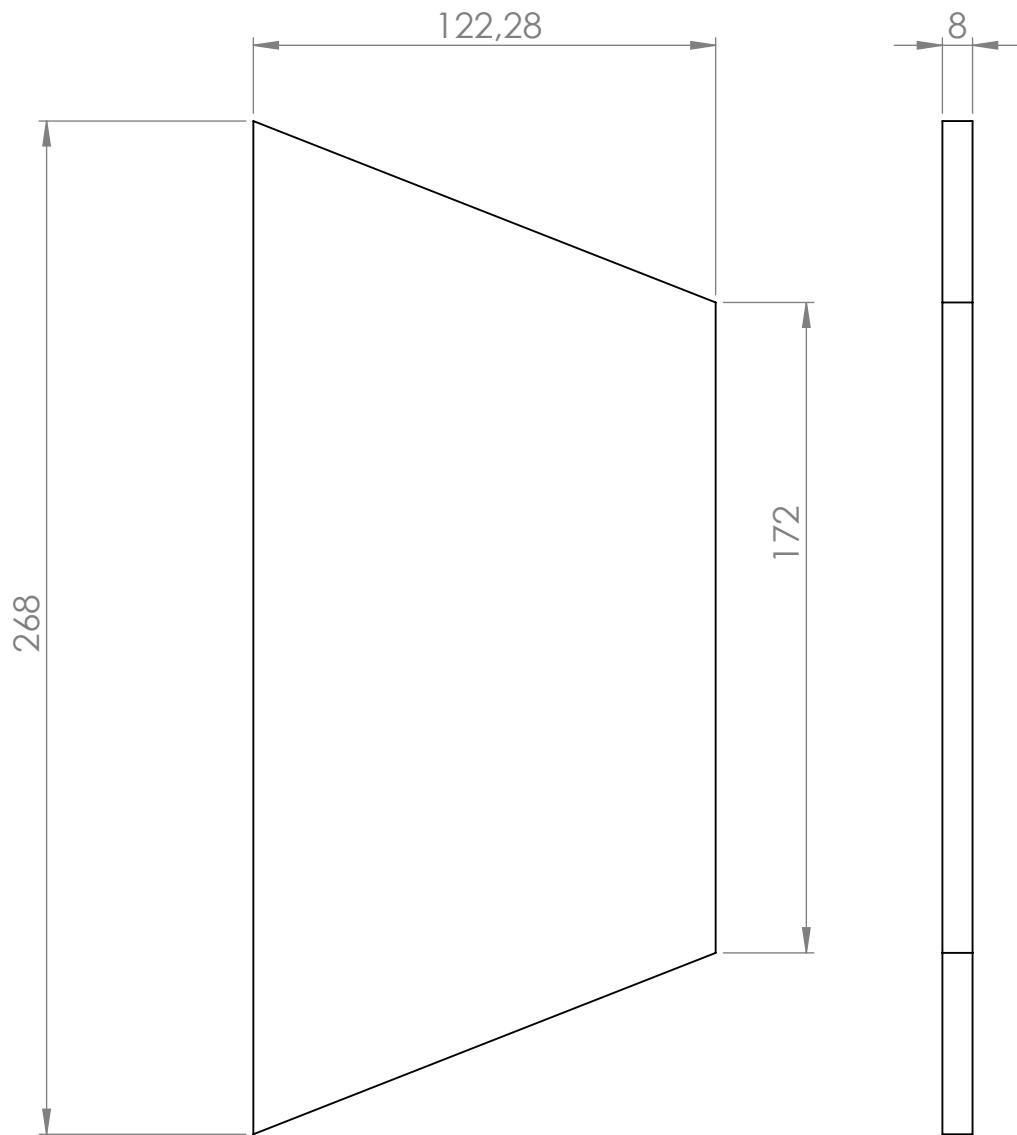


- DC fans with electronically commutated external rotor motor. Fully integrated commutation electronics.
- Innovative impeller design with winglets.
- Compact design with high power density.
- With electronic protection against reverse polarity and blocking.
- Fan of fibreglass reinforced plastic. PBTP housing, PA impeller.
- Air exhaust over struts. Rotational direction CCW looking at rotor.
- Electrical connection via 2 leads AWG 22, TR 64. Stripped and tinned ends.
- Mass 240 g.

Nominal Data	Air Flow		Nominal Voltage	Voltage Range	Noise		Sinter-Sleeve Bearings Ball Bearings	Power Input	Nominal Speed	Temperature Range	Service Life L_{10}		Curve	Specials
	m ³ /h	CFM			V DC	V DC					dB(A)	Bel		
4412 FNH	225	132.4	12	7...13.2	55	6.7	■	12.0	5 400	-20...+70	60 000 / 30 000	2		
4414 FNN	200	117.7	24	14...28	52	6.5	■	8.5	4 850	-20...+70	60 000 / 30 000	1		
4414 FNH	225	132.4	24	18...26.4	55	6.7	■	12.0	5 400	-20...+70	60 000 / 30 000	2		
4418 FNH	225	132.4	48	36...53	55	6.7	■	12.0	5 400	-20...+70	60 000 / 30 000	2		



C. Planos Arreglo Experimental



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.	Francisco Moser				
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.				MATERIAL:	
				Acrílico	
				PESO:	

TÍTULO:

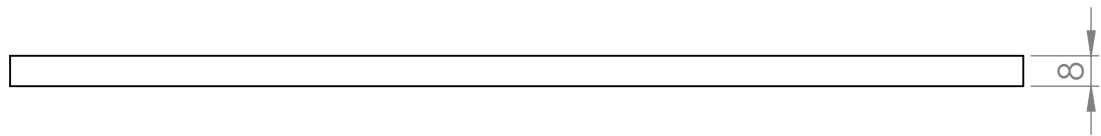
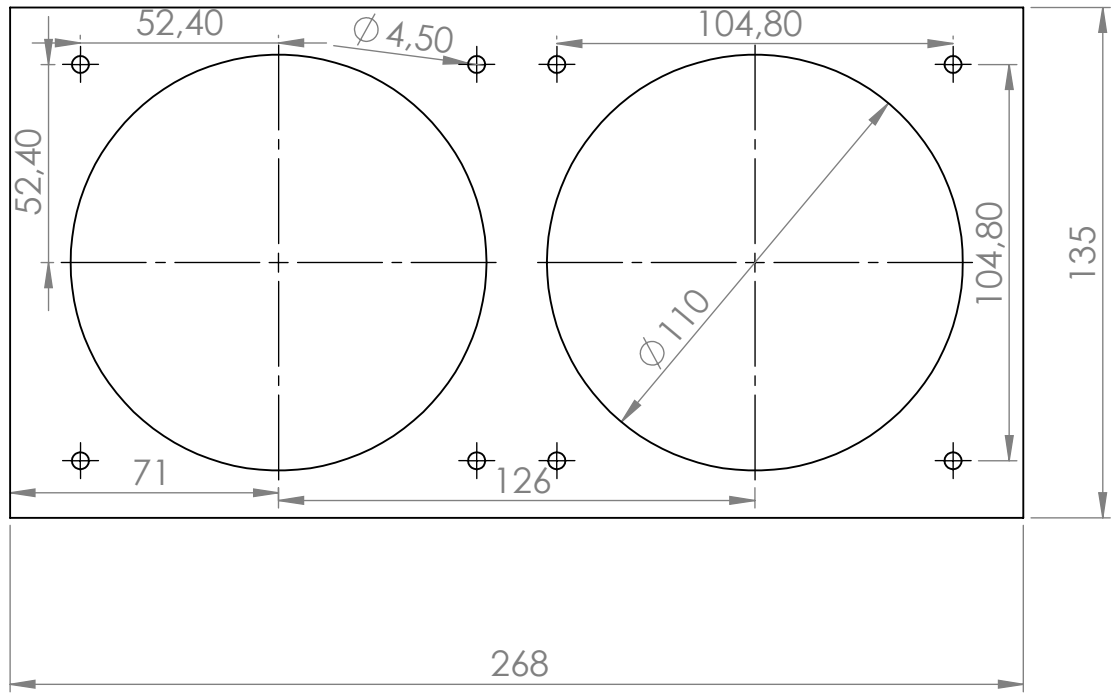
Adaptador Base-Techo

N.º DE DIBUJO

A4

ESCALA:1:2

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.	Francisco Moser			
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CAUID.				
				MATERIAL: Acrílico
				PESO:

TÍTULO:

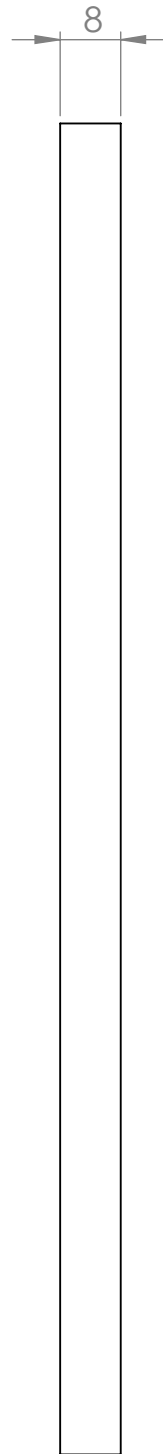
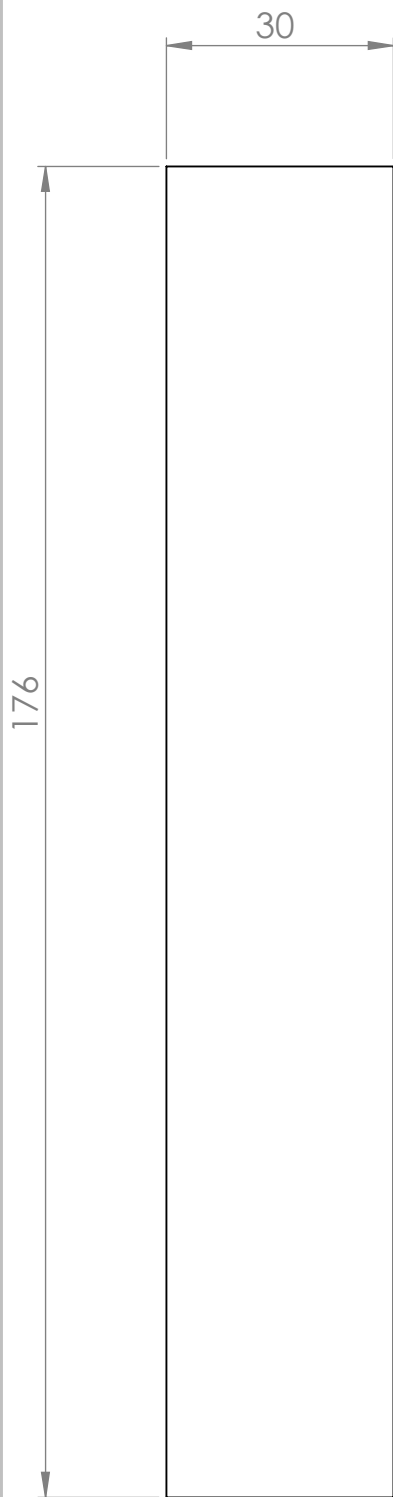
Adaptador Cara Vent.

N.º DE DIBUJO

A4

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.	Francisco Moser				
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.				MATERIAL:	
				Acrílico	
				PESO:	

TÍTULO:

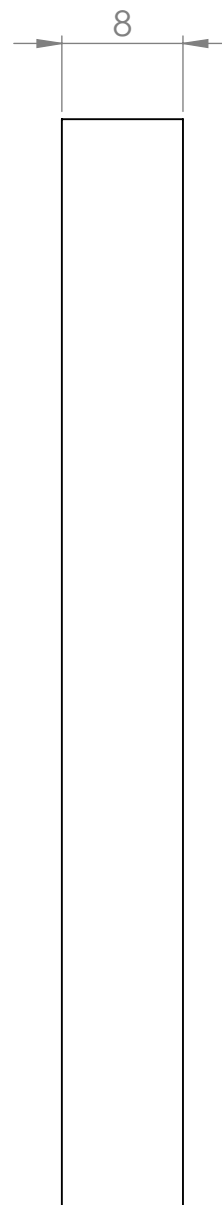
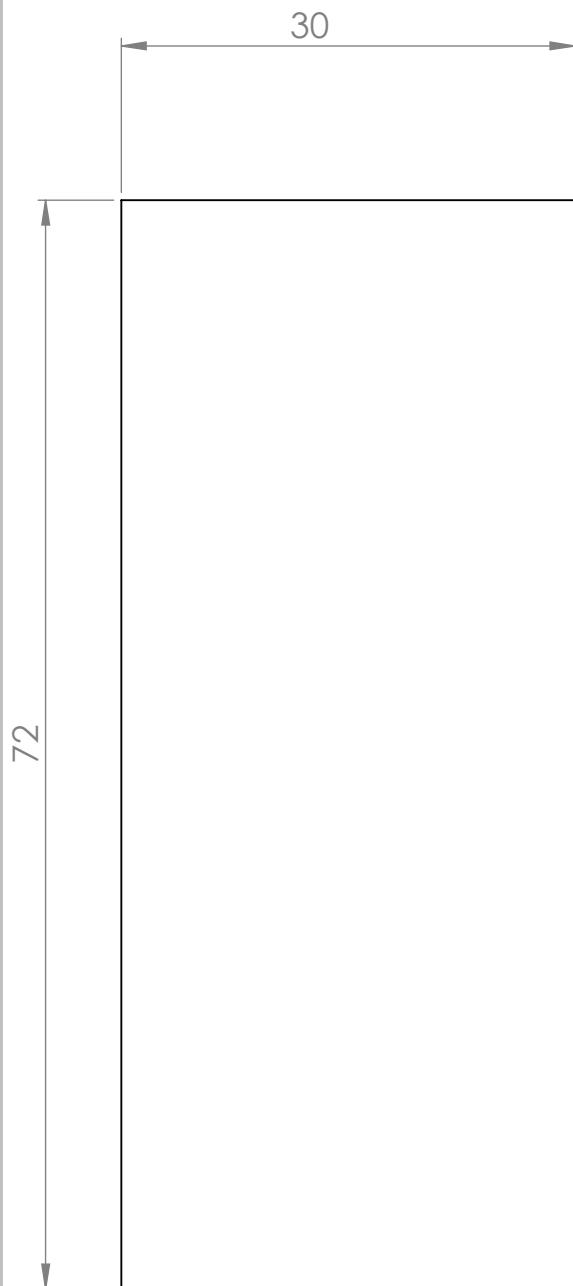
Adaptador Marco Base-Techo

N.º DE DIBUJO

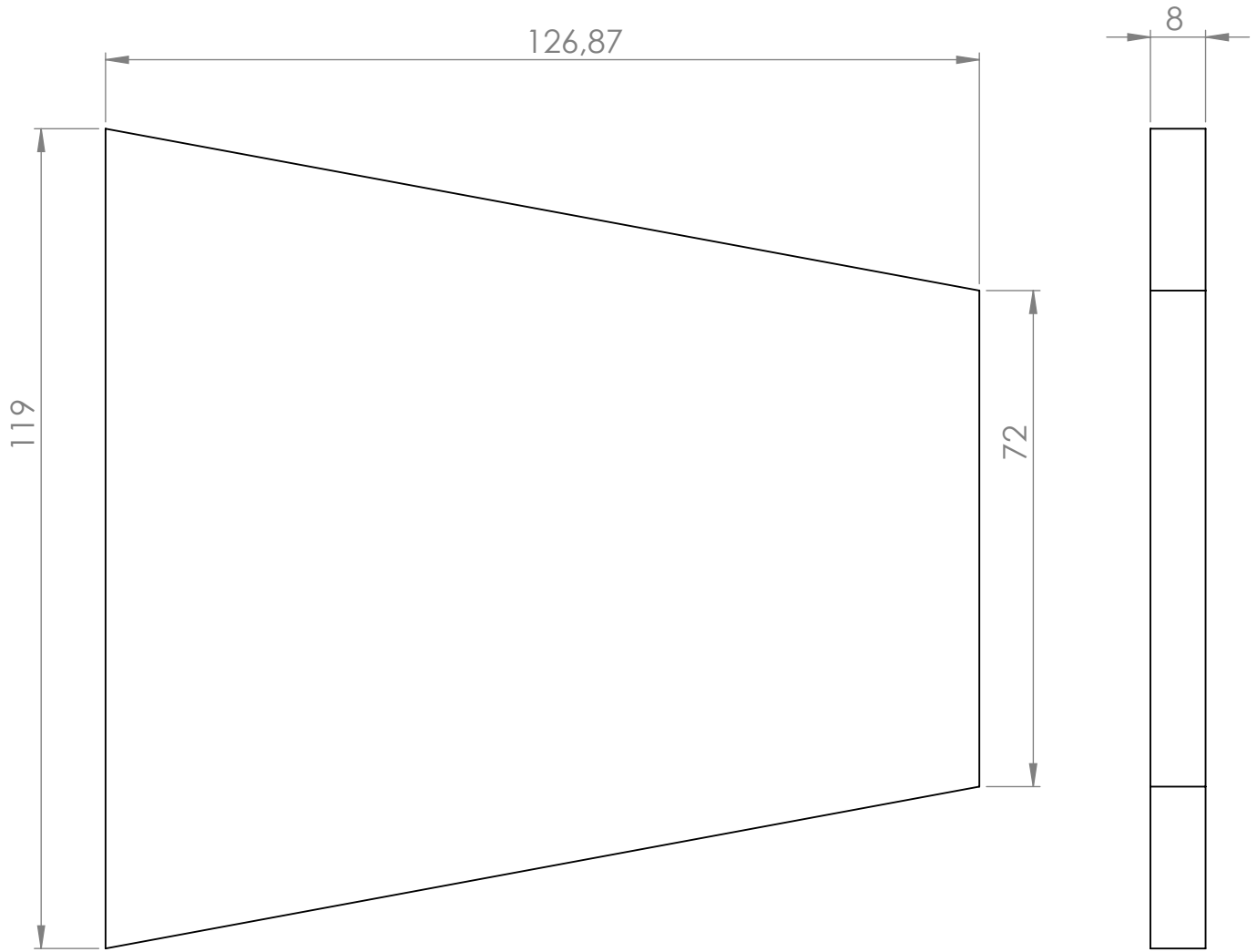
A4

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ. Francisco Moser						Adaptador Marco Pared			
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CAUID.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
				Acrílico					
				PESO:		ESCALA:2:1		HOJA 1 DE 1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

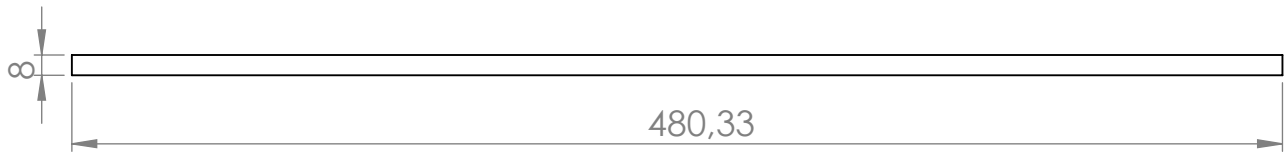
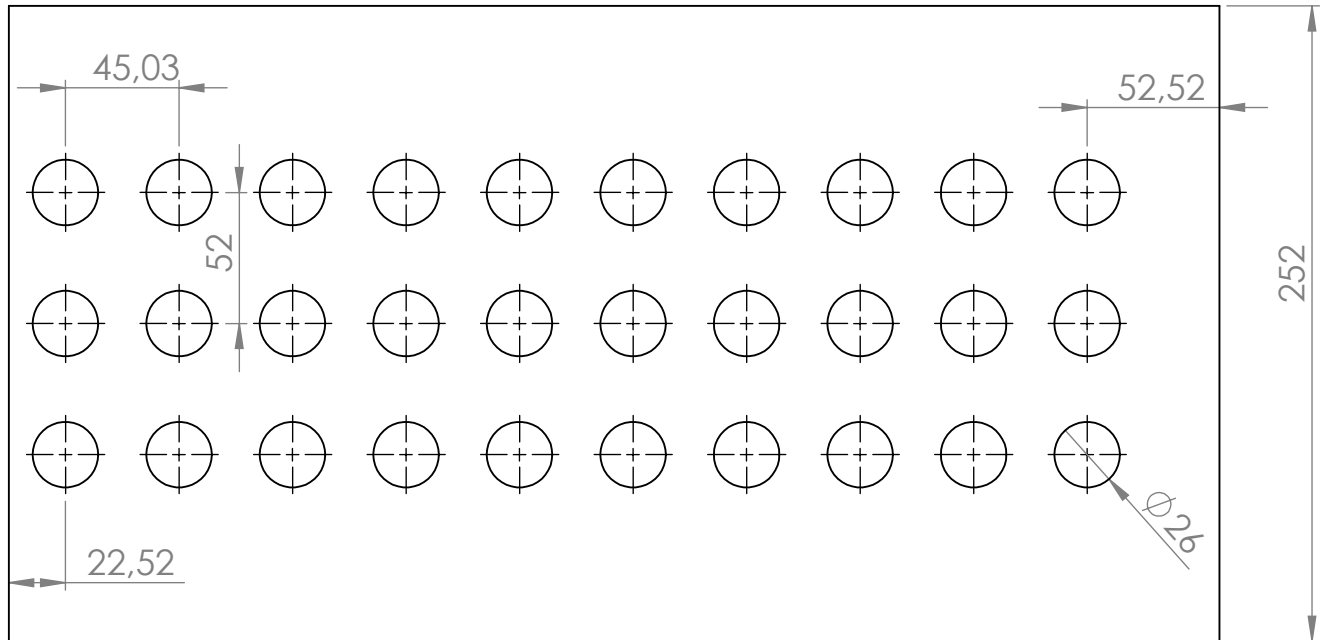
REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.	Francisco Moser				
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.				MATERIAL:	
				Acrílico	
				PESO:	

TÍTULO:	
<h1>Adaptador Pared</h1>	
N.º DE DIBUJO	A4
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.	Francisco Moser				
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.				MATERIAL:	
				Acrílico	
				PESO:	

TÍTULO:

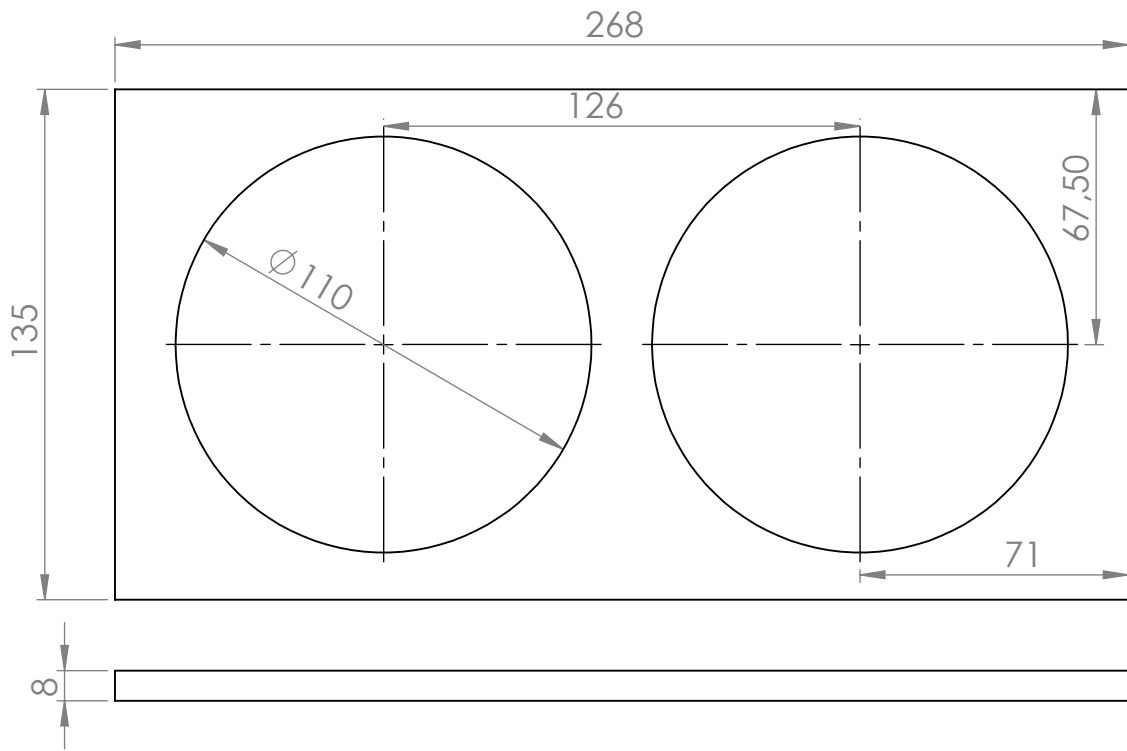
Base Tunel 2a Disposición

N.º DE DIBUJO

A4

ESCALA:1:3

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

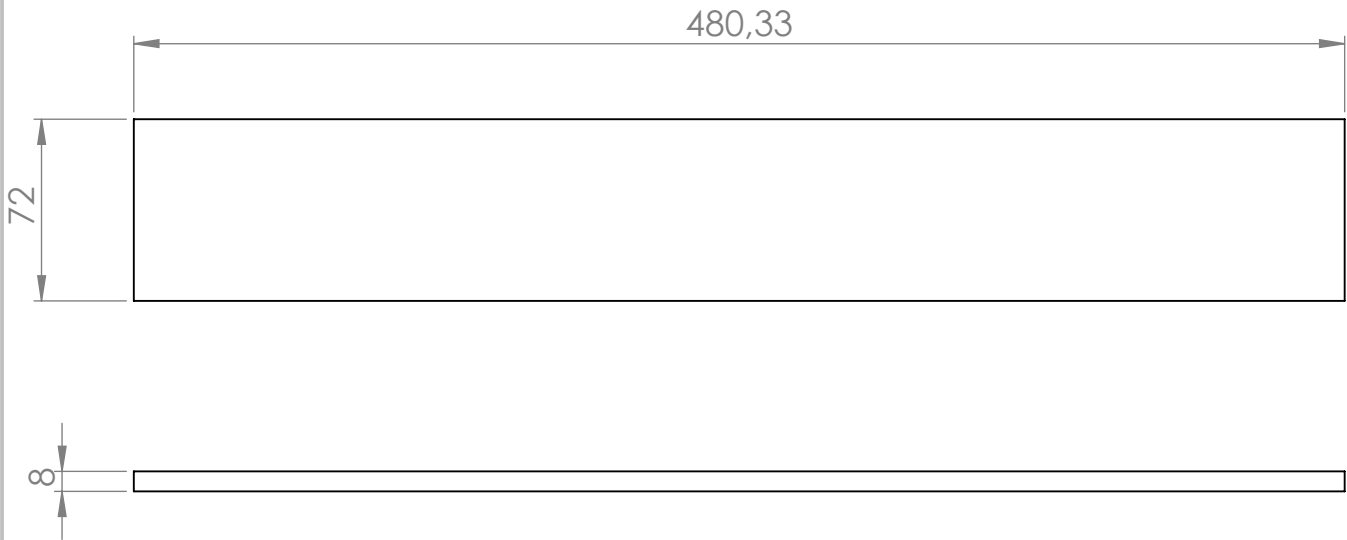
REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

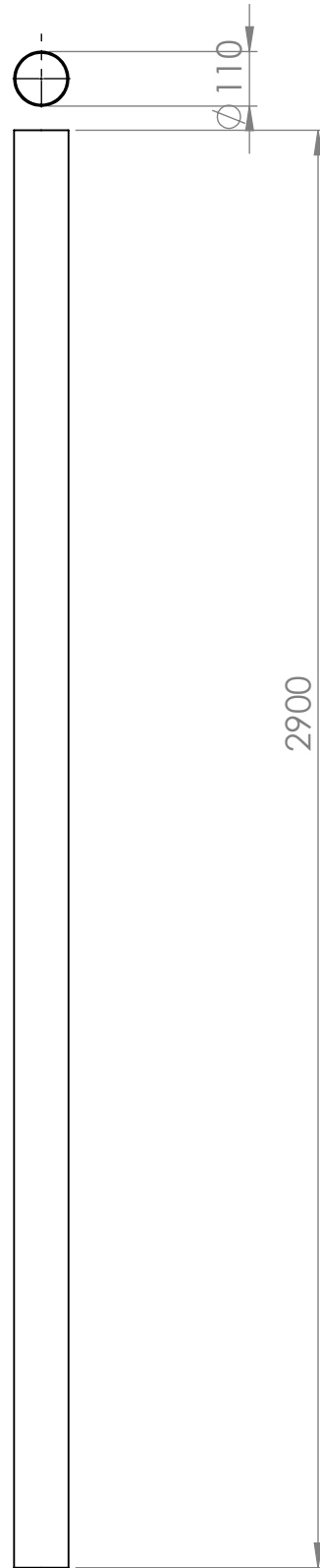
REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.	Francisco Moser				
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.				MATERIAL:	
				Acrílico	
				PESO:	

TÍTULO:		<h1>Conector Tubos</h1>	
N.º DE DIBUJO			
ESCALA: 1:2		HOJA 1 DE 1	
		A4	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.		Francisco Moser				Pared Tunel			
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CAUID.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
				Acrílico					
				PESO:		ESCALA:1:3		HOJA 1 DE 1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.	Francisco Moser				
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.				MATERIAL:	
				PVC	
				PESO:	

TÍTULO:

tubo 110mm

N.º DE DIBUJO

A4

ESCALA:1:15

HOJA 1 DE 1

D. Construcción y Calibración

1. Construcción de la estructura

El proceso de construcción del arreglo experimental se puede desglosar en dos partes principales:

- i. Construcción de la estructura del arreglo: Esto comprende toda la estructura que se puede apreciar en la Figura 3-14.
- ii. Generación de los soportes de las celdas: Para facilitar el manejo de las celdas se decide crear soportes que faciliten la conexión eléctrica de estas.

1.1. Construcción de la estructura del arreglo

Por razones que ya se explicaron previamente, se decide realizar el arreglo experimental en su totalidad en acrílico, exceptuando las tuberías que son de PVC. Para lo anterior se procede a comprar una plancha de acrílico de 1240x1840 [mm] de 8 [mm] de espesor.

Posteriormente se genera un plano de corte en AutoCAD 2015, ver Figura 7-1, el cual fue enviado a una cortadora laser.^{21 22}

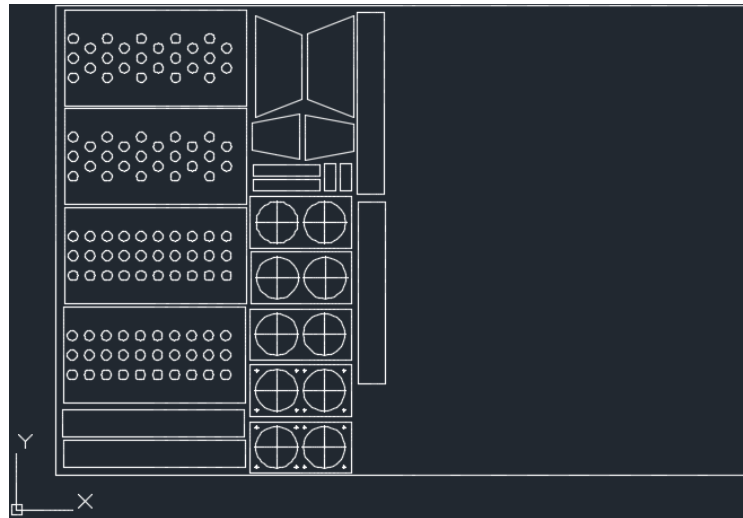


Figura 7-1: Plano de Corte de Acrílico

Finalmente las partes fueron maquinadas en los casos en que fue requerido y pegadas con cloroformo, ver Figura 7-2.

²¹ Los restos de la plancha serán utilizados a futuro para generar otras disposiciones de celdas, para futuras investigaciones.

²² Cabe destacar que en futuros trabajos se recomienda el uso de corte por maquinado, puesto que el corte por láser no genera un corte recto, lo que hace difícil el posterior pegado utilizando cloroformo.



Figura 7-2: Piezas Maquinadas y Pegadas

La tapa superior del túnel se une a éste por medio de pernos mariposas, de manera similar a lo que se ve en la Figura 3-5, y el túnel en sí se acopla al adaptador por medio de uniones chapa cangrejo, ver Figura 7-3, la cual hace más fácil el cambio de arreglos de celdas, *i.e.* disposiciones de celdas.



Figura 7-3: Chapa Cangrejo

En la Figura 7-4 se puede observar la estructura del arreglo experimental terminada. Cabe destacar que finalmente se cambió la posición de los ventiladores y se dispusieron al comienzo de los tubos de perfilamiento. Lo anterior puesto que resultaba difícil simular una condición de borde de ventilador en Ansys debido a que en la realidad no se conocía ni la distribución de velocidades del ventilador, ni de cuanto era la componente en el eje $\hat{\theta}$ de la velocidad. Dado esto se decidió que, si bien al tomar esta medida se distanciaba el experimento de la práctica, la ganancia en capacidad de simulación era mucho más beneficiosa. Asimismo esto evitará la generación de puntos ciegos en las primeras filas de celdas.

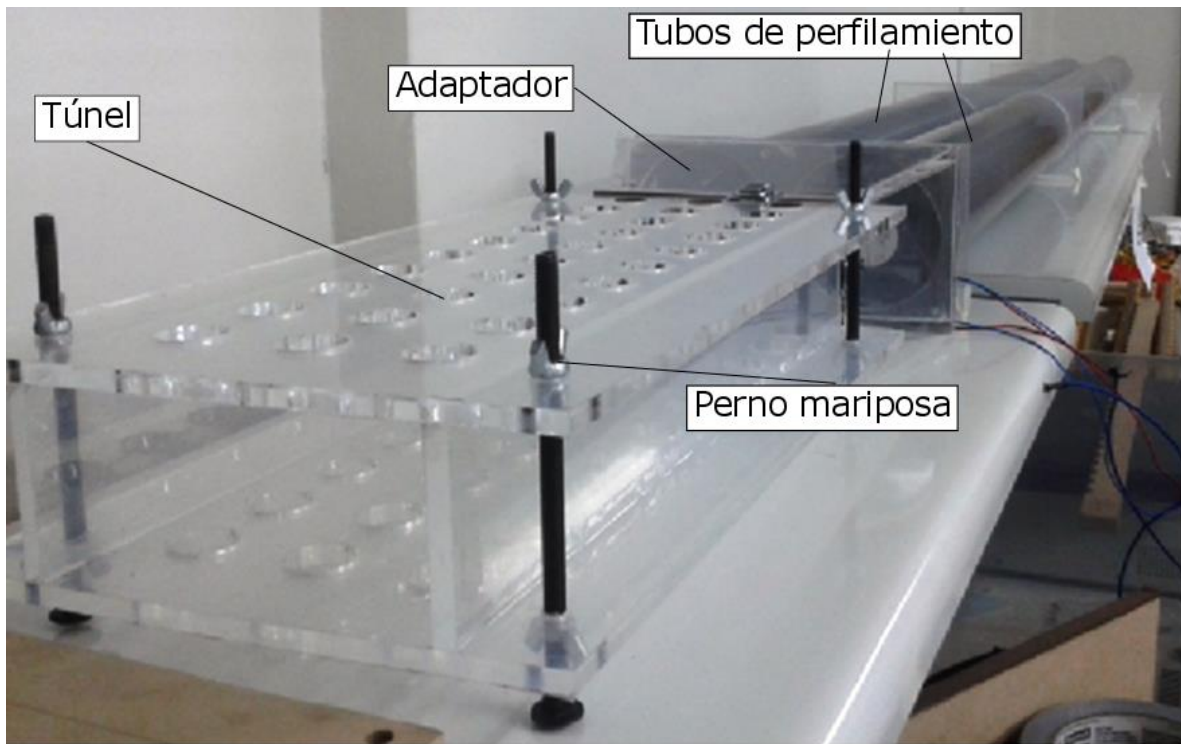


Figura 7-4: Estructura Arreglo Experimental

1.2. Generación de los soportes de las celdas

Como se explicó anteriormente, el proceso de generación de soportes se hizo por medio de colada. Para esto se imprime un *master*²³, pieza a duplicar, con el cual se generarán moldes en silicona, ver Figura 7-5. Una vez generados los moldes, se proceden a llenar con resina MEPUR hasta generar 60 soportes.



Figura 7-5: Molde de silicona y su respectivo *master*

A continuación en la Figura 7-6 se puede ver un soporte generado y el mecanismo que asegura el contacto eléctrico integrado.

²³ La impresión del master se realizó utilizando impresora 3D.



Figura 7-6: Soporte generado en MEPUR

Una de las principales características de este mecanismo, es que mientras la parte posterior del soporte no esté en contacto con la tuerca, se puede estar seguro de que hay contacto eléctrico, en la Figura 7-7 se ve un soporte con contacto eléctrico.

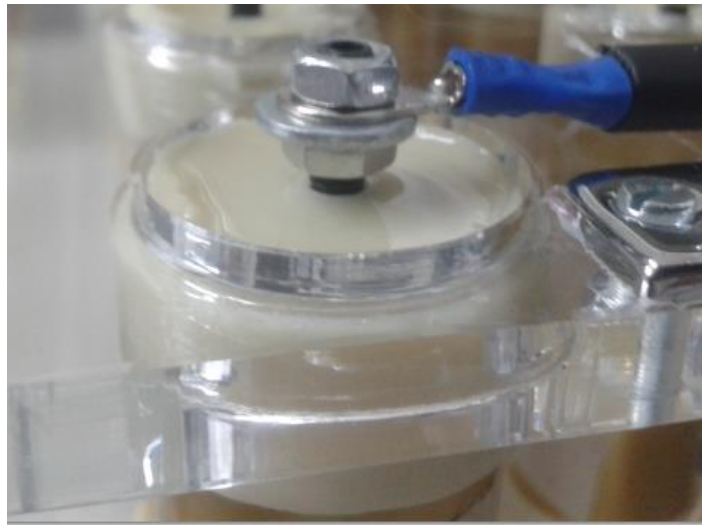


Figura 7-7: Implementación del Soporte

2. Armado y calibración del experimento

2.1. Ensamble arreglo de celdas:

El ensamble del arreglo de celdas es un proceso bastante simple. Sin embargo para hacerlo de manera eficiente y correcta, se presenta la siguiente metodología.

En primera instancia se posicionan los soportes inferiores con sus respectivos cables bananas conectados. Por convención se utilizan los cables bananas negros abajo, los cuales representan la conexión al lado negativo de las celdas²⁴, asimismo todos los cables bananas negros deben tener sus protectores eléctricos durante todo momento en la instalación y experimentación²⁵, ver Figura 7-8.



Figura 7-8: Implementación de Protector Eléctrico

Una vez realizado lo anterior se procede a instalar las celdas²⁶ que tengan una termocupla asociada, como se puede ver en la Figura 7-9. El proceso de pegado de la termocupla se explicará más adelante en un punto aparte.

²⁴ Esta convención resulta relevante, puesto que es fácil equivocarse al conectar las celdas entre sí. Dado esto, mientras más repetitivo sea el proceso, menor va a ser la posibilidad de una falla.

²⁵ Por medio de esta medida se disminuyen los riesgos de generación de un corto circuito durante el experimento. Por convención se aplica para los bananas negros, pero lo relevante es que todos los bananas positivos o todos los negativos tengan sus protectores eléctricos.

²⁶ Todas las celdas deben estar de antemano etiquetadas con su número asociado a la posición y, si corresponde, el proyecto que facilitó la celda, *e.g.* “Celda 1, EOBLi”. Esta etiqueta debe utilizar el menor espacio posible y tener las mismas dimensiones para todas las celdas, de manera de no afectar su comportamiento.



Figura 7-9: Pegado de Termocuplas a Celdas

Posterior a esto se procede a instalar el resto de las celdas. En la Figura 7-10 se pueden ver las celdas instaladas, asimismo se puede apreciar que están todas etiquetadas y con el polo positivo hacia arriba.

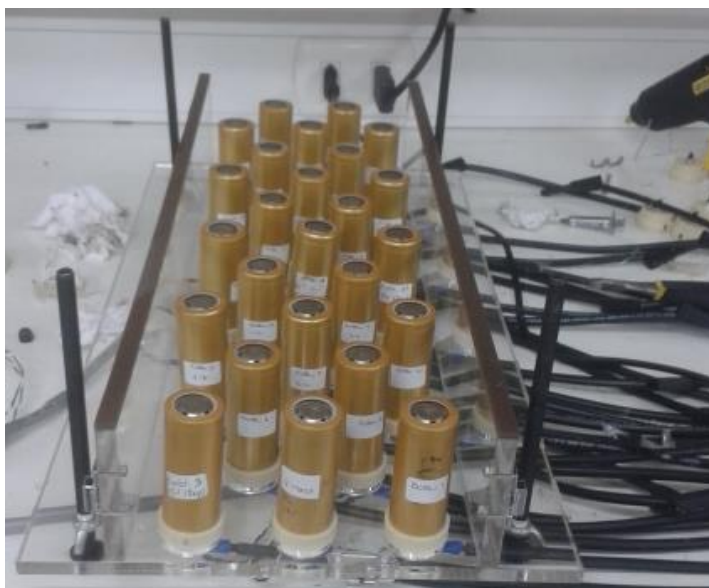


Figura 7-10: Celdas Instaladas

Una vez realizado lo anterior, se procede a acoplar los soportes a las cabezas de las celdas²⁷, ver Figura 7-11.

²⁷ Esta vez los soportes deben ser instalados sin sus cables bananas asociados, ya que de lo contrario es muy probable que falle alguno al instalarse, rompiéndose o deformándose.



Figura 7-11: Celdas instaladas con sus soportes

Posterior a esto se instala la tapa superior del túnel y se procede a instalar los cables bananas rojos, ver Figura 7-12.



Figura 7-12: Cables bananas instalados

Para terminar, se procede a conectar los conectores banana según el circuito que se amerite²⁸. Como medida de precaución se recomienda asegurar la unión por medio de alguna cinta adhesiva, ver Figura 7-13.

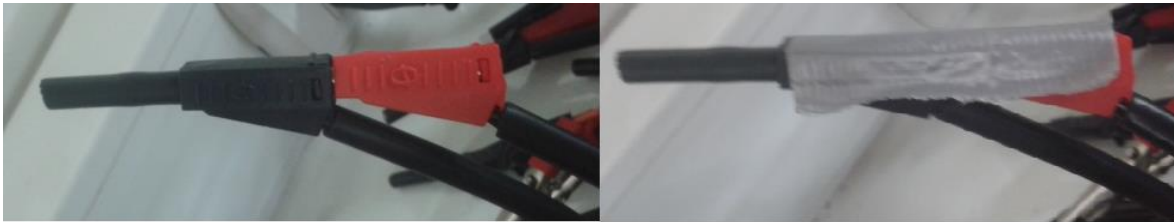


Figura 7-13: Aplicando Cinta Adhesiva

2.2. Instalación y Armado de los soportes:

Los soportes constan de 5 piezas, dos tuercas, un resorte, el prisionero y la estructura de resina, ver Figura 7-14.

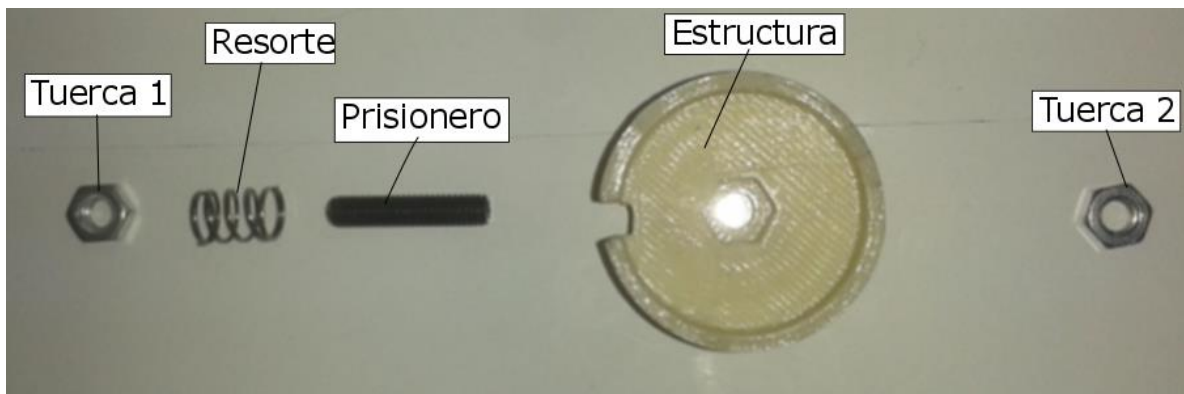


Figura 7-14: Vista Explosionada Soporte

Para armarlo, primero se une el prisionero con la tuerca y se posiciona el resorte, ver Figura 7-15.

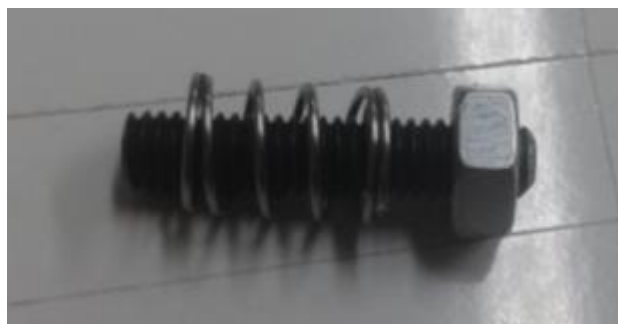


Figura 7-15: Prisionero con Tuerca y Resorte

Posteriormente se posiciona en el soporte y se instala la tuerca trasera, ver Figura 7-16.

²⁸ Puesto que los conectores bananas negros tienen los protectores, siempre se conectarán los bananas rojos detrás de los negros y no viceversa.



Figura 7-16: Posicionando Prisionero e instalando la Tuerca

Finalmente se conecta el cable utilizando una golilla y una contratuerca, ver Figura 7-17.

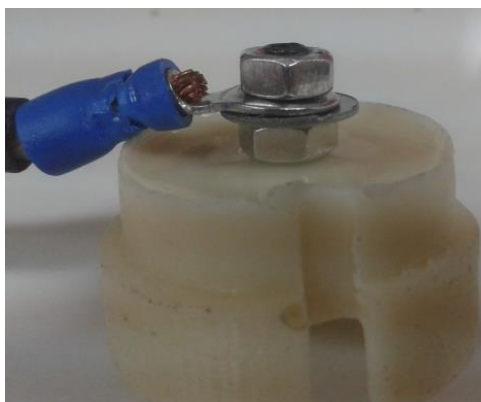


Figura 7-17: Conexión con Terminal Ojo

Si el ensamble se hizo correctamente, al acoplarlo a la celda debería producirse una separación entre las tuercas y la cara posterior de la estructura de resina. A continuación se puede ver en la Figura 7-18 la diferencia entre una conexión eléctrica correcta e incorrecta.

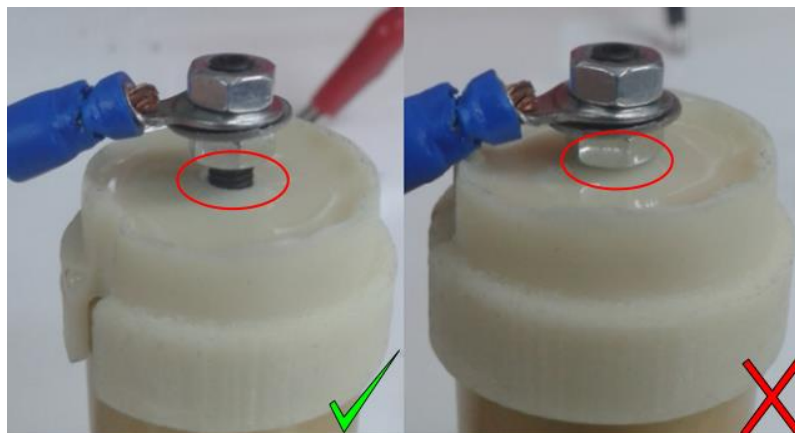


Figura 7-18: Conexión correcta (Der), conexión incorrecta (Izq)

2.3. Soportes problemáticos:

En el caso de que un soporte no esté generando un correcto contacto eléctrico, debido a que éste se desenchaja, se propone la siguiente forma de corregir el problema, sin la necesidad de desarmar el arreglo y cambiar el soporte.

Se presiona el soporte para generar un correcto contacto eléctrico (observar que la tuerca no toque la parte posterior del soporte). Manteniendo presionado el soporte se procede a aplicar pegamento termofusible en el contorno del soporte, asegurándose de que este se adhiera al soporte y al acrílico. Una vez realizado lo anterior, se espera a que enfríe y finalmente se deja de realizar presión, ver Figura 7-19.

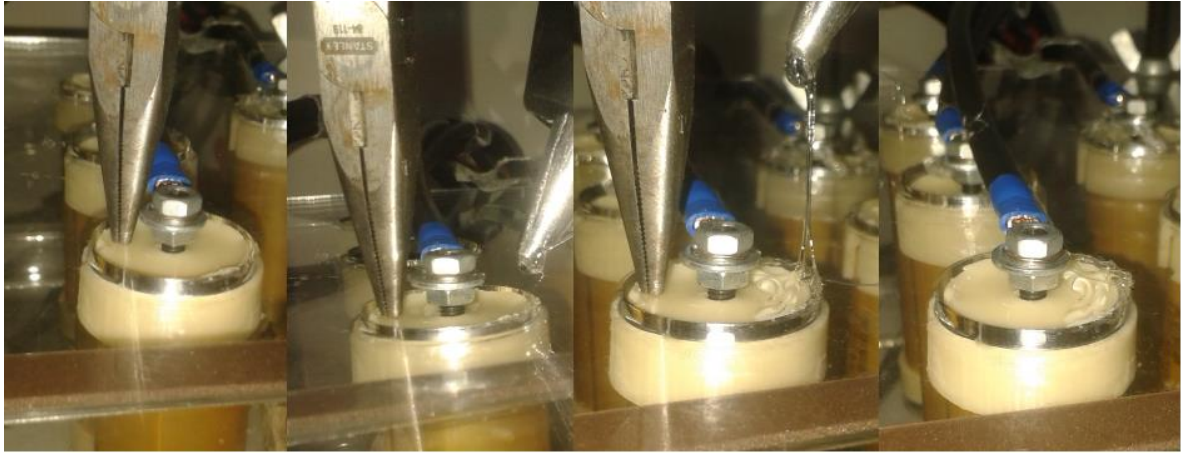


Figura 7-19: Arreglo de soportes problemáticos

2.4. Instalación de las termocuplas:

La instalación de las termocuplas es un proceso relevante dentro de la implementación del arreglo experimental, puesto que la calidad de las mediciones depende en gran parte de este proceso. Como consecuencia del diseño de la termocupla, esta recibe ruido proveniente del calor transferido del cableado a la termocupla. Dado esto, se recomienda que el cableado aledaño a la termocupla esté a la misma temperatura que la superficie a medir, ver anexo Datasheet Termocuplas.

Como consecuencia de lo anterior se decide pegar la termocupla utilizando una pistola de pegamento termofusible, ver Figura 7-20. Se elige esta tecnología, puesto que el pegamento tiene buena adhesión a la celda, pero es posible retirarlo sin dañar la misma. Asimismo el pegamento presenta una baja conductividad térmica, haciéndolo idóneo para la aplicación.



Figura 7-20: Pistola de pegamento termofusible

Para asegurar una buena lectura de la temperatura de la celda, se decide implementar pasta térmica *Artic Silver 5* en el contacto entre termocupla y celda para mejorar la conducción de calor, puesto que los intersticios de aire funcionan como aislantes.

El procedimiento de instalación de la termocupla es el siguiente:

1. Se dispone de la termocupla a utilizar. Se recomienda que la zona del cableado sea cubierta con *maskingtape* puesto que esta permite el posterior retiro de los restos de pegamento, cuando se retira la termocupla, ver Figura 7-21.

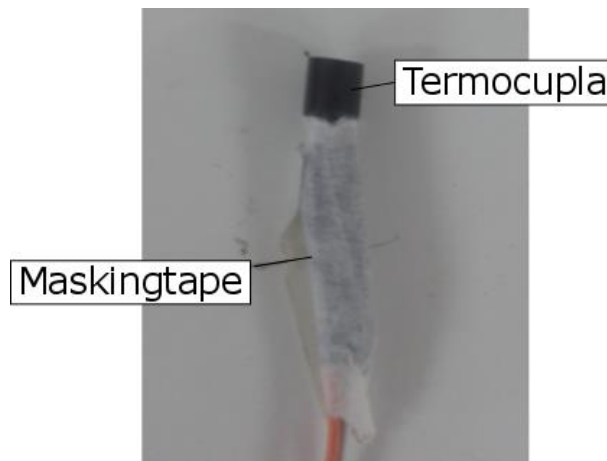


Figura 7-21: Termocupla con *maskingtape*

2. Se posiciona la termocupla en el arreglo, se le aplica pasta térmica en la zona de contacto y se aplica un trazo de cinta adhesiva en la parte posterior, ver Figura 7-22.

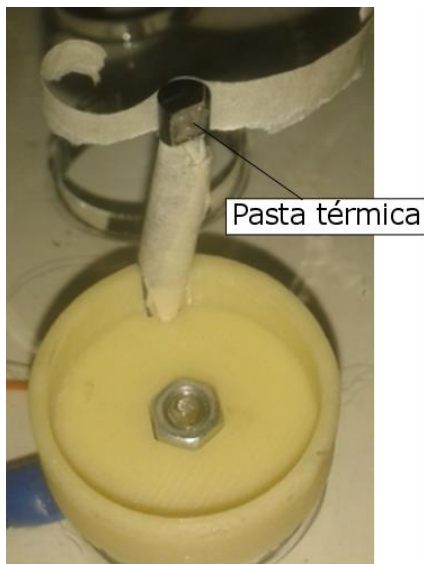


Figura 7-22: Termocupla lista para instalar

3. Una vez realizado lo anterior, se pega la termocupla utilizando la cinta adhesiva y se utiliza la pistola de pegamento termofusible para pegar la parte superior de la termocupla, ver Figura 7-23.

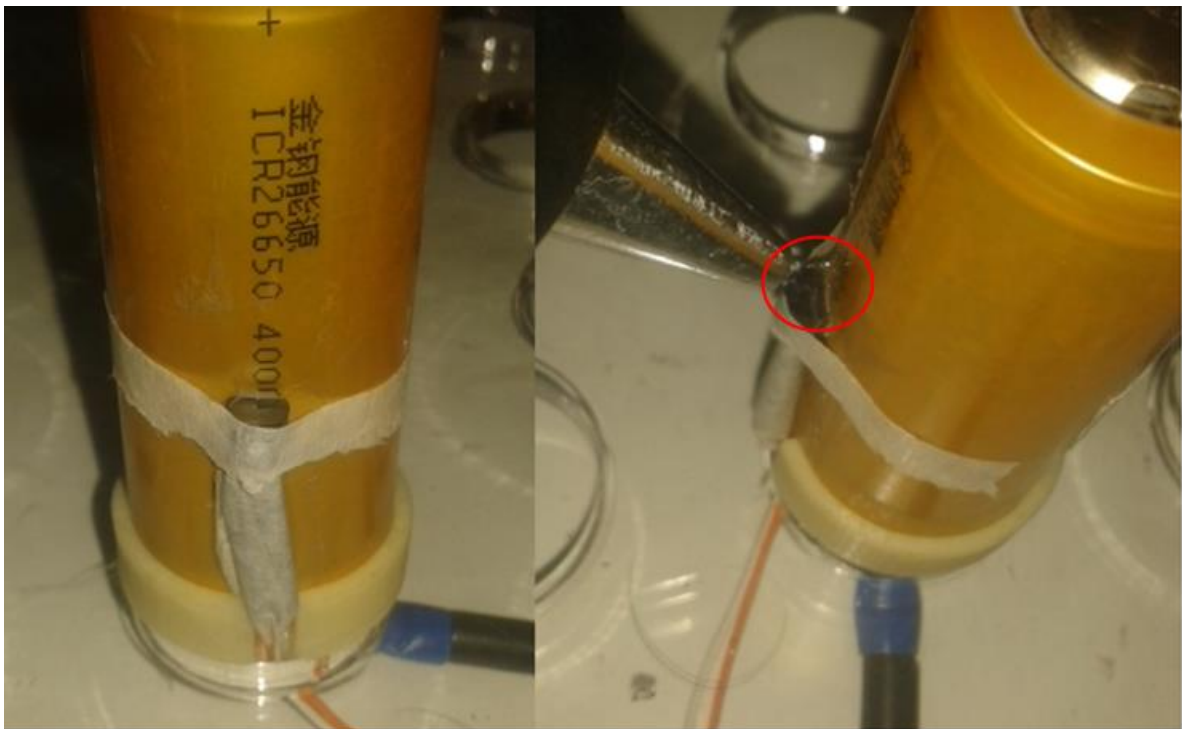


Figura 7-23: Pegado preliminar de termocupla

4. Se aplica silicona para pegar y aislar el resto de la termocupla, exceptuando la zona que se pegó con cinta adhesiva, ver Figura 7-24.



Figura 7-24: Pegado de termocupla

5. Para finalizar, se retira la cinta adhesiva y se aplica pegamento en la zona posterior de la termocupla, ver Figura 7-25: Pegado termocupla.

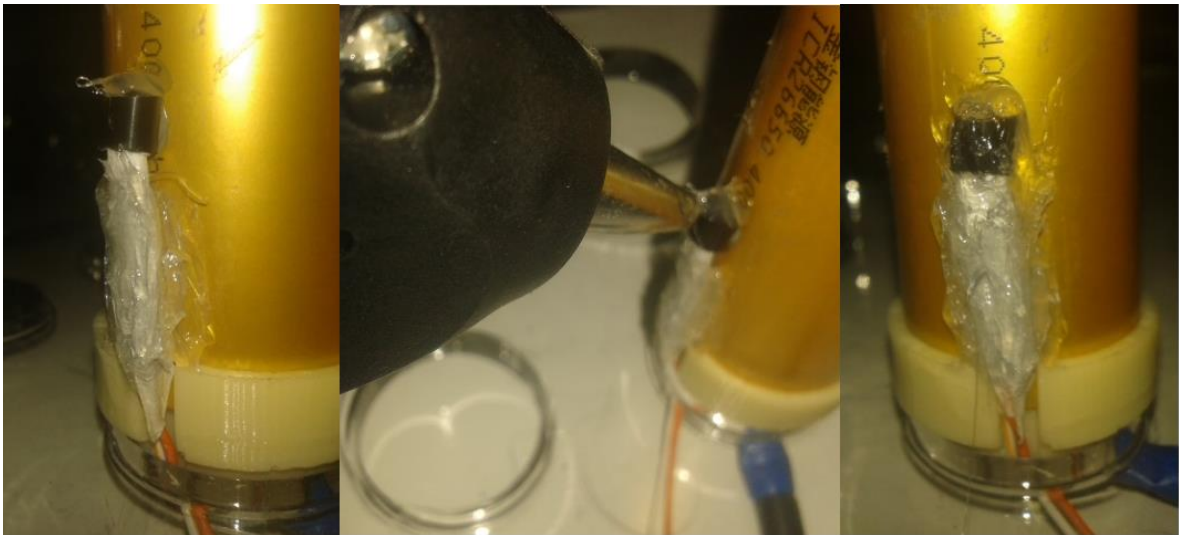


Figura 7-25: Pegado termocupla

E. Datasheet Termocuplas

LM135/LM235/LM335, LM135A/LM235A/LM335A

Precision Temperature Sensors

General Description

The LM135 series are precision, easily-calibrated, integrated circuit temperature sensors. Operating as a 2-terminal zener, the LM135 has a breakdown voltage directly proportional to absolute temperature at +10 mV/°K. With less than 1Ω dynamic impedance the device operates over a current range of 400 μA to 5 mA with virtually no change in performance. When calibrated at 25°C the LM135 has typically less than 1°C error over a 100°C temperature range. Unlike other sensors the LM135 has a linear output.

Applications for the LM135 include almost any type of temperature sensing over a -55°C to +150°C temperature range. The low impedance and linear output make interfacing to readout or control circuitry especially easy.

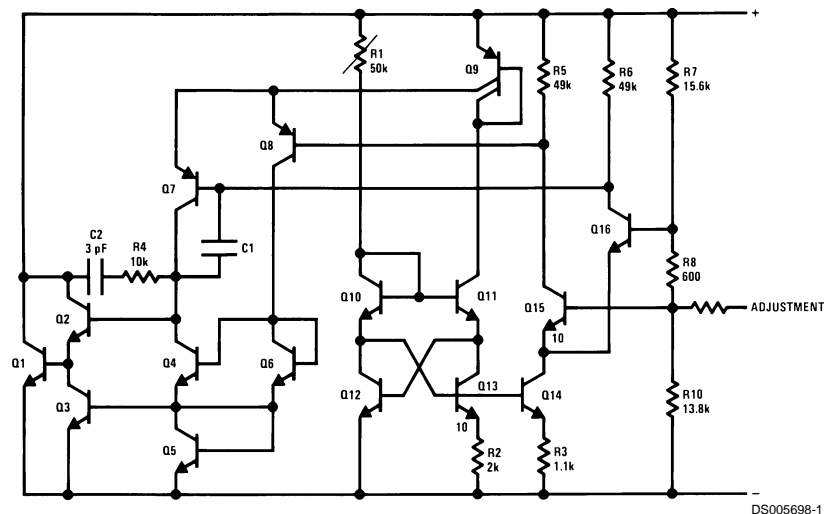
The LM135 operates over a -55°C to +150°C temperature range while the LM235 operates over a -40°C to +125°C

temperature range. The LM335 operates from -40°C to +100°C. The LM135/LM235/LM335 are available packaged in hermetic TO-46 transistor packages while the LM335 is also available in plastic TO-92 packages.

Features

- Directly calibrated in °Kelvin
- 1°C initial accuracy available
- Operates from 400 μA to 5 mA
- Less than 1Ω dynamic impedance
- Easily calibrated
- Wide operating temperature range
- 200°C overrange
- Low cost

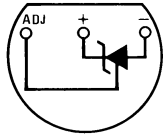
Schematic Diagram



DS005698-1

Connection Diagrams

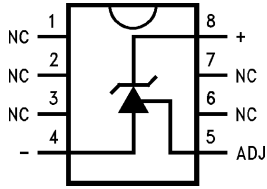
TO-92
Plastic Package



DS005698-8

Bottom View
Order Number LM335Z
or LM335AZ
See NS Package
Number Z03A

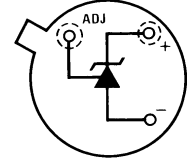
SO-8
Surface Mount Package



DS005698-25

Order Number LM335M
See NS Package
Number M08A

TO-46
Metal Can Package*



DS005698-26

*Case is connected to negative pin

Bottom View
Order Number LM135H,
LM135H-MIL, LM235H,
LM335H, LM135AH,
LM235AH or LM335AH
See NS Package
Number H03H

Absolute Maximum Ratings (Note 4)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Reverse Current	15 mA
Forward Current	10 mA
Storage Temperature	
TO-46 Package	-60°C to +180°C
TO-92 Package	-60°C to +150°C
SO-8 Package	-65°C to +150°C

Specified Operating Temp. Range

	Continuous	Intermittent (Note 2)
LM135, LM135A	-55°C to +150°C	150°C to 200°C
LM235, LM235A	-40°C to +125°C	125°C to 150°C
LM335, LM335A	-40°C to +100°C	100°C to 125°C
Lead Temp. (Soldering, 10 seconds)		
TO-92 Package:		260°C
TO-46 Package:		300°C
SO-8 Package:		300°C
Vapor Phase (60 seconds):		215°C
Infrared (15 seconds):		220°C

Temperature Accuracy (Note 1)

LM135/LM235, LM135A/LM235A

Parameter	Conditions	LM135A/LM235A			LM135/LM235			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Operating Output Voltage	$T_C = 25^\circ\text{C}$, $I_R = 1\text{ mA}$	2.97	2.98	2.99	2.95	2.98	3.01	V
Uncalibrated Temperature Error	$T_C = 25^\circ\text{C}$, $I_R = 1\text{ mA}$		0.5	1		1	3	°C
Uncalibrated Temperature Error	$T_{\text{MIN}} \leq T_C \leq T_{\text{MAX}}$, $I_R = 1\text{ mA}$		1.3	2.7		2	5	°C
Temperature Error with 25°C Calibration	$T_{\text{MIN}} \leq T_C \leq T_{\text{MAX}}$, $I_R = 1\text{ mA}$		0.3	1		0.5	1.5	°C
Calibrated Error at Extended Temperatures	$T_C = T_{\text{MAX}}$ (Intermittent)		2			2		°C
Non-Linearity	$I_R = 1\text{ mA}$		0.3	0.5		0.3	1	°C

Temperature Accuracy (Note 1)

LM335, LM335A

Parameter	Conditions	LM335A			LM335			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Operating Output Voltage	$T_C = 25^\circ\text{C}$, $I_R = 1\text{ mA}$	2.95	2.98	3.01	2.92	2.98	3.04	V
Uncalibrated Temperature Error	$T_C = 25^\circ\text{C}$, $I_R = 1\text{ mA}$		1	3		2	6	°C
Uncalibrated Temperature Error	$T_{\text{MIN}} \leq T_C \leq T_{\text{MAX}}$, $I_R = 1\text{ mA}$		2	5		4	9	°C
Temperature Error with 25°C Calibration	$T_{\text{MIN}} \leq T_C \leq T_{\text{MAX}}$, $I_R = 1\text{ mA}$		0.5	1		1	2	°C
Calibrated Error at Extended Temperatures	$T_C = T_{\text{MAX}}$ (Intermittent)		2			2		°C
Non-Linearity	$I_R = 1\text{ mA}$		0.3	1.5		0.3	1.5	°C

Electrical Characteristics (Note 1)

Parameter	Conditions	LM135/LM235 LM135A/LM235A			LM335 LM335A			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Operating Output Voltage Change with Current	$400\ \mu\text{A} \leq I_R \leq 5\text{ mA}$ At Constant Temperature		2.5	10		3	14	mV
Dynamic Impedance	$I_R = 1\text{ mA}$		0.5			0.6		Ω
Output Voltage Temperature Coefficient			+10			+10		mV/°C
Time Constant	Still Air		80			80		sec
	100 ft/Min Air		10			10		sec
	Stirred Oil		1			1		sec
Time Stability	$T_C = 125^\circ\text{C}$		0.2			0.2		°C/khr

Electrical Characteristics (Note 1) (Continued)

Note 1: Accuracy measurements are made in a well-stirred oil bath. For other conditions, self heating must be considered.

Note 2: Continuous operation at these temperatures for 10,000 hours for H package and 5,000 hours for Z package may decrease life expectancy of the device.

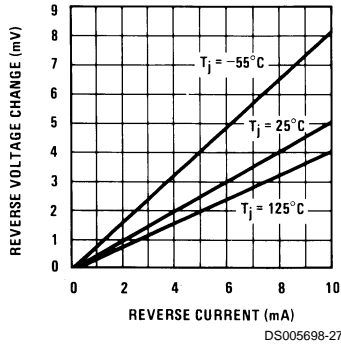
Note 3:

Thermal Resistance	TO-92	TO-46	SO-8
θ_{JA} (junction to ambient)	202°C/W	400°C/W	165°C/W
θ_{JC} (junction to case)	170°C/W	N/A	N/A

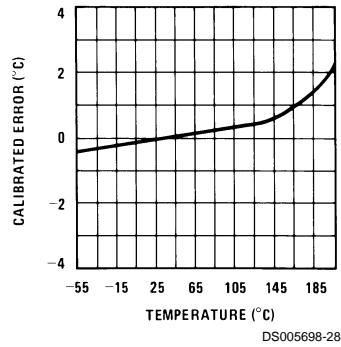
Note 4: Refer to RETS135H for military specifications.

Typical Performance Characteristics

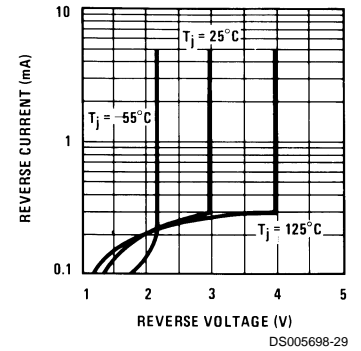
Reverse Voltage Change



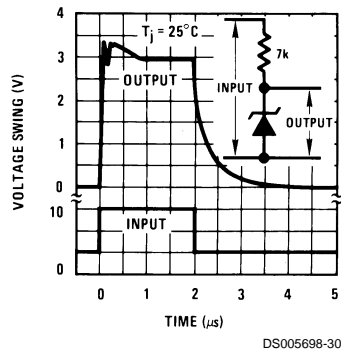
Calibrated Error



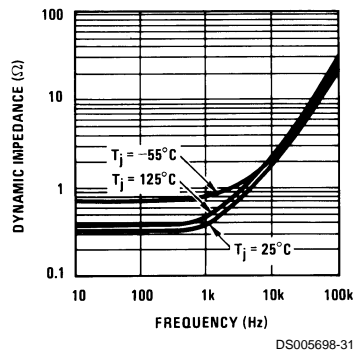
Reverse Characteristics



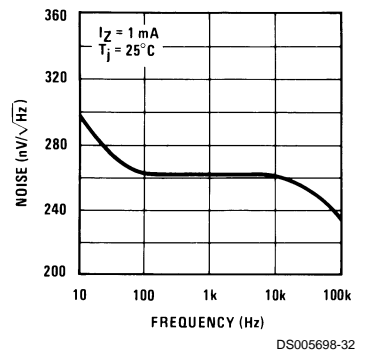
Response Time



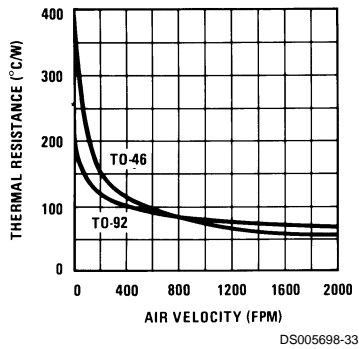
Dynamic Impedance



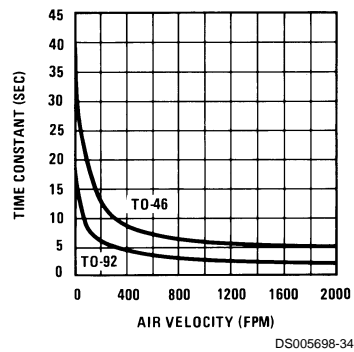
Noise Voltage



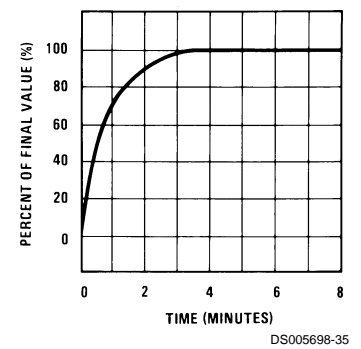
Thermal Resistance Junction to Air



Thermal Time Constant

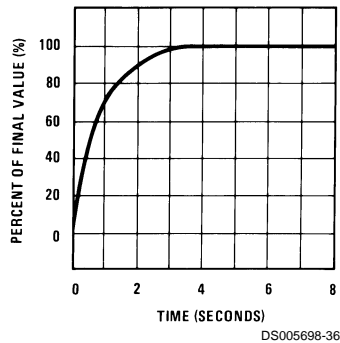


Thermal Response in Still Air

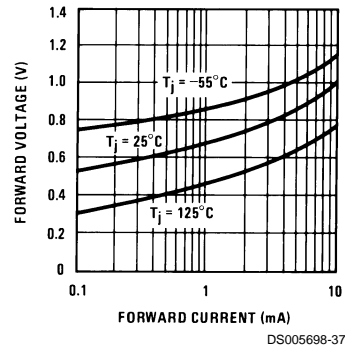


Typical Performance Characteristics (Continued)

Thermal Response in Stirred Oil Bath



Forward Characteristics



Application Hints

CALIBRATING THE LM135

Included on the LM135 chip is an easy method of calibrating the device for higher accuracies. A pot connected across the LM135 with the arm tied to the adjustment terminal allows a 1-point calibration of the sensor that corrects for inaccuracy over the full temperature range.

This single point calibration works because the output of the LM135 is proportional to absolute temperature with the extrapolated output of sensor going to 0V output at 0°K (-273.15°C). Errors in output voltage versus temperature are only slope (or scale factor) errors so a slope calibration at one temperature corrects at all temperatures.

The output of the device (calibrated or uncalibrated) can be expressed as:

$$V_{OUT_T} = V_{OUT_{T_0}} \times \frac{T}{T_0}$$

where T is the unknown temperature and T₀ is a reference temperature, both expressed in degrees Kelvin. By calibrating the output to read correctly at one temperature the output at all temperatures is correct. Nominally the output is calibrated at 10 mV/°K.

To insure good sensing accuracy several precautions must be taken. Like any temperature sensing device, self heating can reduce accuracy. The LM135 should be operated at the lowest current suitable for the application. Sufficient current, of course, must be available to drive both the sensor and the calibration pot at the maximum operating temperature as well as any external loads.

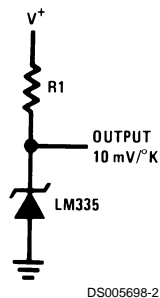
If the sensor is used in an ambient where the thermal resistance is constant, self heating errors can be calibrated out. This is possible if the device is run with a temperature stable current. Heating will then be proportional to zener voltage and therefore temperature. This makes the self heating error proportional to absolute temperature the same as scale factor errors.

WATERPROOFING SENSORS

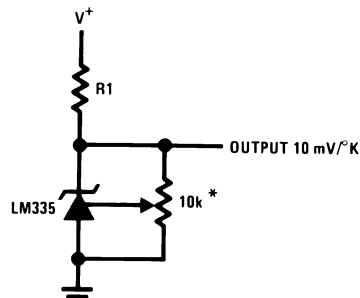
Meltable inner core heat shrinkable tubing such as manufactured by Raychem can be used to make low-cost waterproof sensors. The LM335 is inserted into the tubing about 1/2" from the end and the tubing heated above the melting point of the core. The unfilled 1/2" end melts and provides a seal over the device.

Typical Applications

Basic Temperature Sensor

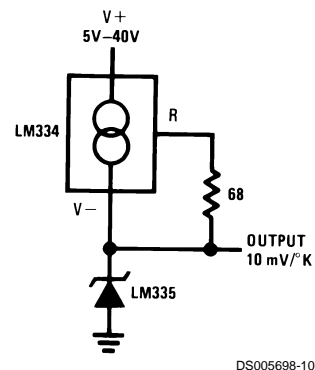


Calibrated Sensor



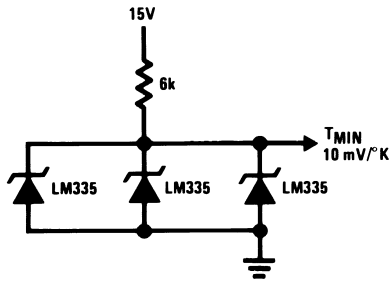
*Calibrate for 2.982V at 25°C

Wide Operating Supply



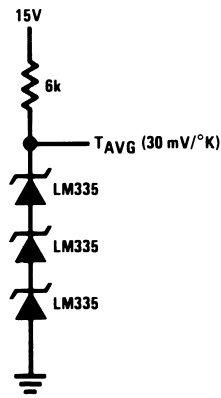
Typical Applications (Continued)

Minimum Temperature Sensing



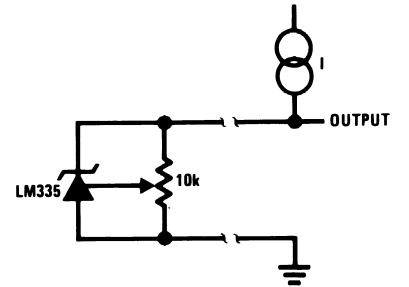
DS005698-4

Average Temperature Sensing



DS005698-18

Remote Temperature Sensing



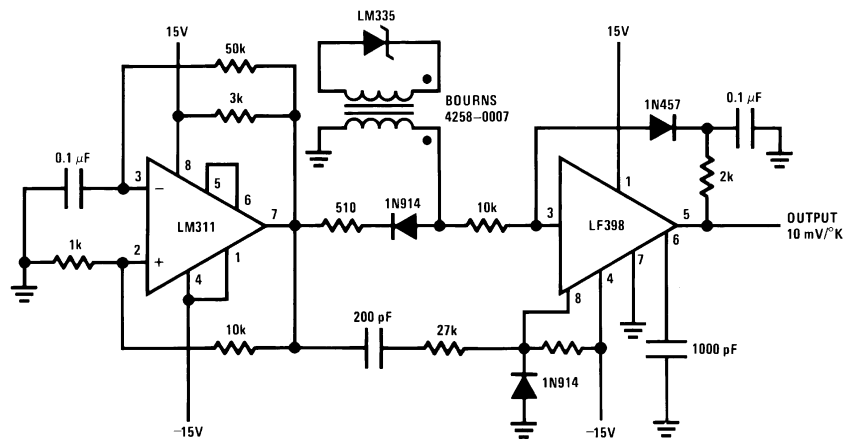
DS005698-19

Wire length for 1°C error due to wire drop

AWG	$I_R = 1$	$I_R = 0.5 \text{ mA}^*$
	FEET	FEET
14	4000	8000
16	2500	5000
18	1600	3200
20	1000	2000
22	625	1250
24	400	800

*For $I_R = 0.5 \text{ mA}$, the trim pot must be deleted.

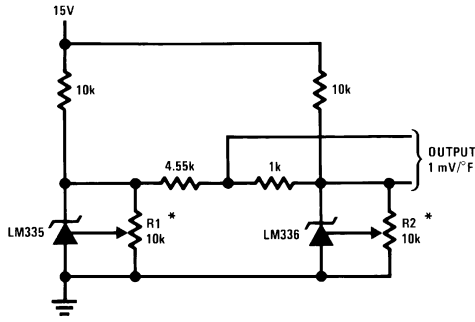
Isolated Temperature Sensor



DS005698-20

Typical Applications (Continued)

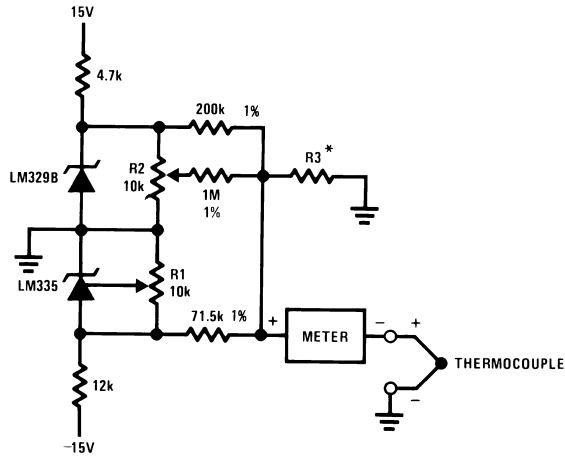
Fahrenheit Thermometer



DS005698-24

*To calibrate adjust R2 for 2.554V across LM336.
Adjust R1 for correct output.

THERMOCOUPLE COLD JUNCTION COMPENSATION Compensation for Grounded Thermocouple



DS005698-6

*Select R3 for proper thermocouple type

THERMO- COUPLE	R3 (±1%)	SEEBECK COEFFICIENT
J	377Ω	52.3 μV/°C
T	308Ω	42.8 μV/°C
K	293Ω	40.8 μV/°C
S	45.8Ω	6.4 μV/°C

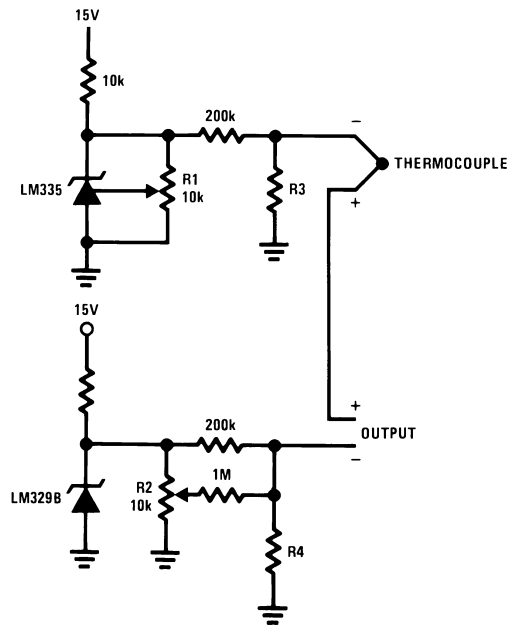
Adjustments: Compensates for both sensor and resistor tolerances

1. Short LM329B
2. Adjust R1 for Seebeck Coefficient times ambient temperature (in degrees K) across R3.
3. Short LM335 and adjust R2 for voltage across R3 corresponding to thermocouple type

J	14.32 mV	K	11.17 mV
T	11.79 mV	S	1.768 mV

Typical Applications (Continued)

Single Power Supply Cold Junction Compensation



DS005698-11

*Select R3 and R4 for thermocouple type

THERMO- COUPLE	R3	R4	SEEBECK COEFFICIENT
J	1.05K	385Ω	52.3 μV/°C
T	856Ω	315Ω	42.8 μV/°C
K	816Ω	300Ω	40.8 μV/°C
S	128Ω	46.3Ω	6.4 μV/°C

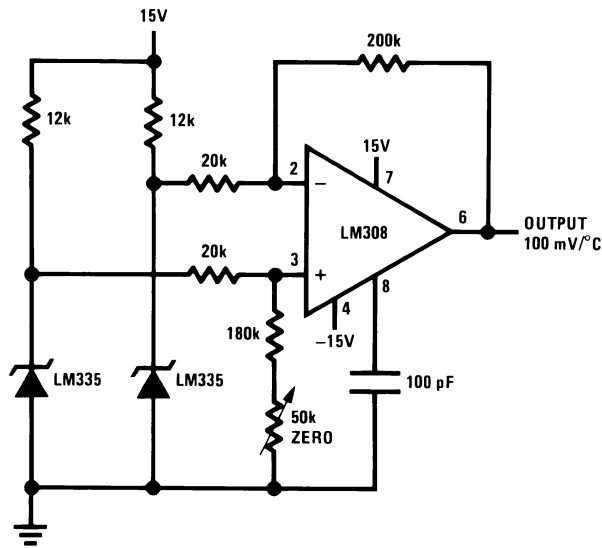
Adjustments:

1. Adjust R1 for the voltage across R3 equal to the Seebeck Coefficient times ambient temperature in degrees Kelvin.
2. Adjust R2 for voltage across R4 corresponding to thermocouple

J	14.32 mV
T	11.79 mV
K	11.17 mV
S	1.768 mV

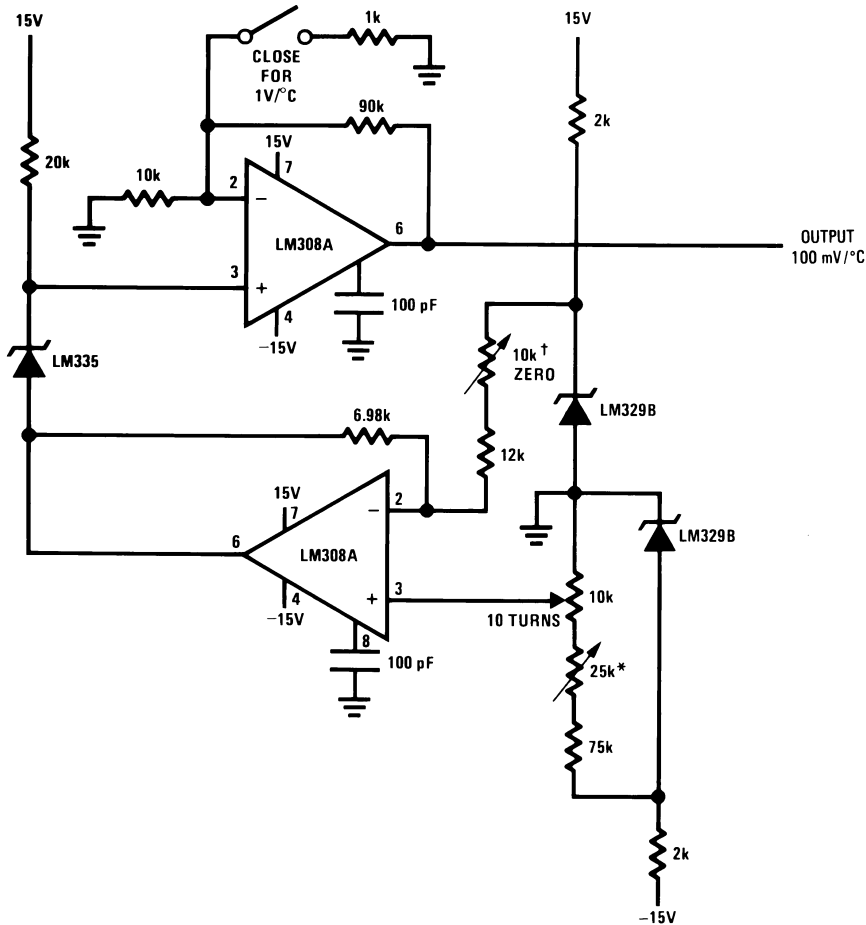
Typical Applications (Continued)

Differential Temperature Sensor



DS005698-14

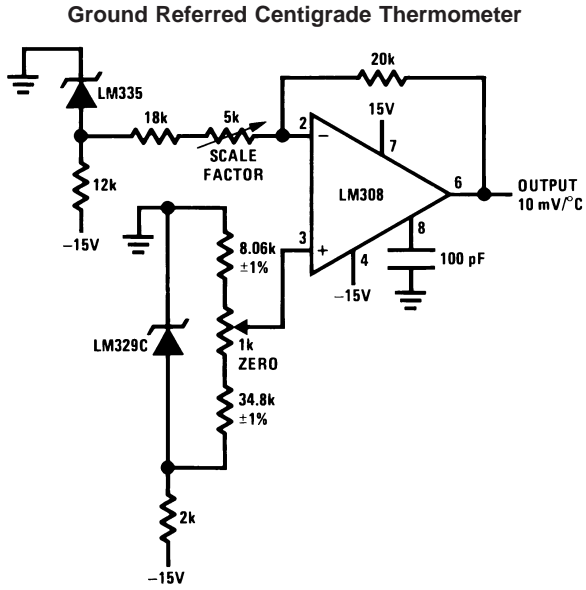
Variable Offset Thermometer



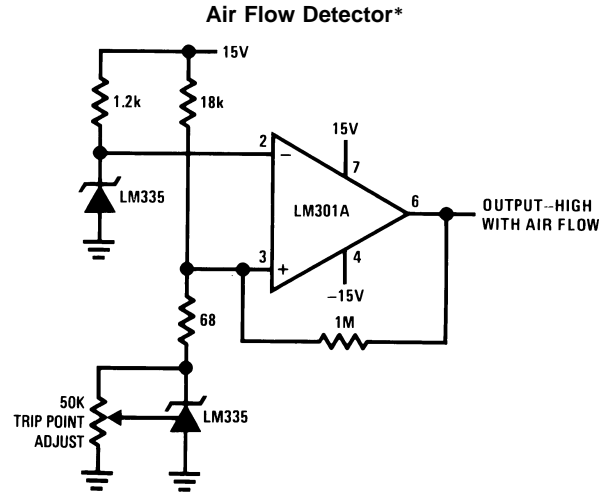
DS005698-15

†Adjust for zero with sensor at 0°C and 10T pot set at 0°C
 *Adjust for zero output with 10T pot set at 100°C and sensor at 100°C
 Output reads difference between temperature and dial setting of 10T pot

Typical Applications (Continued)



DS005698-16



DS005698-17

*Self heating is used to detect air flow

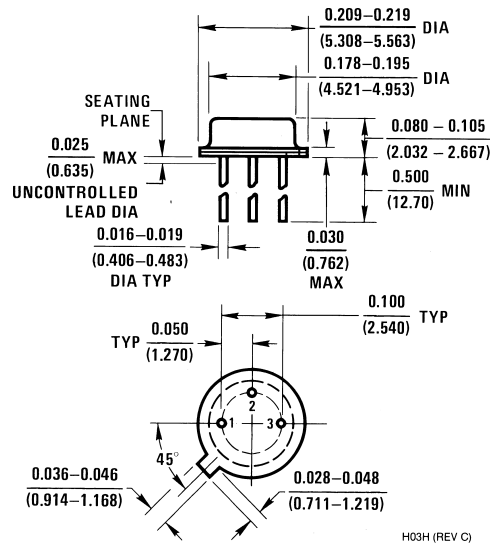
Definition of Terms

Operating Output Voltage: The voltage appearing across the positive and negative terminals of the device at specified conditions of operating temperature and current.

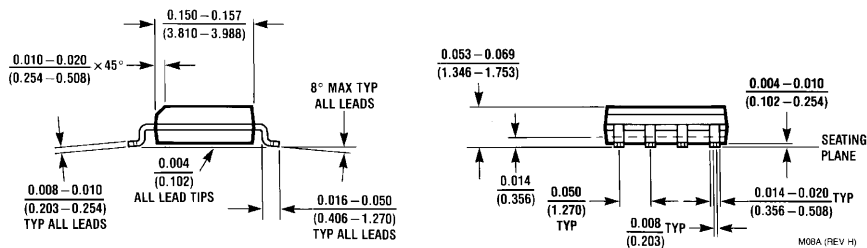
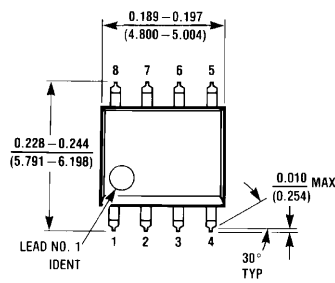
Uncalibrated Temperature Error: The error between the operating output voltage at 10 mV/°K and case temperature at specified conditions of current and case temperature.

Calibrated Temperature Error: The error between operating output voltage and case temperature at 10 mV/°K over a temperature range at a specified operating current with the 25°C error adjusted to zero.

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted

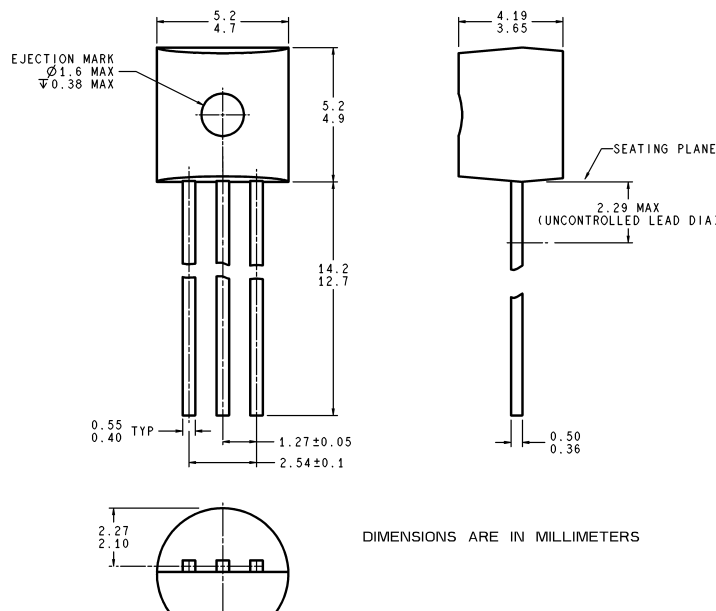


Metal Can Package (H)
 Order Number LM135H, LM235H, LM335H, LM135AH, LM235AH or LM335AH
 NS Package Number H03H



8-Lead Molded Small Outline Package (M)
 Order Number LM335M
 NS Package Number M08A

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



Z03A (Rev 6)

Plastic Package
Order Number LM335Z or LM335AZ
NS Package Z03A

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.



National Semiconductor Corporation
 Americas
 Tel: 1-800-272-9959
 Fax: 1-800-737-7018
 Email: support@nsc.com
 www.national.com

National Semiconductor Europe
 Fax: +49 (0) 180-530 85 86
 Email: europe.support@nsc.com
 Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208
 English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171
 Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

National Semiconductor Asia Pacific Customer Response Group
 Tel: 65-2544466
 Fax: 65-2504466
 Email: ap.support@nsc.com

National Semiconductor Japan Ltd.
 Tel: 81-3-5639-7560
 Fax: 81-3-5639-7507

This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.

LM35

Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

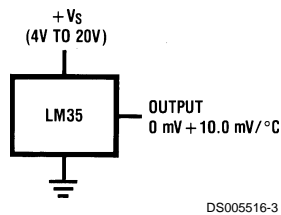
The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^\circ\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^\circ\text{C}$ over a full -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $60\ \mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55° to $+150^\circ\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40° to $+110^\circ\text{C}$ range (-10° with improved accuracy). The LM35 series is available pack-

aged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

Features

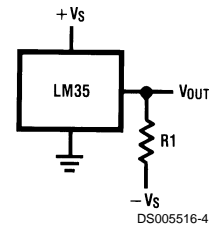
- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/°C scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at +25°C)
- Rated for full -55° to $+150^\circ\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than $60\ \mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\ \Omega$ for 1 mA load

Typical Applications



DS005516-3

FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor (+2°C to +150°C)



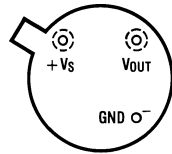
DS005516-4

Choose $R_1 = -V_S/50\ \mu\text{A}$
 $V_{\text{OUT}} = +1,500\ \text{mV}$ at $+150^\circ\text{C}$
 $= +250\ \text{mV}$ at $+25^\circ\text{C}$
 $= -550\ \text{mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

Connection Diagrams

**TO-46
Metal Can Package***

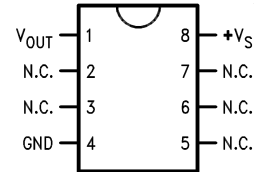


BOTTOM VIEW
DS005516-1

*Case is connected to negative pin (GND)

Order Number LM35H, LM35AH, LM35CH, LM35CAH or LM35DH
See NS Package Number H03H

**SO-8
Small Outline Molded Package**

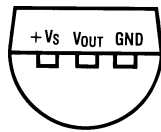


DS005516-21

N.C. = No Connection

Top View
Order Number LM35DM
See NS Package Number M08A

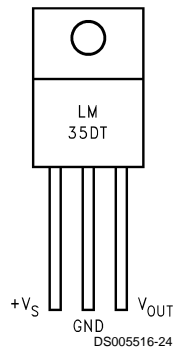
**TO-92
Plastic Package**



BOTTOM VIEW
DS005516-2

Order Number LM35CZ, LM35CAZ or LM35DZ
See NS Package Number Z03A

**TO-220
Plastic Package***



DS005516-24

*Tab is connected to the negative pin (GND).

Note: The LM35DT pinout is different than the discontinued LM35DP.

Order Number LM35DT
See NS Package Number TA03F

Absolute Maximum Ratings (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	+35V to -0.2V
Output Voltage	+6V to -1.0V
Output Current	10 mA
Storage Temp.:	
TO-46 Package,	-60°C to +180°C
TO-92 Package,	-60°C to +150°C
SO-8 Package,	-65°C to +150°C
TO-220 Package,	-65°C to +150°C
Lead Temp.:	
TO-46 Package,	
(Soldering, 10 seconds)	300°C

TO-92 and TO-220 Package, (Soldering, 10 seconds)	260°C
SO Package (Note 12)	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
ESD Susceptibility (Note 11)	2500V
Specified Operating Temperature Range: T_{MIN} to T_{MAX} (Note 2)	
LM35, LM35A	-55°C to +150°C
LM35C, LM35CA	-40°C to +110°C
LM35D	0°C to +100°C

Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35A			LM35CA			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.2	± 0.5		± 0.2	± 0.5		°C
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.3			± 0.3		± 1.0	°C
	$T_A = T_{MAX}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		°C
	$T_A = T_{MIN}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4		± 1.5	°C
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.18		± 0.35	± 0.15		± 0.3	°C
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10.0	+9.9, +10.1		+10.0		+9.9, +10.1	mV/°C
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1$ mA	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.5		± 3.0	± 0.5		± 3.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.05		± 0.01	± 0.05		mV/V
	$4V \leq V_S \leq 30V$	± 0.02		± 0.1	± 0.02		± 0.1	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5V, +25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		μA
	$V_S = +5V$	105		131	91		114	μA
	$V_S = +30V, +25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		μA
	$V_S = +30V$	105.5		133	91.5		116	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4V \leq V_S \leq 30V, +25^\circ\text{C}$	0.2	1.0		0.2	1.0		μA
	$4V \leq V_S \leq 30V$	0.5		2.0	0.5		2.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	μA/°C
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of <i>Figure 1</i> , $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	°C
Long Term Stability	$T_J = T_{MAX}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			°C

Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35			LM35C, LM35D			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy, LM35, LM35C (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.5			± 0.5		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$	± 0.8	± 1.5		± 0.8		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$	± 0.8		± 1.5	± 0.8		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Accuracy, LM35D (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$				± 0.6	± 1.5		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.3		± 0.5	± 0.2		± 0.5	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	+10.0	+9.8, +10.2		+10.0		+9.8, +10.2	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 2.0		± 0.4	± 2.0		mV/mA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.5		± 5.0	± 0.5		± 5.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.1		± 0.01	± 0.1		mV/V
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	± 0.02		± 0.2	± 0.02		± 0.2	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56	80		56	80		μA
	$V_S = +5\text{V}$	105		158	91		138	μA
	$V_S = +30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56.2	82		56.2	82		μA
	$V_S = +30\text{V}$	105.5		161	91.5		141	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	0.2	2.0		0.2	2.0		μA
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	0.5		3.0	0.5		3.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.7	+0.39		+0.7	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of <i>Figure 1</i> , $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_J = T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

Note 1: Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq +150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq +110^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S = +5\text{Vdc}$ and $I_{\text{LOAD}} = 50 \mu\text{A}$, in the circuit of *Figure 2*. These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of *Figure 1*. Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 2: Thermal resistance of the TO-46 package is $400^\circ\text{C}/\text{W}$, junction to ambient, and $24^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is $180^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is $220^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package is $90^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the Applications section.

Note 3: Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

Note 4: Tested Limits are guaranteed and 100% tested in production.

Note 5: Design Limits are guaranteed (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

Note 6: Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 7: Accuracy is defined as the error between the output voltage and $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ times the device's case temperature, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in $^\circ\text{C}$).

Note 8: Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the device's rated temperature range.

Note 9: Quiescent current is defined in the circuit of *Figure 1*.

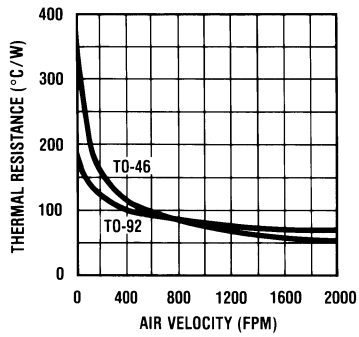
Note 10: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See Note 1.

Note 11: Human body model, 100 pF discharged through a $1.5 \text{ k}\Omega$ resistor.

Note 12: See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" or the section titled "Surface Mount" found in a current National Semiconductor Linear Data Book for other methods of soldering surface mount devices.

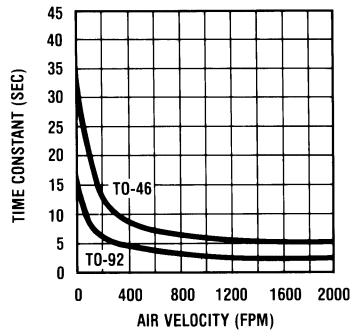
Typical Performance Characteristics

Thermal Resistance Junction to Air



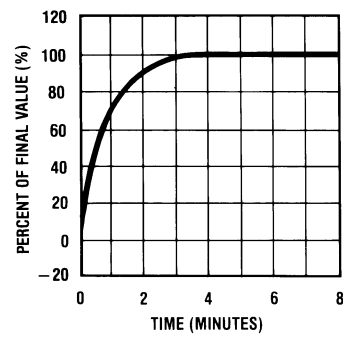
DS005516-25

Thermal Time Constant



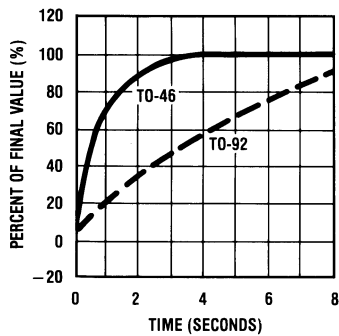
DS005516-26

Thermal Response in Still Air



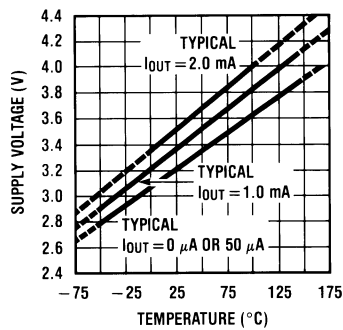
DS005516-27

Thermal Response in Stirred Oil Bath



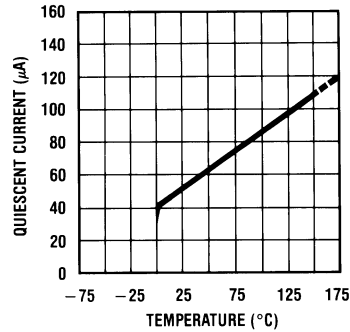
DS005516-28

Minimum Supply Voltage vs. Temperature



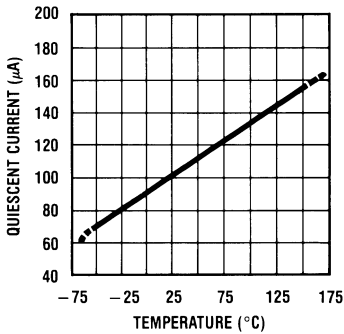
DS005516-29

Quiescent Current vs. Temperature (In Circuit of Figure 1.)



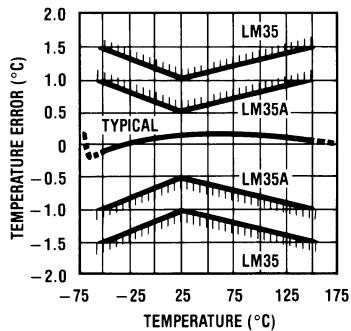
DS005516-30

Quiescent Current vs. Temperature (In Circuit of Figure 2.)



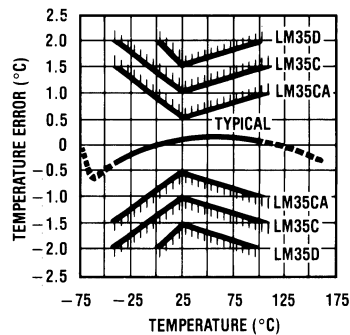
DS005516-31

Accuracy vs. Temperature (Guaranteed)



DS005516-32

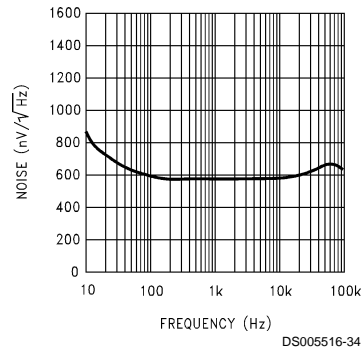
Accuracy vs. Temperature (Guaranteed)



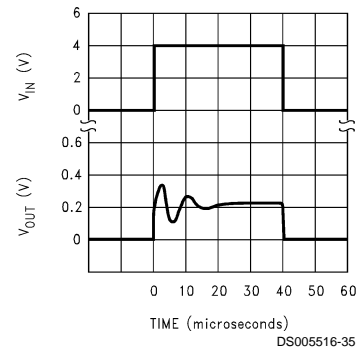
DS005516-33

Typical Performance Characteristics (Continued)

Noise Voltage



Start-Up Response



Applications

The LM35 can be applied easily in the same way as other integrated-circuit temperature sensors. It can be glued or cemented to a surface and its temperature will be within about 0.01°C of the surface temperature.

This presumes that the ambient air temperature is almost the same as the surface temperature; if the air temperature were much higher or lower than the surface temperature, the actual temperature of the LM35 die would be at an intermediate temperature between the surface temperature and the air temperature. This is especially true for the TO-92 plastic package, where the copper leads are the principal thermal path to carry heat into the device, so its temperature might be closer to the air temperature than to the surface temperature.

To minimize this problem, be sure that the wiring to the LM35, as it leaves the device, is held at the same temperature as the surface of interest. The easiest way to do this is to cover up these wires with a bead of epoxy which will insure that the leads and wires are all at the same temperature as the surface, and that the LM35 die's temperature will not be affected by the air temperature.

The TO-46 metal package can also be soldered to a metal surface or pipe without damage. Of course, in that case the V- terminal of the circuit will be grounded to that metal. Alternatively, the LM35 can be mounted inside a sealed-end metal tube, and can then be dipped into a bath or screwed into a threaded hole in a tank. As with any IC, the LM35 and accompanying wiring and circuits must be kept insulated and dry, to avoid leakage and corrosion. This is especially true if the circuit may operate at cold temperatures where condensation can occur. Printed-circuit coatings and varnishes such as Humiseal and epoxy paints or dips are often used to insure that moisture cannot corrode the LM35 or its connections.

These devices are sometimes soldered to a small light-weight heat fin, to decrease the thermal time constant and speed up the response in slowly-moving air. On the other hand, a small thermal mass may be added to the sensor, to give the steadiest reading despite small deviations in the air temperature.

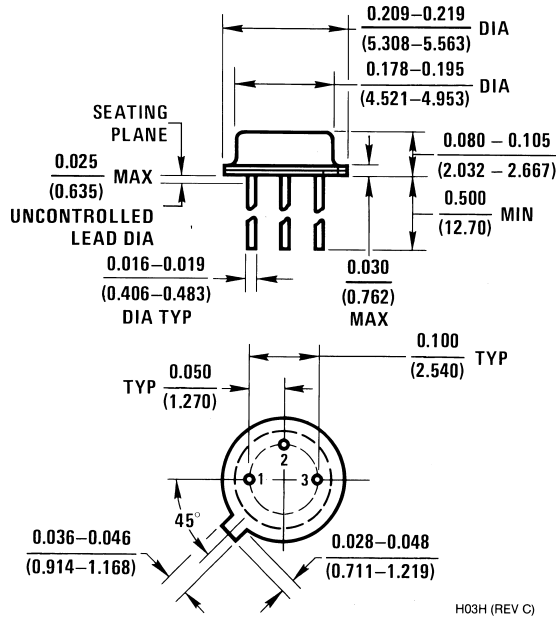
Temperature Rise of LM35 Due To Self-heating (Thermal Resistance, θ_{JA})

	TO-46, no heat sink	TO-46*, small heat fin	TO-92, no heat sink	TO-92**, small heat fin	SO-8 no heat sink	SO-8** small heat fin	TO-220 no heat sink
Still air	400°C/W	100°C/W	180°C/W	140°C/W	220°C/W	110°C/W	90°C/W
Moving air	100°C/W	40°C/W	90°C/W	70°C/W	105°C/W	90°C/W	26°C/W
Still oil	100°C/W	40°C/W	90°C/W	70°C/W			
Stirred oil	50°C/W	30°C/W	45°C/W	40°C/W			
(Clamped to metal, Infinite heat sink)		(24°C/W)				(55°C/W)	

*Wakefield type 201, or 1" disc of 0.020" sheet brass, soldered to case, or similar.

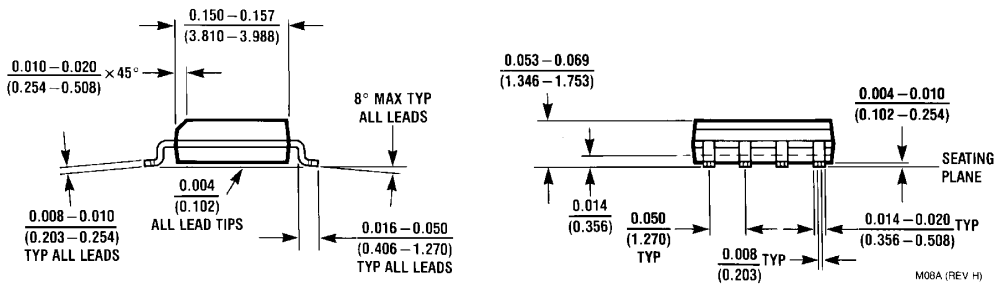
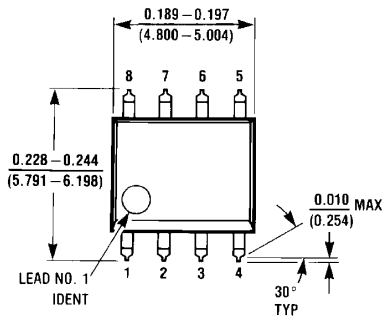
**TO-92 and SO-8 packages glued and leads soldered to 1" square of 1/16" printed circuit board with 2 oz. foil or similar.

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted



H03H (REV C)

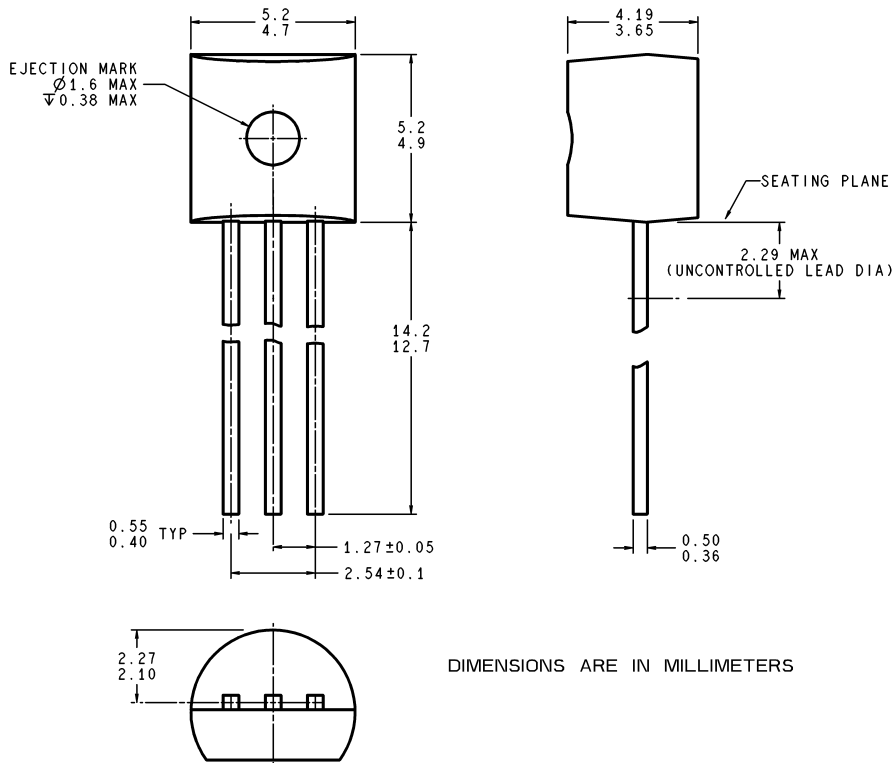
TO-46 Metal Can Package (H)
 Order Number LM35H, LM35AH, LM35CH,
 LM35CAH, or LM35DH
 NS Package Number H03H



M08A (REV H)

SO-8 Molded Small Outline Package (M)
 Order Number LM35DM
 NS Package Number M08A

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



Z03A (Rev G)

TO-92 Plastic Package (Z)
Order Number LM35CZ, LM35CAZ or LM35DZ
NS Package Number Z03A

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

 **National Semiconductor Corporation**
Americas
Tel: 1-800-272-9959
Fax: 1-800-737-7018
Email: support@nsc.com
www.national.com

National Semiconductor Europe
Fax: +49 (0) 180-530 85 86
Email: europe.support@nsc.com
Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208
English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171
Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

National Semiconductor Asia Pacific Customer Response Group
Tel: 65-2544466
Fax: 65-2504466
Email: ap.support@nsc.com

National Semiconductor Japan Ltd.
Tel: 81-3-5639-7560
Fax: 81-3-5639-7507

This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.

F. Check List Experimental

		Experimento					Check List
Item	1	2	3	4	5	6	Actividad
1							Celdas Cargadas
2							Prender Computador
3							Termocuplas Ubicadas y Funcionales
4							Precalentar Ventiladores (Dejarlos Correr a un voltaje cercano al deseado para la experimentación)
5							Conectar Bananas (Crear Circuito en Serie)
6							Medir Voltajes Celdas (Una por una)
7							Medir Voltaje Total (Para asegurar que el circuito esta conectado), >122V o 103V según numero de celdas)
8							Inspección Visual Contacto Elctrico (Ninguna tuerca debe tocar la parte posterior de los sopotres)
9							Acoplar Disposición a Adaptador
10							Conectar iChargers Para Medir Voltaje de Celdas Durante Experimento
11							Entrada y Salida Experimento Despejadas
12							Apretar Cables Ventilador en Fuente de Poder, revisar corrientes similares
13							Ajustar Caudal Usando Perfil de Velocidad en Disposición Anterior (solo si Corresponde)
14							Setear y Registrar Voltaje Ventiladores (Usar Multmetro)
15							Registrar Velocidad en Tubos
16							Orientación Celdas con Termocuplas Correcta (Termocupla en la parte posterior de la celda)
17							Medir y Registrar Temperatura Ambiente
18							Calibrar Termocuplas
19							Conectar Electricamente Arreglo a Carga Programable
20							Verificar Voltaje De Corte Acorde a Numero de Celdas
21							Carga Programable Operativa
22							Apagar Ventiladores
23							Comenzar a Grabar Datos de Temp., Voltaje y Corriente
24							Comenzar Descarga
25							Controlar que Celdas no Bajen su Voltaje de 2,7V
26							Apagar Carga Programable y Prender Ventiladores (Cuando se alcancen los 2,7V)
27							Terminar Toma de Datos y Exportar (A los 30 min)
28							Apagar Ventiladores
29							Dejar Cargando Celdas
30							Ordenar
31							Apagar Ventilador, Luces Laboratorio y Cerrar Con Llave

G. Resultados Térmicos

1. Resultados térmicos

Previo a los resultados se presenta la tabla resumen de los experimentos, la cual contiene los parámetros utilizados en cada uno.

Tabla 7-1: Resumen de experimentos realizados

Exp.	Tipo de Arreglo	Voltaje Ventilador	Caudal [m ³ /hr]	Vel. Entrada [m/s]
1	Alineado	5.55	74.6	1.8
3	Alineado	8.50	122.9	3.0
2	Alineado	11.00	152.6	3.8
9	Alineado	11.00	152.6	3.8
6	Escalonado	5.90	75.9	1.9
5	Escalonado	8.13	109.3	2.7
8	Escalonado	8.13	109.3	2.7
11	Escalonado	9.01	122.1	3.0
10	Escalonado	11.21	153.0	3.8

A continuación se presentan los resultados térmicos.

2. Configuración alineada

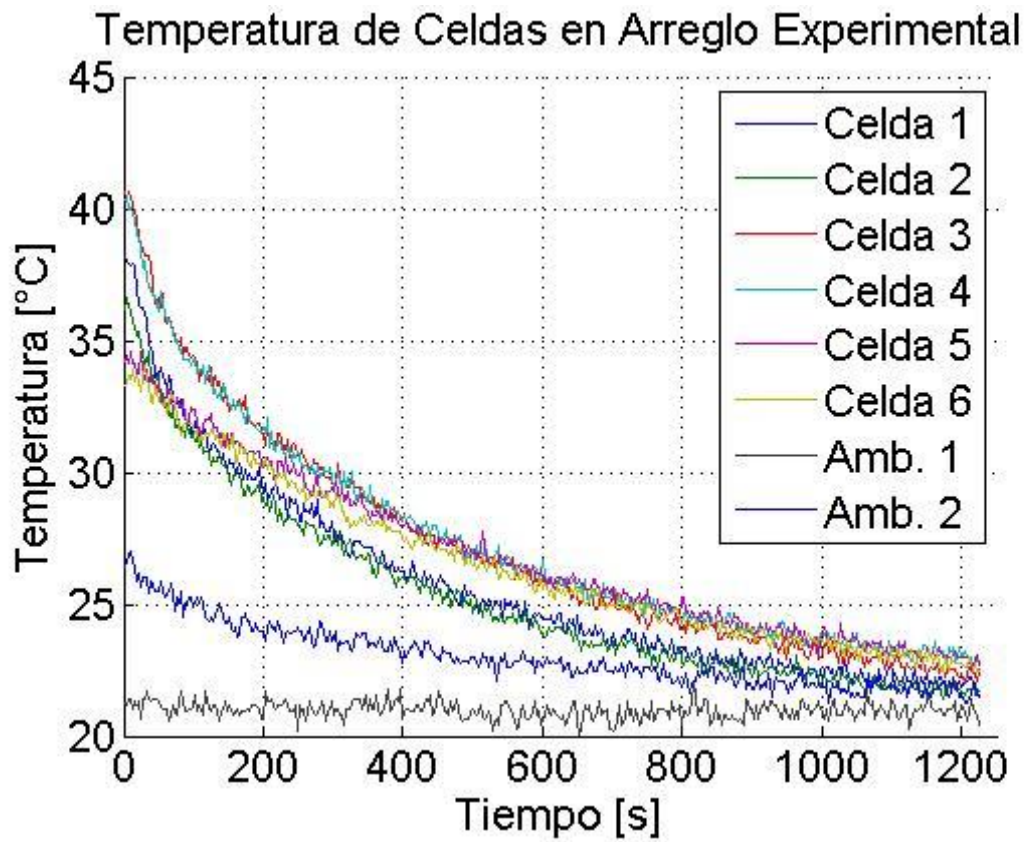


Figura 7-26: Experimento 1, Caudal 74,6 [m³/hr]

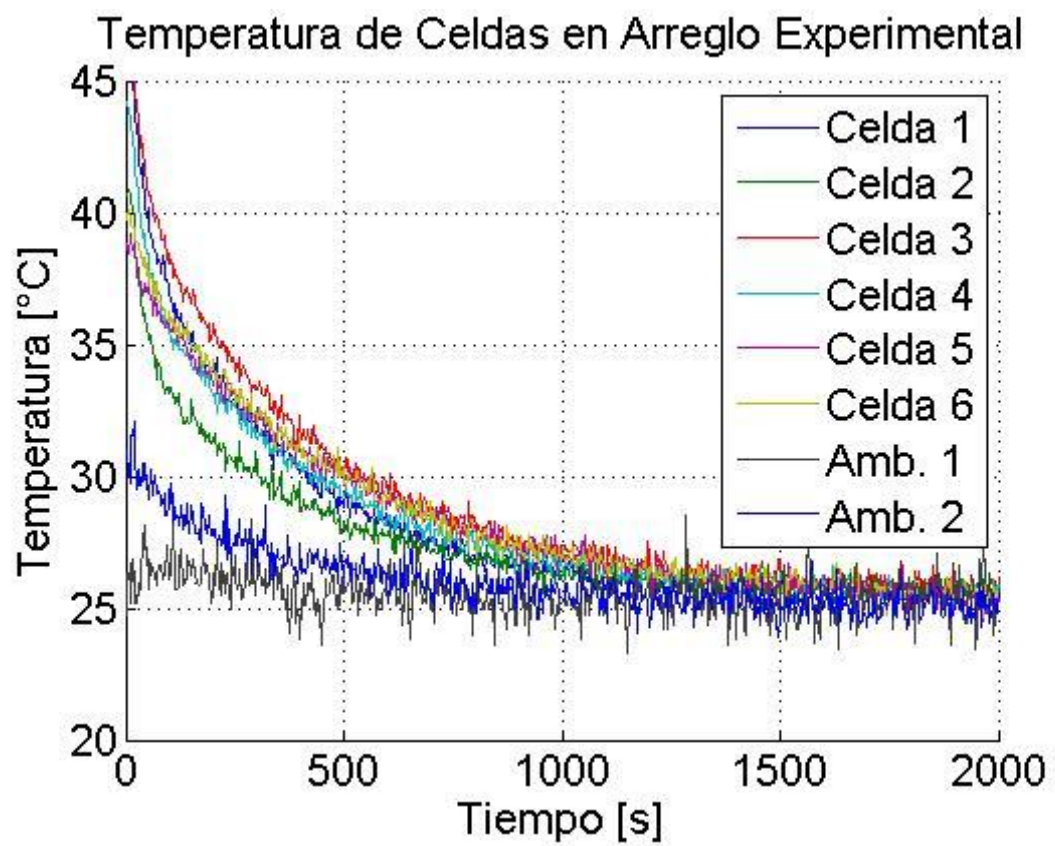


Figura 7-27: Experimento 2, Caudal 152,6 [m³/hr]

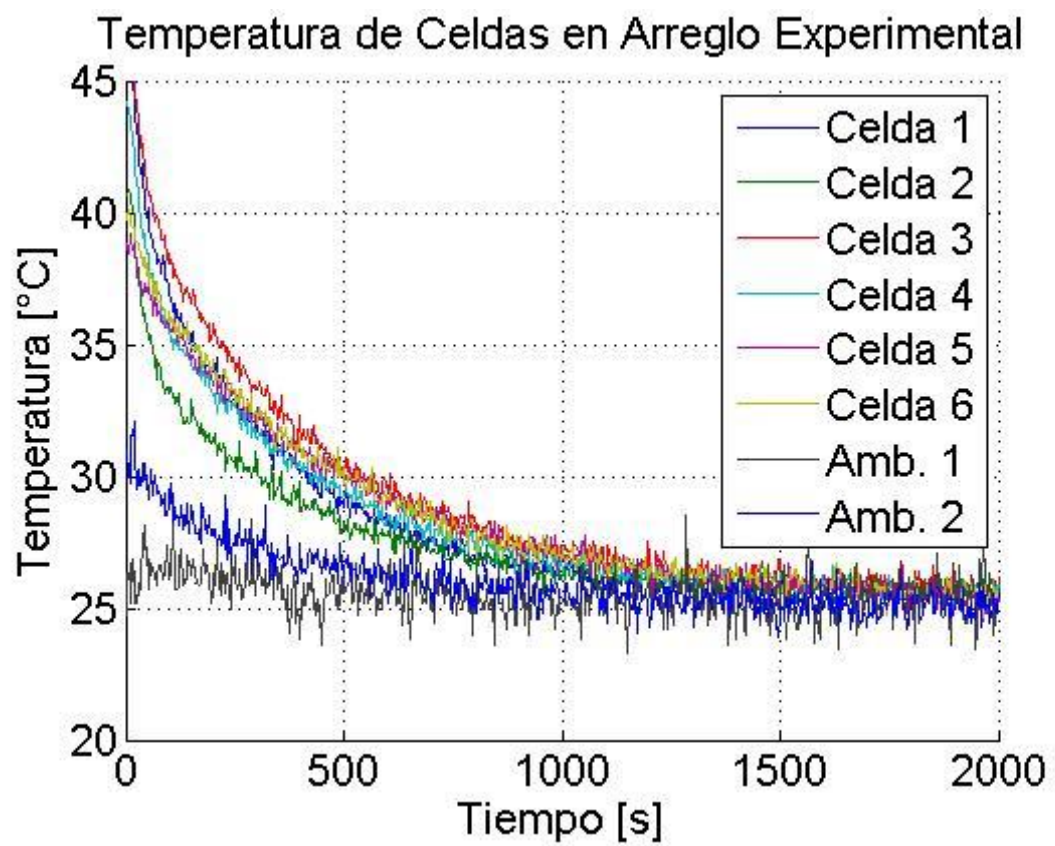


Figura 7-28 : Experimento 3, Caudal 122,9 [m3/hr]

2.1. Repetición de experimento alineado

Para respaldar la capacidad de repetición de experimento se repitió el experimento 2.

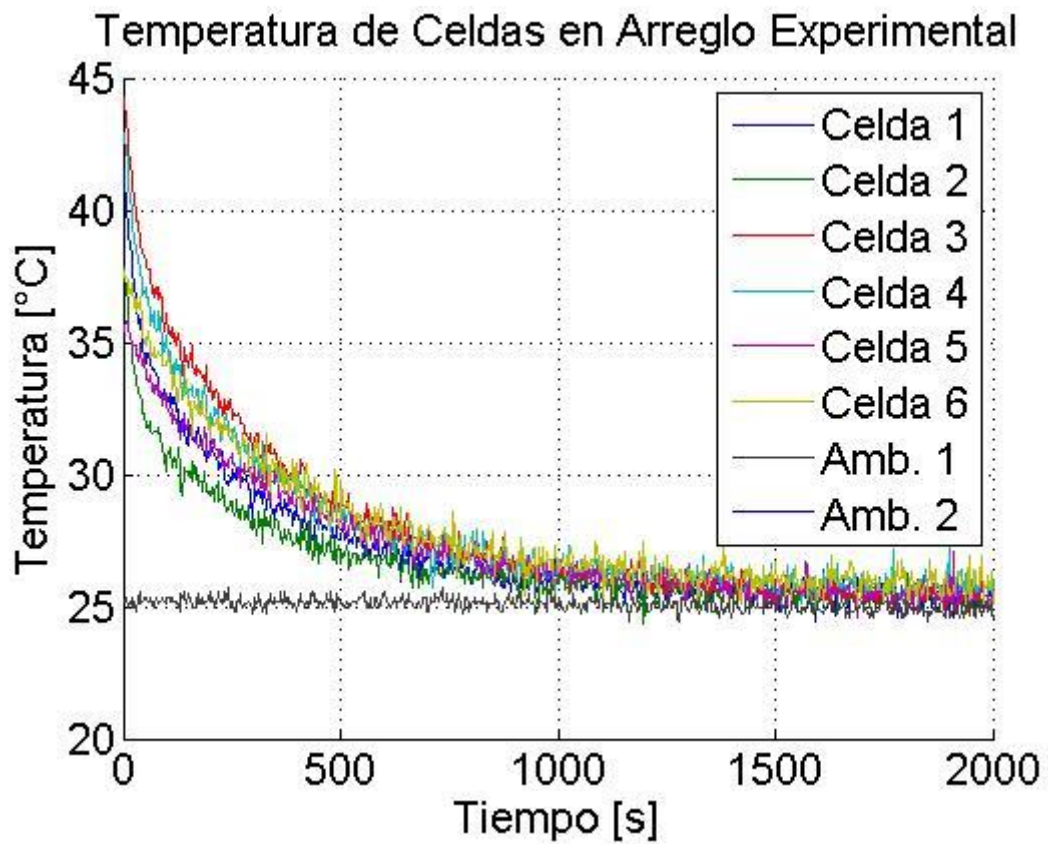


Figura 7-29: Experimento 9, Caudal 152,6 [m³/hr]

3. Configuración escalonada

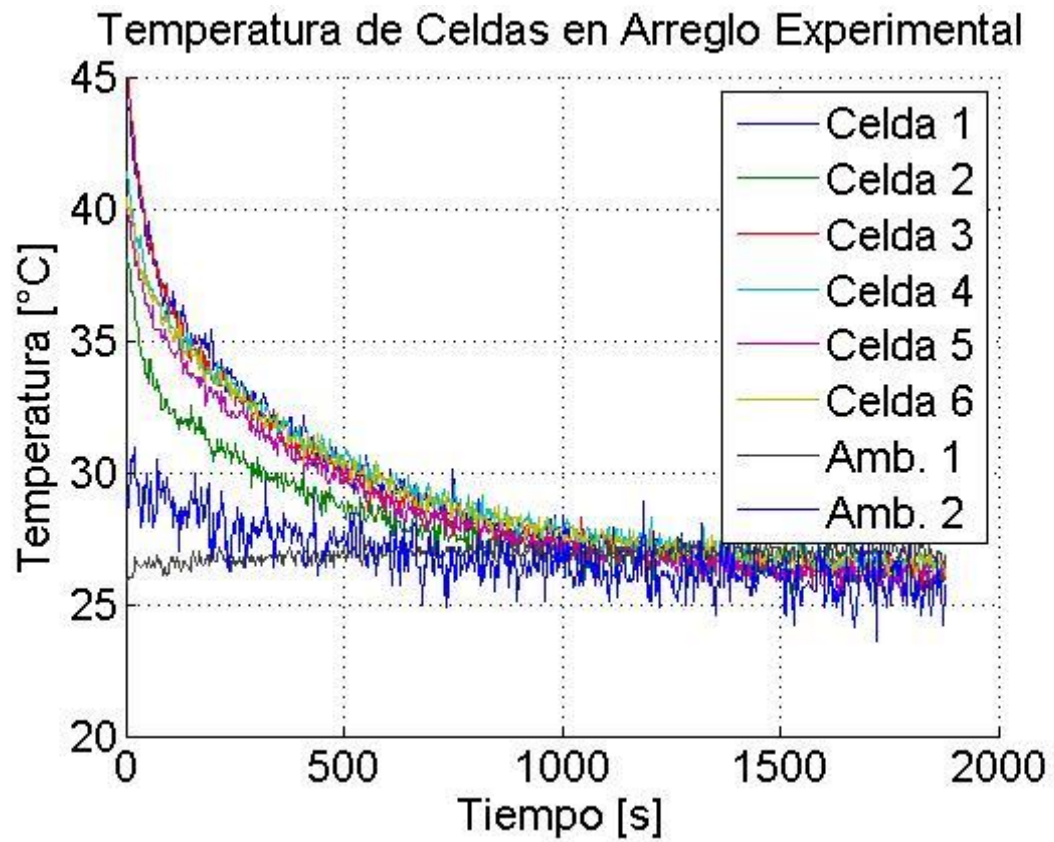


Figura 7-30: Experimento 6, Caudal 75,9 [m³/hr]

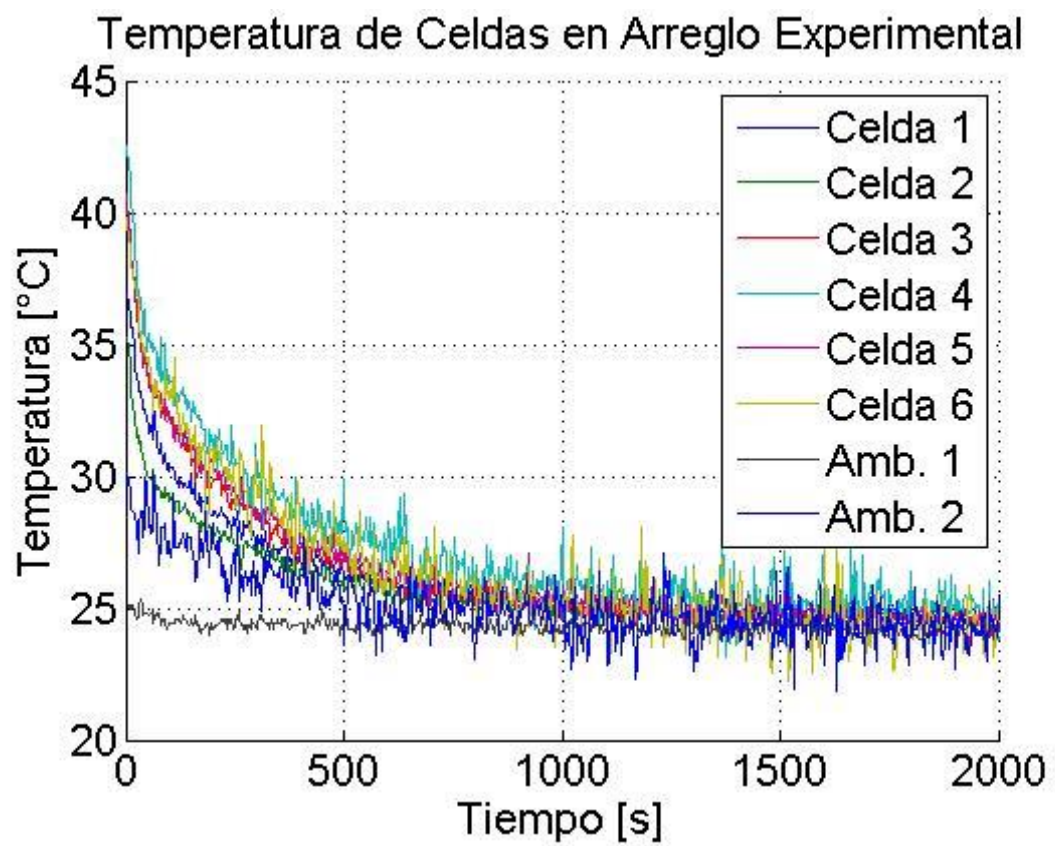


Figura 7-31: Experimento 10, Caudal 153,0 [m³/hr]

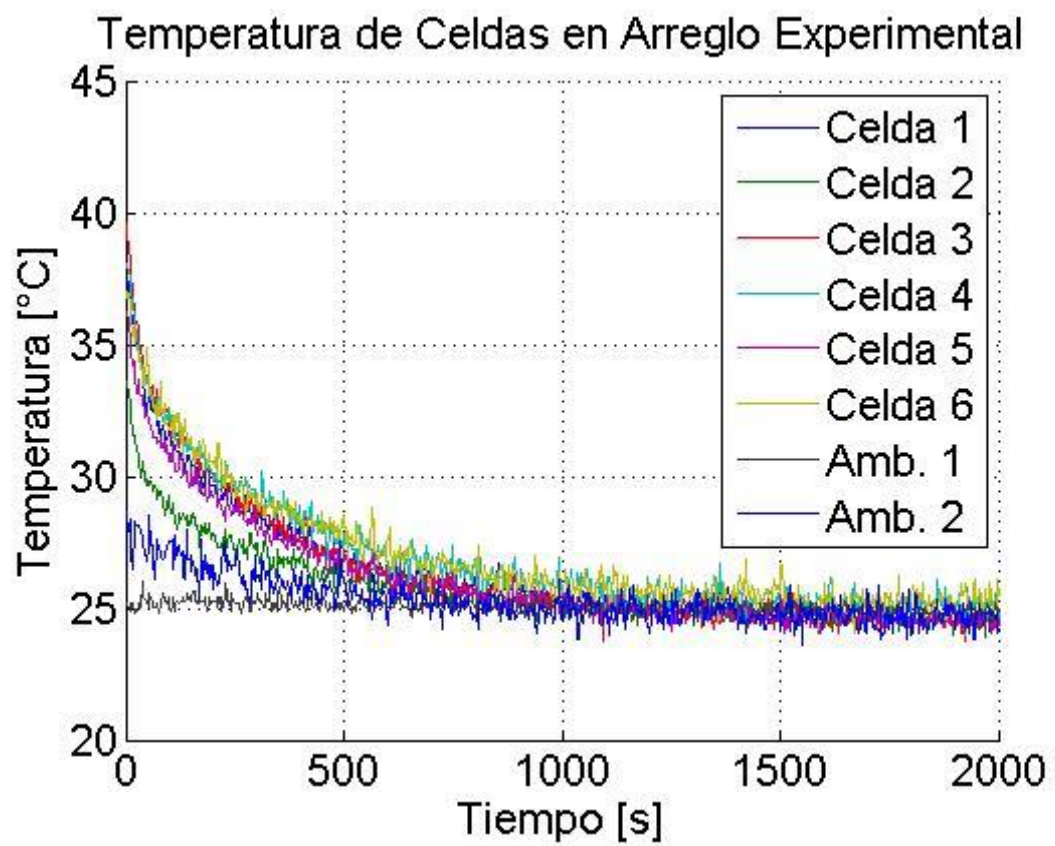


Figura 7-32: Experimento 11, Caudal 122,1 [m³/hr]

3.1. Repetición de experimento escalonado

Para respaldar la capacidad de repetición de experimento se realizó 2 veces el experimento 5.

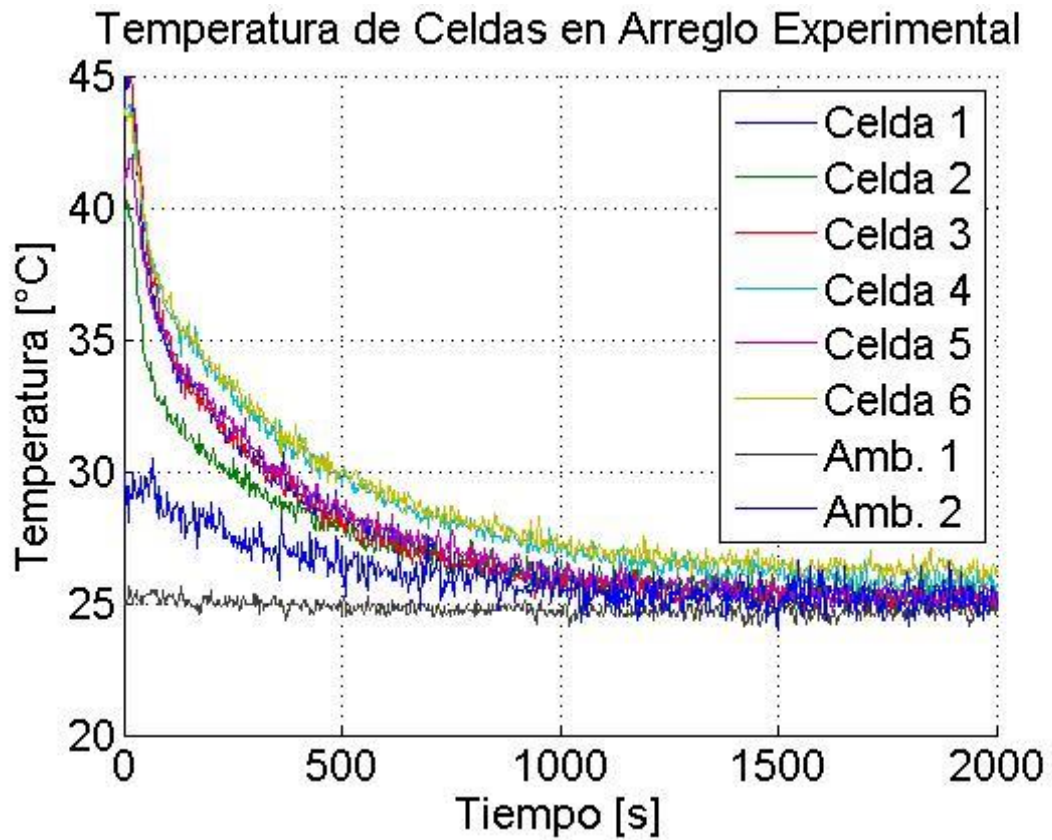


Figura 7-33: Experimento 5, Caudal 109,3 [m³/hr]

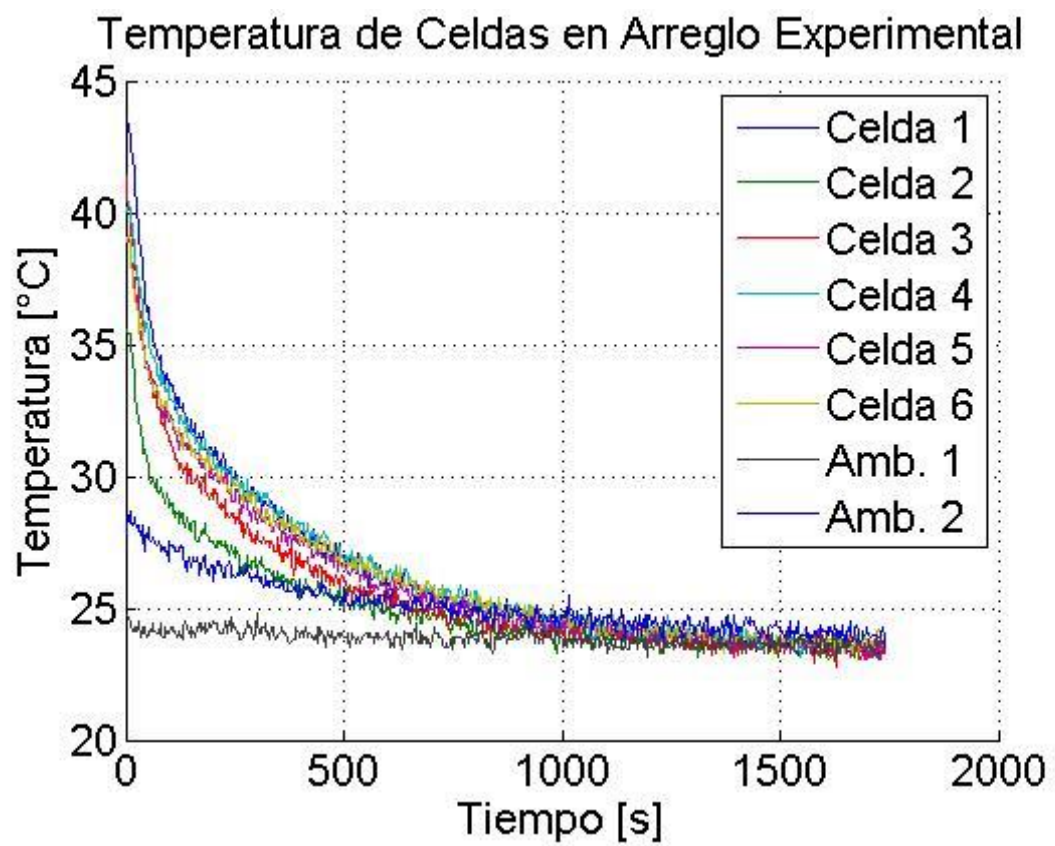


Figura 7-34: Experimento 8, Caudal 109,3 [m³/s]

H. Resultados Ajuste Exponencial

A continuación se presentan los gráficos de los ajustes de curva tipo exponencial a los resultados experimentales. A modo de facilitar la comprensión primero se presenta la tabla resumen de los parámetros utilizados, ver Tabla 7-2.

Tabla 7-2 : Resumen de experimentos realizados

Exp.	Tipo de Arreglo	Voltaje Ventilador	Caudal [m3/hr]	Vel. Entrada [m/s]
1	Alineado	5.55	74.6	1.8
3	Alineado	8.50	122.9	3.0
2	Alineado	11.00	152.6	3.8
9	Alineado	11.00	152.6	3.8
6	Escalonado	5.90	75.9	1.9
5	Escalonado	8.13	109.3	2.7
8	Escalonado	8.13	109.3	2.7
11	Escalonado	9.01	122.1	3.0
10	Escalonado	11.21	153.0	3.8

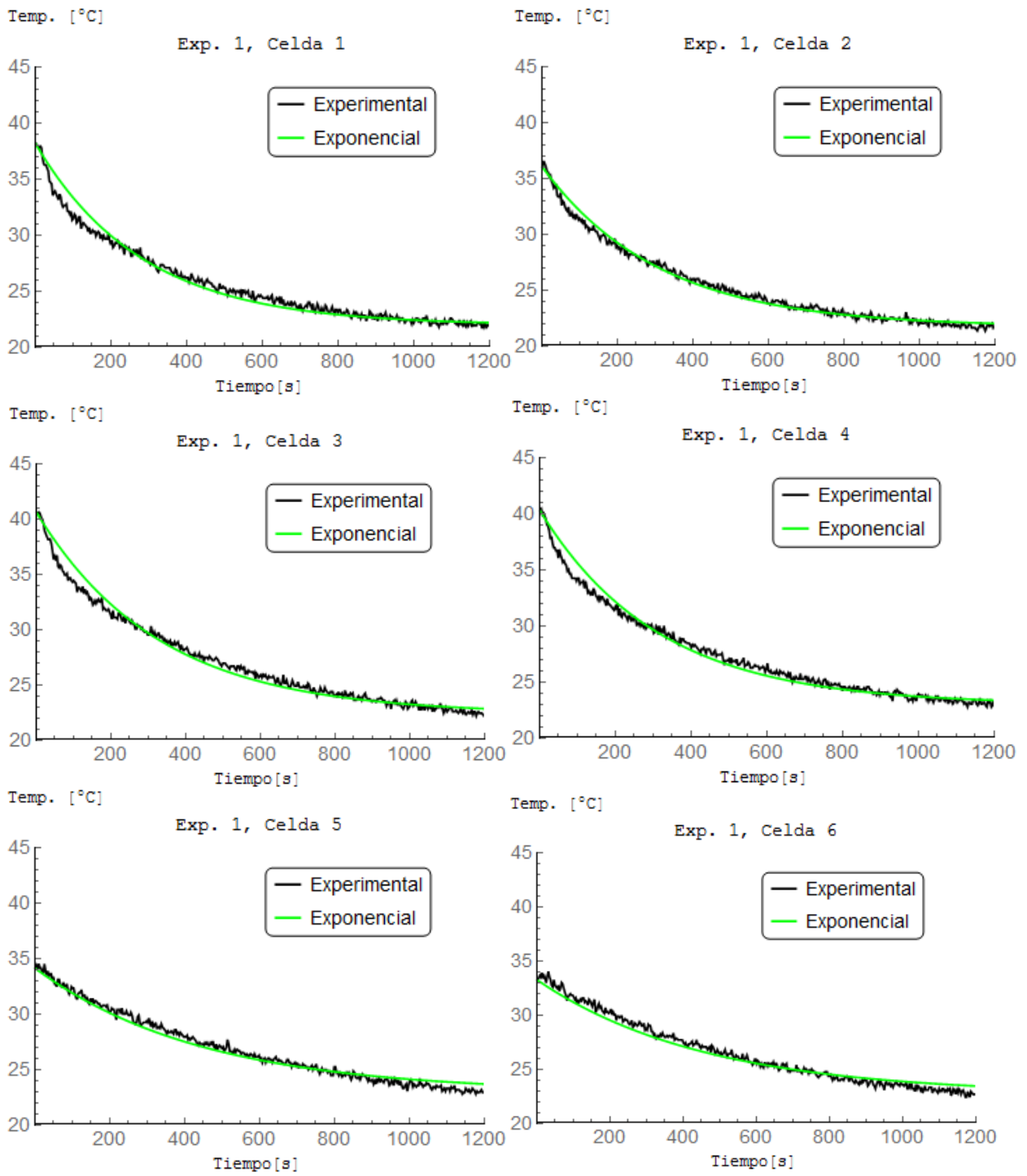


Figura 7-35: Ajuste Exponencial Exp. 1

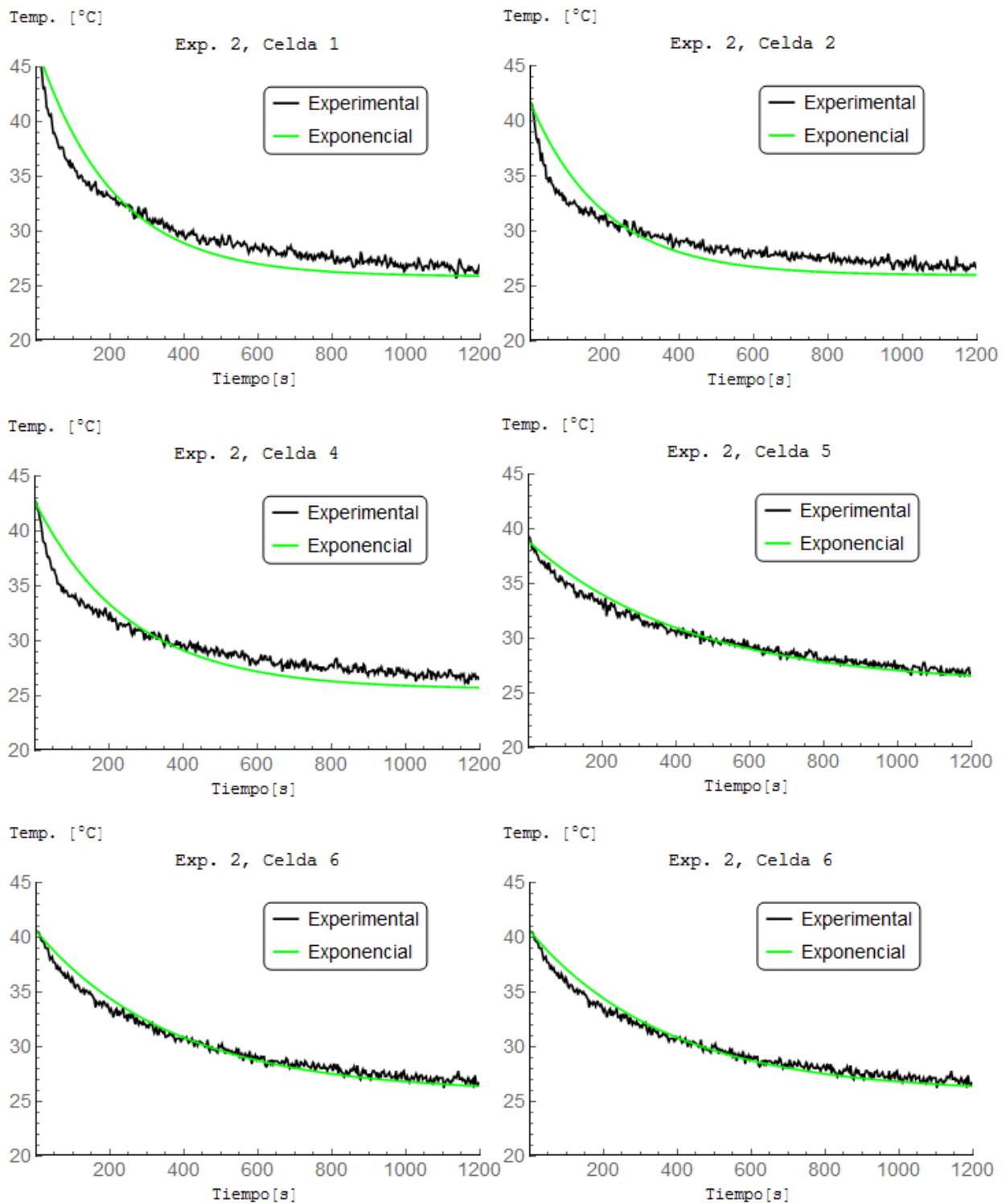


Figura 7-36: Ajuste Exponencial Exp. 2

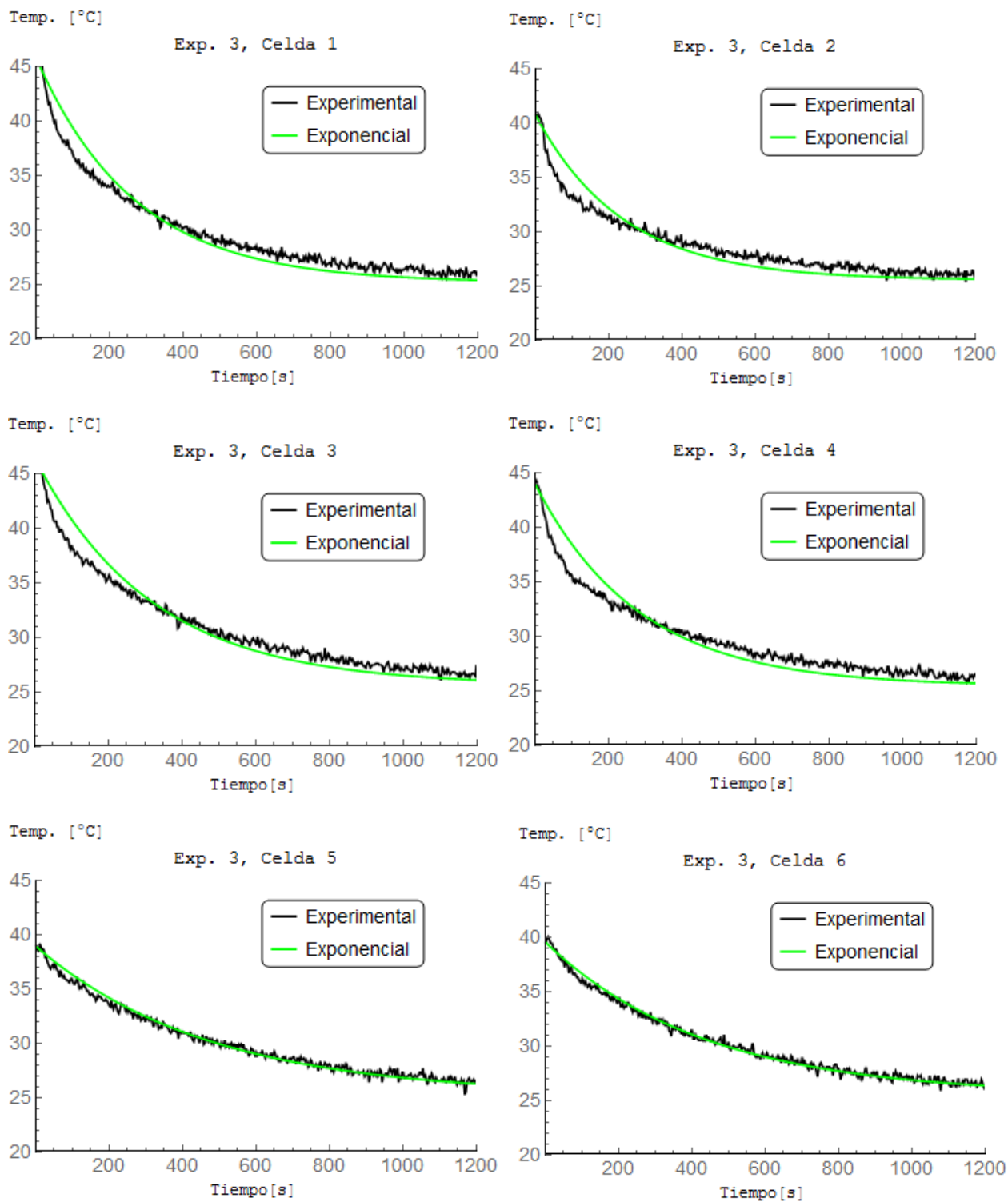


Figura 7-37: Ajuste Exponencial Exp. 3

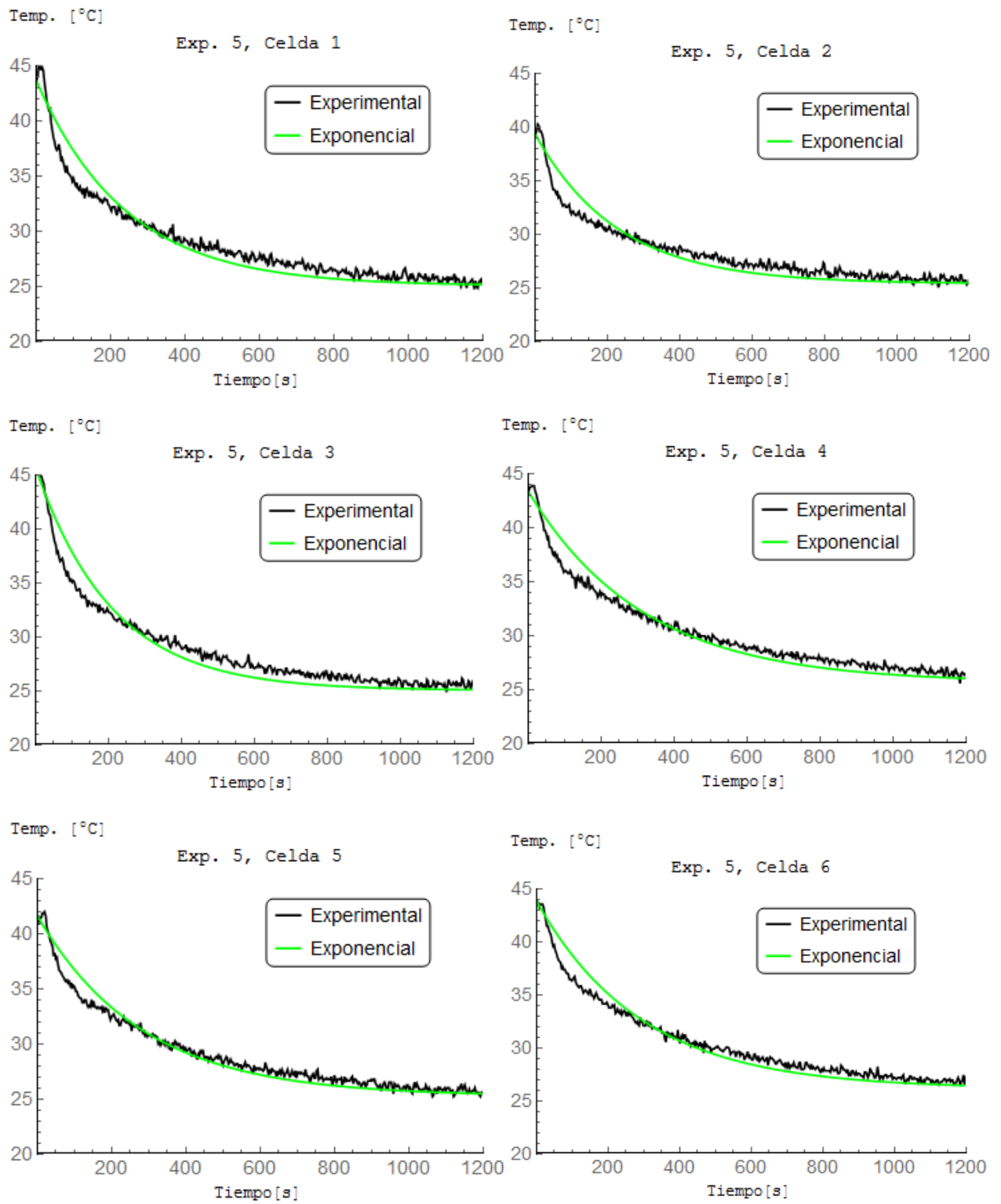


Figura 7-38: Ajuste Exponencial Exp. 5

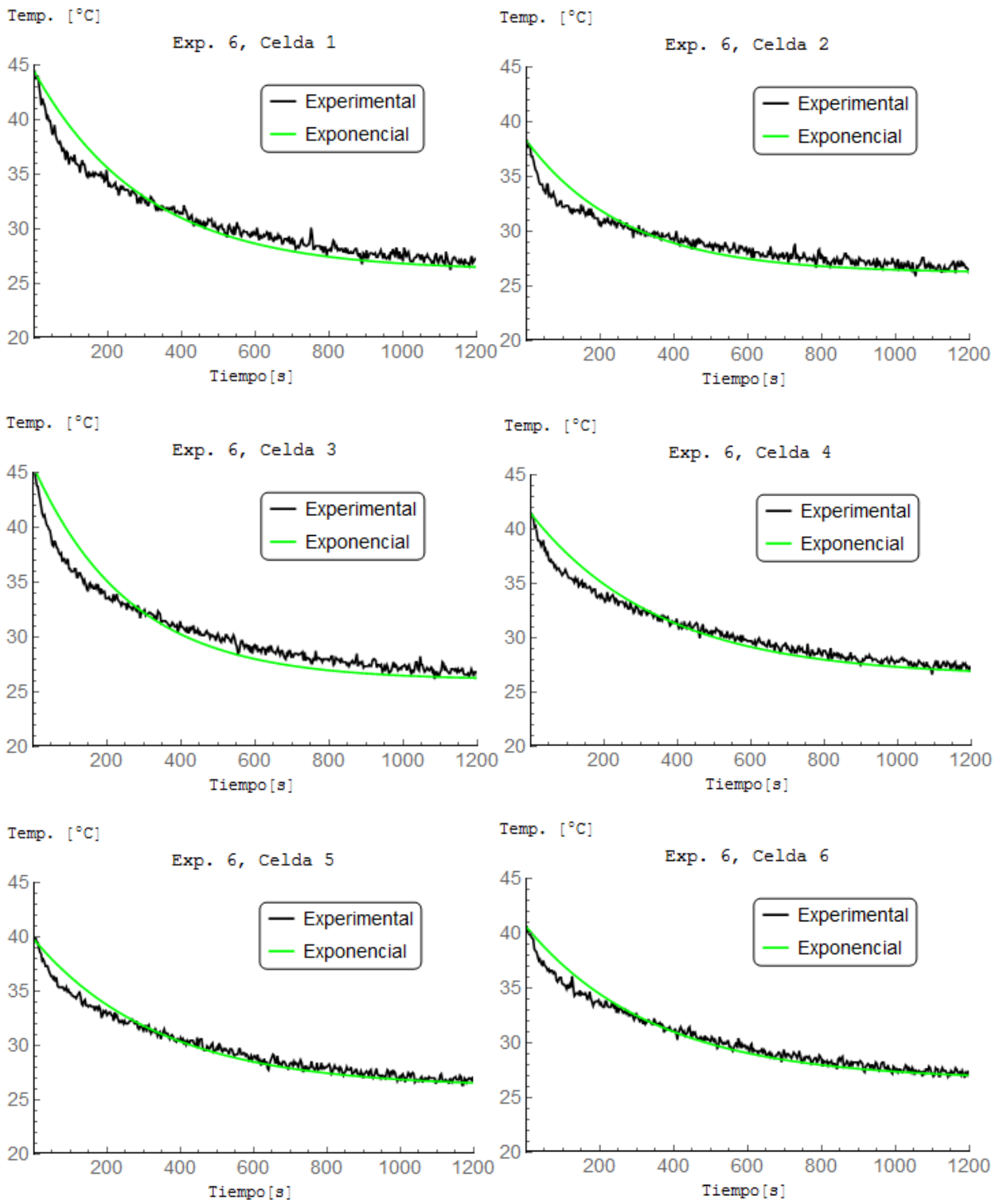


Figura 7-39: Ajuste Exponencial Exp. 6

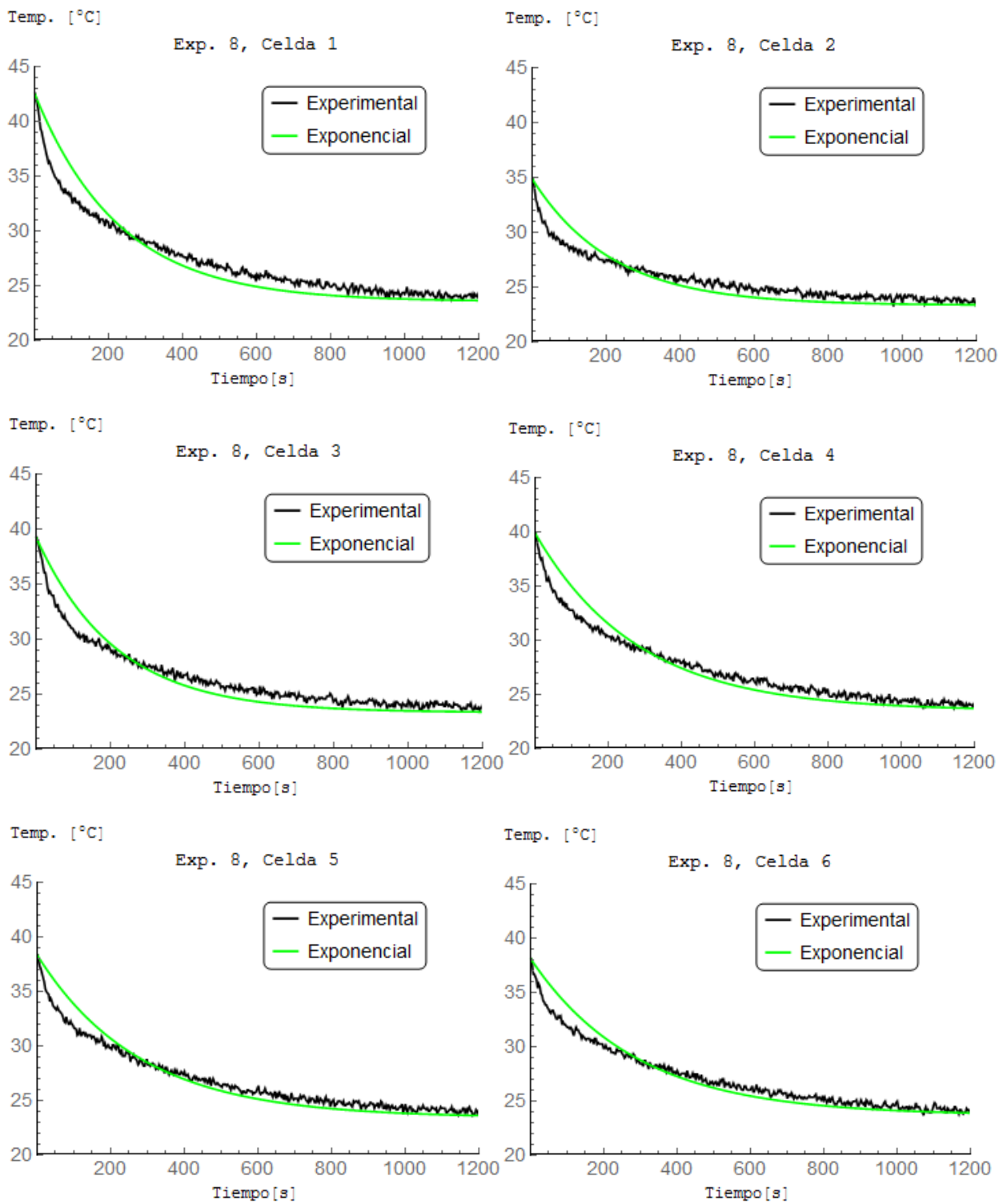


Figura 7-40: Ajuste Exponencial Exp. 8

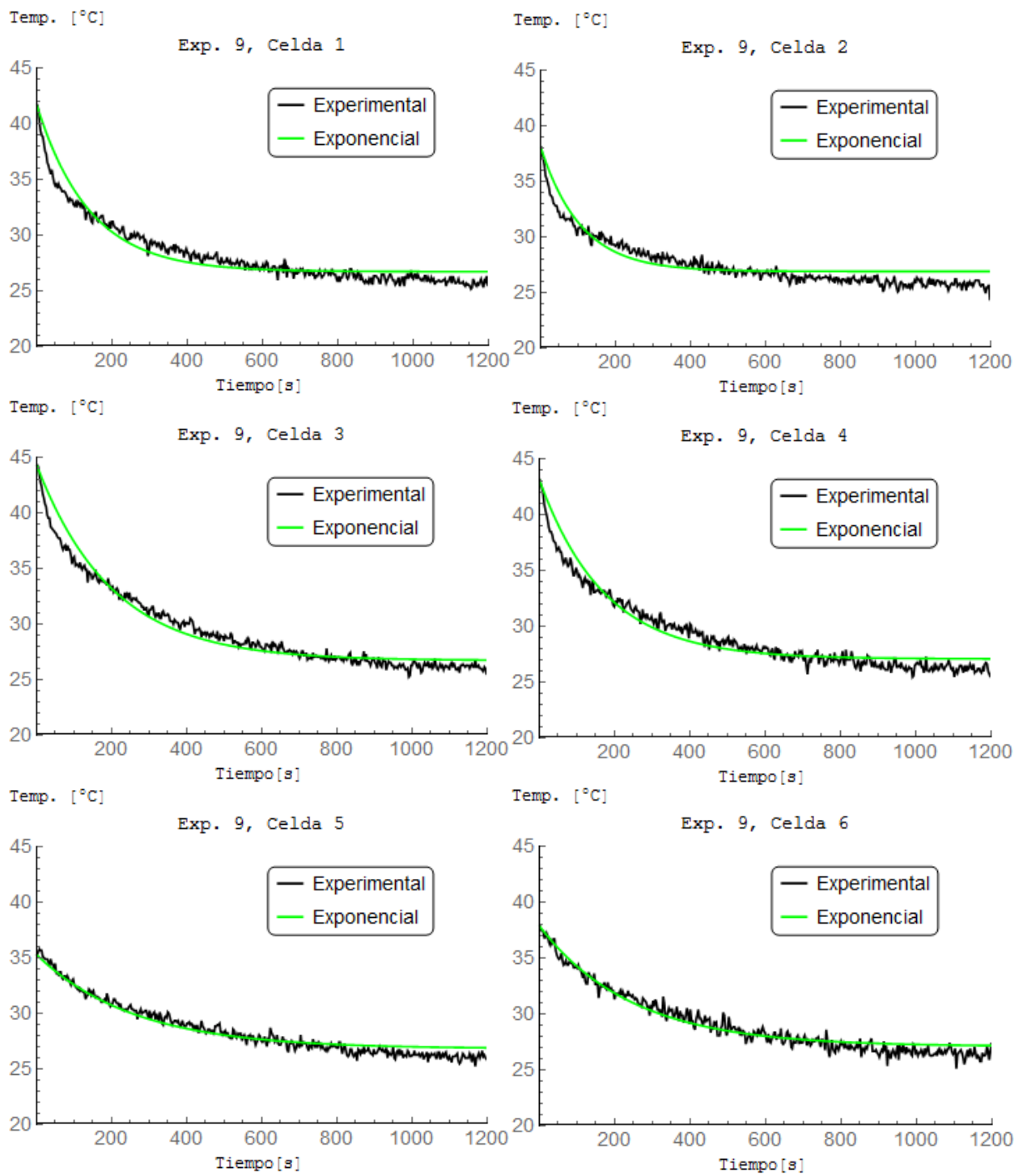


Figura 7-41: Ajuste Exponencial Exp. 9

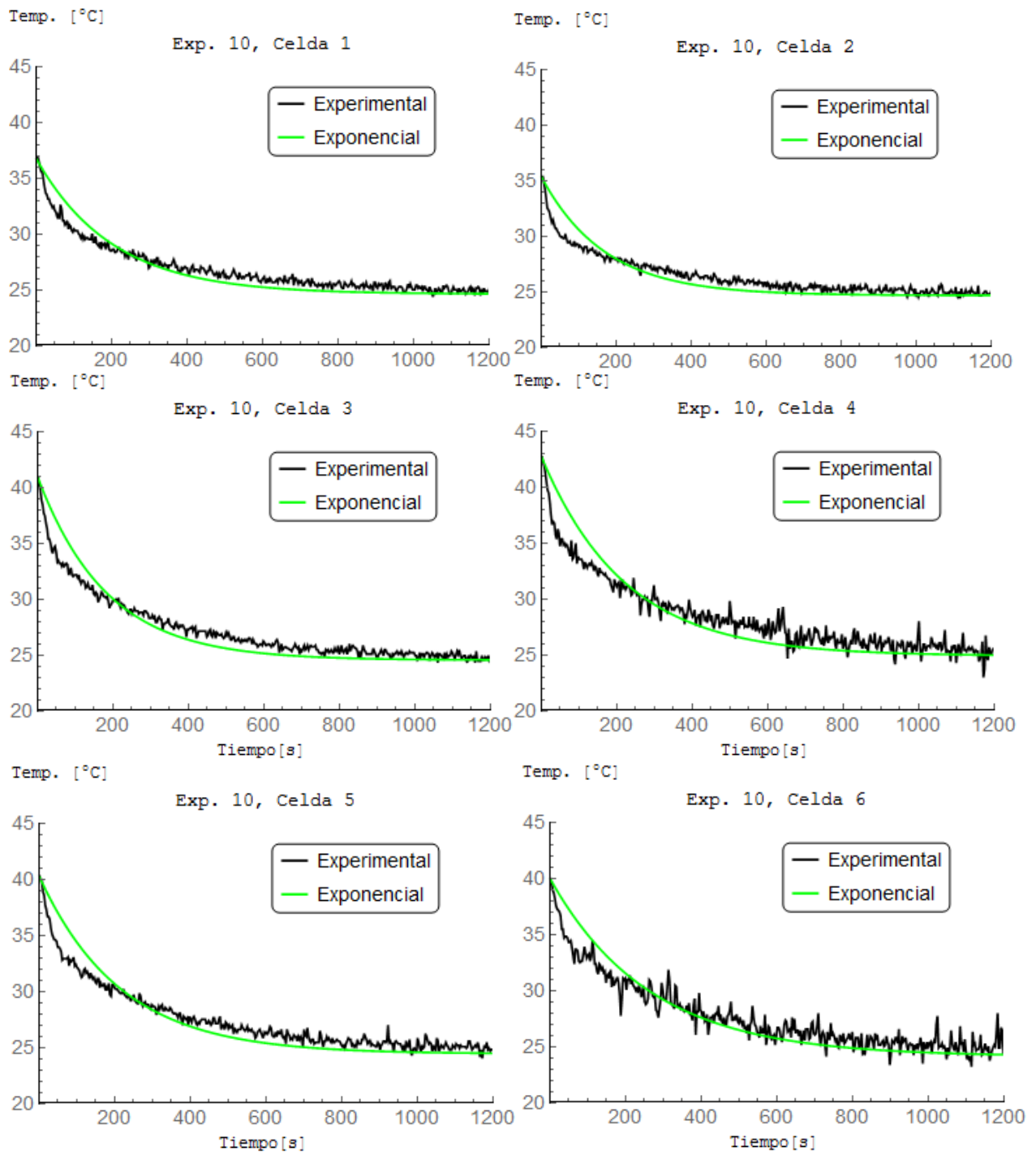


Figura 7-42: Ajuste Exponencial Exp. 10

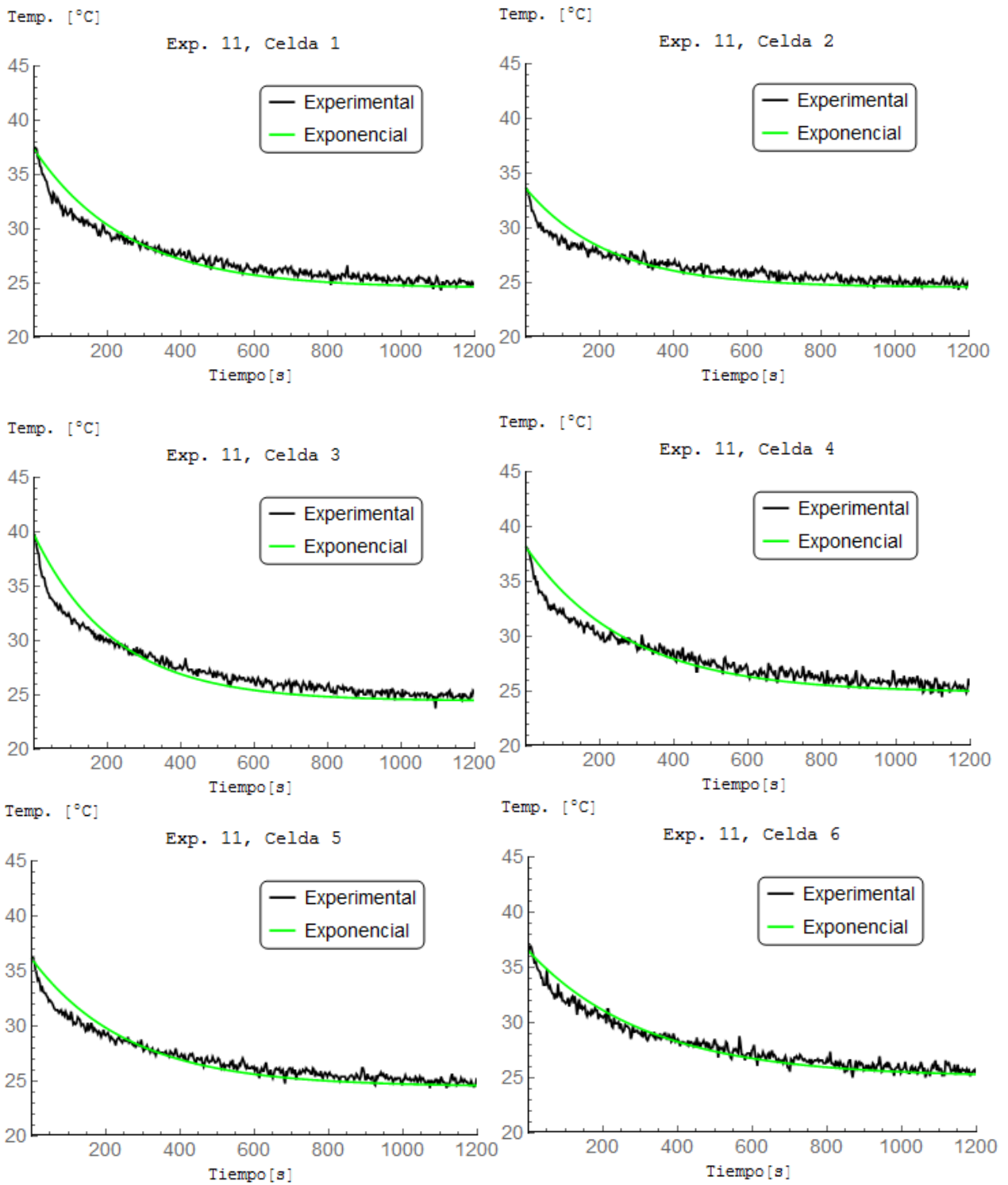


Figura 7-43: Ajuste Exponencial Exp. 11

I. Metodología Modelo Paramétrico

Capítulo 3

Metodología

3.1. Geometría y Condiciones del Experimento.

La geometría básica que se utilizó para realizar la simulación consta de 5 celdas de 10 mm de diámetro, las cuales están en serie. El volumen de control es de 100 mm de alto, 200 mm de ancho y 5 mm de profundidad, debido a que no es del interés de esta simulación el cálculo térmico de una celda completa, debido a que presenta homogeneidad en cuanto a su carga térmica.

Las condiciones iniciales de temperatura son de 50° Celsius para las celdas de litio en un ambiente de 20° Celsius. Como condiciones de borde del experimento, por la cara izquierda del volumen de control ingresa aire a 20° Celsius a velocidades de 40, 60 o 90 $\frac{km}{hora}$. Esto da como resultado Reynolds de 7306, 10959 y 16439.

El objetivo es determinar la inercia de enfriamiento de distintos arreglos de baterías de litio, que se diferencian en las distintas posiciones de las celdas. Esta inercia es medida mediante el tiempo necesario para que las celdas de litio lleguen a una temperatura de 21,5 ° Celsius, que corresponde al 5 % faltante de la convergencia.

3.2. Pruebas de Mallado

El mallado más importante dentro de la simulación se centra en los bordes de las celdas de litio, en donde se produce la capa límite térmica. En la prueba de mallado, se modificó la fineza en el mallado de los contornos de las celdas para ver la influencia del número de elementos en la simulación y llegar a la independencia de malla. Además, se ocupó una configuración tetraédrica, pues se requiere que los elementos sean normales a la superficie de las celdas.

Se realizaron pruebas con 16068, 35911, 90627 y 201269 (Figura 3.1) elementos.

De los resultados en la Figura 3.2, se desprende que a partir de los 90000 elementos, las curvas presentan una diferencia menor al 5 % entre ellas, llegando a la independencia de malla y por ende, no se presentarán errores numéricos en las simulaciones que ocupe este tipo de mallas.

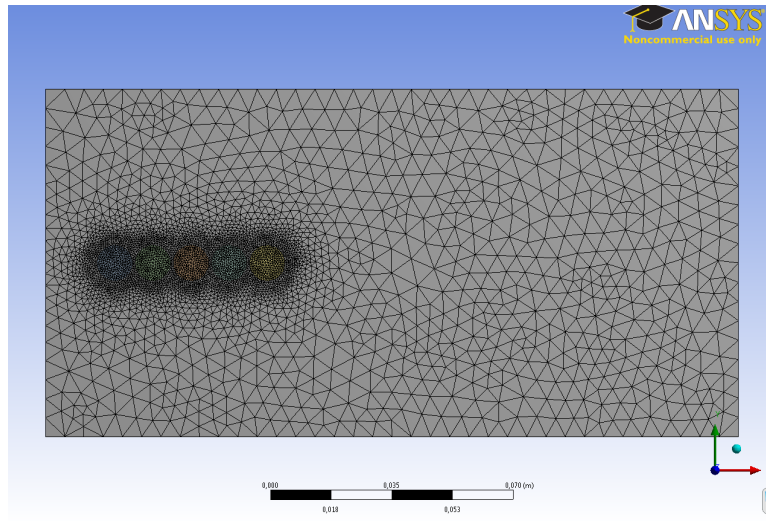


Figura 3.1: Malla 201269 elementos

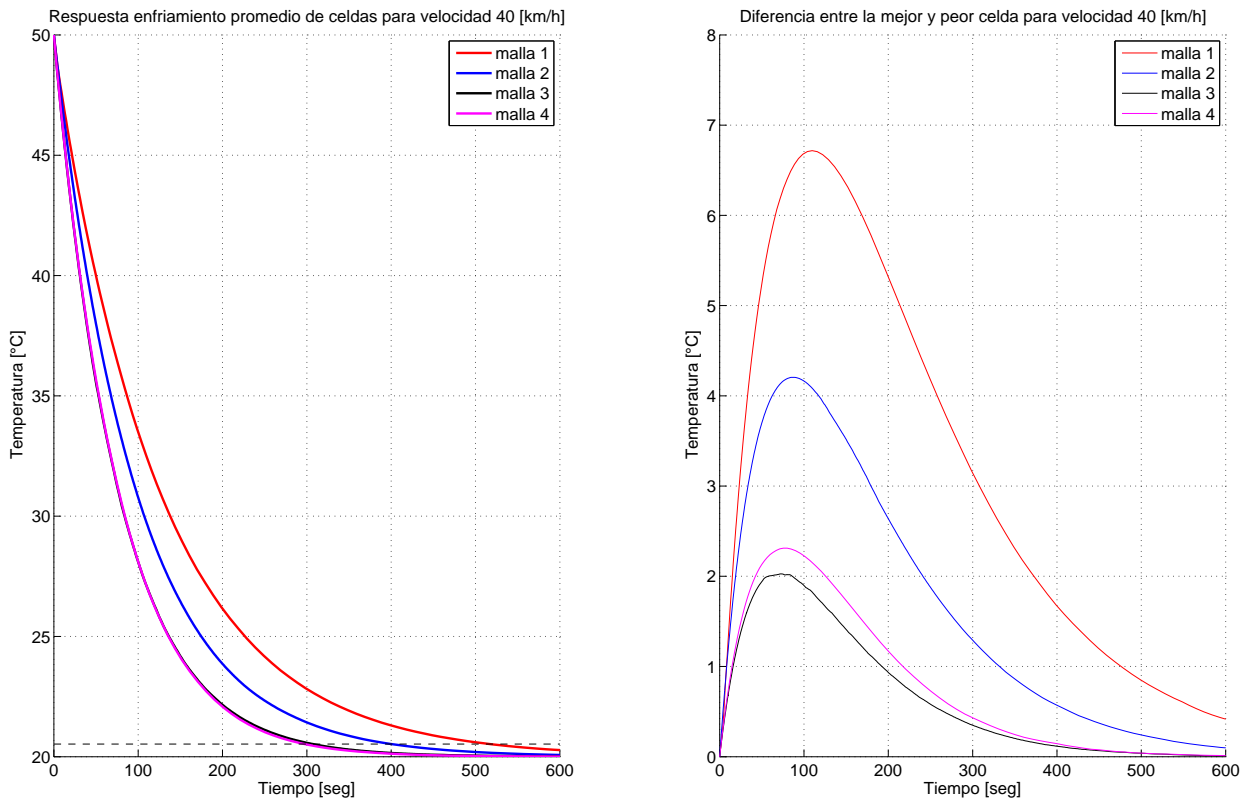


Figura 3.2: Curvas de temperatura para distintas mallas

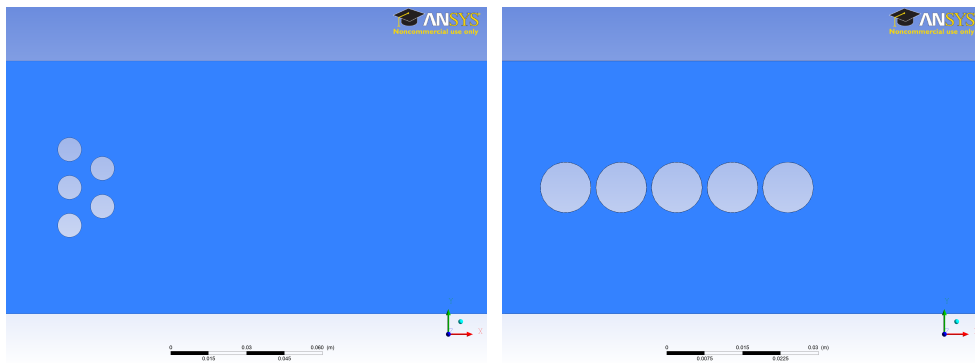


Figura 3.3: Configuración tipo “Intercambiador” y “En Línea”

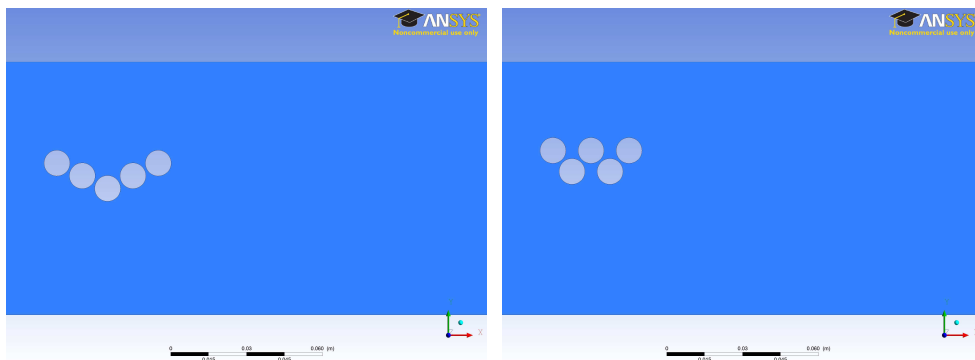


Figura 3.4: Configuración “en V” y “en W”

3.3. Configuraciones Estudiadas

Se ocuparon distintos arreglos de baterías, con el fin de relacionar la inercia térmica con su disposición geométrica. Para esto, se modificó el volumen de control donde se realiza el estudio, la posición geométrica de cada celda, la velocidad del flujo de aire de entrada y su temperatura.

Entre las configuraciones ocupadas, se destacan la configuración en línea horizontal (Figura 3.3 b), celdas en paralelo (Figura 3.5) , configuraciones escalonadas (Figura 3.4) y configuraciones que siguen la tendencia de la literatura de intercambiadores (Figura 3.3 a).

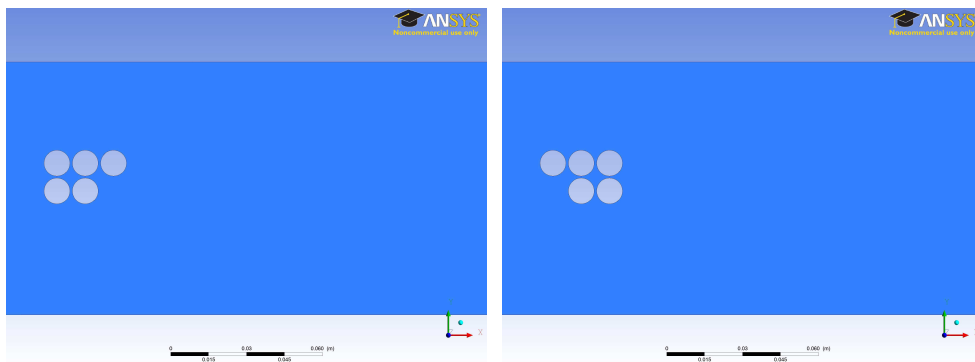


Figura 3.5: Configuraciones con celdas en paralelo

3.4. Análisis de Datos

Luego de simular los casos, se obtendrán los datos de la evolución temporal de la temperatura. Estos datos se utilizarán para generar un modelo parametrizado que represente el comportamiento térmico de las celdas de litio. Este modelo deberá relacionar las variables de posición, temperatura del aire, velocidad del aire, entre otros.

J. Incerteza Comp. (FMK)

Quit

Clear all

```
E1 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp1_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E2 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp2_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E3 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp3_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E4 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp4_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E5 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp5_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E6 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp6_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E7 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp7_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E8 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp8_enfriamiento.xls", "Data" ];
E9 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp9_enfriamiento.xls", "Data" ];
E10 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp10_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E11 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp11_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
(*E12 = Import["\\\\172.17.50.14\\EOBLi\\Laboratorio\\Experimentos
Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
```

```

Francisco\\Enfriamiento\\Exp12_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E13 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp13_enfriamiento.xlsx", "Data" ];*)
E12 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp14_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E13 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp15_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E14 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp16_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E15 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp17_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E16 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp18_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
(*E19b = Import["\\\\172.17.50.14\\EOB\\Li\\Laboratorio\\Experimentos
Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp19_enfriamiento.xlsx", "Data" ];*)
E17 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp20_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E18 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp21_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E19 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp22_enfriamiento.xlsx", "Data" ];
E20 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\Exp23_enfriamiento.xlsx", "Data" ];(**)

```

```

11 = Length[E1[[1]]];
12 = Length[E2[[1]]];
13 = Length[E3[[1]]];
14 = Length[E4[[1]]];
15 = Length[E5[[1]]];
16 = Length[E6[[1]]];
17 = Length[E7[[1]]];
18 = Length[E8[[1]]];
19 = Length[E9[[1]]];
110 = Length[E10[[1]]];
111 = Length[E11[[1]]];
(*112 = Length[E12[[1]]];
113 = Length[E13[[1]]];*)
112 = Length[E12[[1]]];
113 = Length[E13[[1]]];
114 = Length[E14[[1]]];
115 = Length[E15[[1]]];
116 = Length[E16[[1]]];
(*119 = Length[E19[[1]]];*)
117 = Length[E17[[1]]];
118 = Length[E18[[1]]];
119 = Length[E19[[1]]];
120 = Length[E20[[1]]]; (**

L = {11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 110, 111,
      112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120(*,121,122,123*)};
EXP = List[E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13,
           E14, E15, E16, E17, E18, E19, E20(*,E21,E22,E23*)];

```

```

max = Max[L];
A = {};
clear EXP0;
(* contador de experimento*)
For[i = 1, i ≤ 20, i++,
  Eaux = EXP[[i]];
  laux = L[[i]];
  (* primero se realiza proceso con el tiempo*)
  Taux = Eaux[[1]][[1 ;; laux, 1]];
  For[k = 1, k ≤ max - laux, k++, AppendTo[Taux, Taux[[laux]] + 3 * k]];
  TempC1 = Eaux[[1]][[1 ;; laux, 1 + 1]];
  TempC2 = Eaux[[1]][[1 ;; laux, 2 + 1]];
  TempC3 = Eaux[[1]][[1 ;; laux, 3 + 1]];
  TempC4 = Eaux[[1]][[1 ;; laux, 4 + 1]];
  TempC5 = Eaux[[1]][[1 ;; laux, 5 + 1]];
  TempC6 = Eaux[[1]][[1 ;; laux, 6 + 1]];
  For[k = laux + 1, k ≤ max, k++,
    AppendTo[TempC1, Mean[TempC1[[laux - 20 ;; laux]]]];
    For[k = laux + 1, k ≤ max, k++, AppendTo[TempC2, Mean[TempC2[[laux - 20 ;; laux]]]];
    For[k = laux + 1, k ≤ max, k++, AppendTo[TempC3, Mean[TempC3[[laux - 20 ;; laux]]]];
    For[k = laux + 1, k ≤ max, k++, AppendTo[TempC4, Mean[TempC4[[laux - 20 ;; laux]]]];
    For[k = laux + 1, k ≤ max, k++, AppendTo[TempC5, Mean[TempC5[[laux - 20 ;; laux]]]];
    For[k = laux + 1, k ≤ max, k++, AppendTo[TempC6, Mean[TempC6[[laux - 20 ;; laux]]]];
  EXP0 = List[Taux, TempC1, TempC2, TempC3, TempC4, TempC5, TempC6];
  A = Join[A, {EXP0}];
];
(* Entrega la matriz 3D A, de dimensiones 20,7,max*)

```

```

a = 0.7;
b = 0.7;
m = 0;
TablaDatos = {}; (*"Exp.", "Celda", "Tau", "R2", "MaxErr"*)
For[i = 1, i ≤ 20, i++,
  Eaux = Transpose[A[[i]]];
  (*if para enumerar correctamente los experimentos*)
  m = If [i == 12, m = m + 2, m];
  m = If [i == 19, m = m + 1, m];
  For[j = 1, j ≤ 6, j++,
    Tiempaux = Eaux[[1 ;; max, 1]];
    Tempaux = Eaux[[1 ;; max, j + 1]];
    T0aux = Tempaux[[1]];
    Tfau = Mean[Tempaux[[max - 20 ;; max]]];
    TTaux = Table[{Tiempaux[[k]], Tempaux[[k]]}, {k, 1, max}];
    nlmaux = NonlinearModelFit[TTaux,
      (T0aux - Tfau) * Exp[-(x^1) / τ] + Tfau, {τ}, x, ConfidenceLevel → .9];
    (*Normal[%]*)
    Data = {i + m, j, nlmaux["BestFitParameters"][[1]][[2]],
      nlmaux["RSquared"], Max[Abs[nlmaux["FitResiduals"]]]};
    d = ListLinePlot[{Table[{Tiempaux[[k]], Tempaux[[k]]}, {k, 1, max}],
      Table[{Tiempaux[[k]], nlmaux[Tiempaux[[k]]}], {k, 1, max}}],
      PlotRange → {{0, 1200}, {20, 45}}, PlotStyle → {Black, Green},
      PlotLabel → Style[StringJoin["Exp. ", ToString[i + m], " Celda ", ToString[j]],
        FontFamily → "Courier", Black, FontSize → 14], PlotLegends →
        Placed[LineLegend[Automatic, {"Experimental", "Exponencial"}, LabelStyle → 14,
          LegendFunction → "Frame"], {a, 0.8}], AxesStyle → 14, ImageSize → Medium];
    r = StringJoin["Celda ", ToString[j]];
    Labeled[d, {"Temp. [°C]", Tiempo [s]}, {{Top, Left}, Bottom}] // Print;
    TablaDatos = Join[TablaDatos, {Data}]]]
TablaDatos = Join[{"Exp." {"Celda"} {"Tau"} {"R2"} {"MaxErr"}}, TablaDatos];

Export[
  "\\172.17.50.14\\EOBLi\\Laboratorio\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos
  Térmicos Ordenados Francisco\\Enfriamiento\\TablaResumen.xlsx", TablaDatos]

```


K. FittingParamétrico(FMK)

```

Quit
Clear all

E1 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\TauAlineados.xlsx", "Data" ];
E2 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\TauEscalonado.xlsx", "Data" ];

a = 0.7;
b = 0.7;
TablaDatos1 = {}; (*"Celda", "Gamma", "Beta", "R2", "MaxErr"*)
For[j = 1, j ≤ 6, j++,
Velaux = E1[[1]][[1]][[ ; ]];
Tauaux = E1[[1]][[j + 1]][[ ; ]];
VTaux = Table[{Velaux[[k]], Tauaux[[k]]}, {k, 1, 3}];
nlmaux = NonlinearModelFit[VTaux, delta + beta / v, {delta, beta}, v];
Data = {j, nlmaux["BestFitParameters"][[1]][[2]],
nlmaux["BestFitParameters"][[2]][[2]],
nlmaux["RSquared"], Max[Abs[nlmaux["FitResiduals"]]]];
TablaDatos1 = Join[TablaDatos1, {Data}]
TablaDatos1 = Join[{"Celdas Alineadas"},
{"Celda"} {"Delta"} {"Beta"} {"R2"} {"MaxErr"}}, TablaDatos1];
TablaDatos2 = {}; (*"Celda", "Gamma", "Beta", "R2", "MaxErr"*)
For[j = 1, j ≤ 6, j++,
Velaux = E2[[1]][[1]][[ ; ]];
Tauaux = E2[[1]][[j + 1]][[ ; ]];
VTaux = Table[{Velaux[[k]], Tauaux[[k]]}, {k, 1, 4}];
nlmaux = NonlinearModelFit[VTaux, delta + beta / v, {delta, beta}, v];
Data = {j, nlmaux["BestFitParameters"][[1]][[2]],
nlmaux["BestFitParameters"][[2]][[2]],
nlmaux["RSquared"], Max[Abs[nlmaux["FitResiduals"]]]];
TablaDatos2 = Join[TablaDatos2, {Data}]
TablaDatos2 = Join[{"Celdas Escalonadas"},
{"Celda"} {"Delta"} {"Beta"} {"R2"} {"MaxErr"}}, TablaDatos2];

TablaDatos = Join[TablaDatos1, TablaDatos2];

Export["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\TablaResumenParametrico.xlsx", TablaDatos]
C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12° Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo
Laboratorio\\Respaldo 2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos
Térmicos Ordenados Francisco\\Enfriamiento\\TablaResumenParametrico.xlsx

```

```

"\\\\172.17.50.14\\EOBli\\Laboratorio\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos
  Térmicos Ordenados Francisco\\Enfriamiento\\TablaResumenParamétrico.xlsx"
\\\\172.17.50.14\\EOBli\\Laboratorio\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos
  Térmicos Ordenados Francisco\\Enfriamiento\\TablaResumenParamétrico.xlsx

For[j = 1, j ≤ 6, j++,

  Velaux = E2[[1]][[1]][[ ; ; ]];
  Tauaux = E2[[1]][[j + 1]][[ ; ; ]];
  VTaux = Table[{Velaux[[k]], Tauaux[[k]]}, {k, 1, 4}];
  nlmaux = NonlinearModelFit[VTaux, delta + beta / v, {delta, beta}, v];
  d = ListLinePlot[{Table[{Velaux[[k]], Tauaux[[k]]}, {k, 1, 4}],
    Table[{Velaux[[k]], nlmaux[Velaux[[k]]}], {k, 1, 4}}],
    PlotRange → {{1.7, 4}, {0, 500}}, PlotStyle → {Black, Blue},
    PlotLabel → Style[StringJoin["Celda ", ToString[j]],
      FontFamily → "Courier", Black, FontSize → 14], PlotLegends → Placed[
      LineLegend[Automatic, {"Experimental", "Modelo Paramétrico"}], LabelStyle → 14,
      LegendFunction → "Frame", {a, 0.8}], AxesStyle → 14, ImageSize → Medium];
  r = StringJoin["Celda ", ToString[j]];
  Labeled[d, {Tau [s], Vel. Promedio ["m/s"], hola},
    {{Top, Left}, Bottom, Top}] // Print]

```

```

TablaDatos1 = {}; (*"Celda", "Gamma", "Beta", "R2", "MaxErr"*)
Clear Data;
For[j = 1, j ≤ 6, j++,
  elaux = E1[[1]][[1]][[ ; ; ]];
  Tauaux = E1[[1]][[j + 1]][[ ; ; ]];
  VTaux = Table[{Velaux[[k]], Tauaux[[k]]}, {k, 1, 3}];
  nlmaux = NonlinearModelFit[VTaux, a1 * v^2 + a2 * v + a3, {a1, a2, a3}, v];
  Data = {j, nlmaux["BestFitParameters"][[1]][[2]],
    nlmaux["BestFitParameters"][[2]][[2]],
    nlmaux["BestFitParameters"][[3]][[2]]};
  TablaDatos1 = Join[TablaDatos1, {Data}]
TablaDatos1 = Join[{"Celdas Alineadas"}, {"a1"} {"a2"} {"a3"}}, TablaDatos1]
TablaDatos2 = {}; (*"Celda", "Gamma", "Beta", "R2", "MaxErr"*)
For[j = 1, j ≤ 6, j++,
  Velaux = E2[[1]][[1]][[ ; ; ]];
  Tauaux = E2[[1]][[j + 1]][[ ; ; ]];
  VTaux = Table[{Velaux[[k]], Tauaux[[k]]}, {k, 1, 4}];
  nlmaux = NonlinearModelFit[VTaux, a1 * v^2 + a2 * v + a3, {a1, a2, a3}, v];
  Data = {j, nlmaux["BestFitParameters"][[1]][[2]],
    nlmaux["BestFitParameters"][[2]][[2]],
    nlmaux["BestFitParameters"][[3]][[2]]};
  TablaDatos2 = Join[TablaDatos2, {Data}]
TablaDatos2 = Join[{"Celdas Escalonadas"}, {"a1"} {"a2"} {"a3"}}, TablaDatos2];
TablaDatos = Join[TablaDatos1, TablaDatos2];
Export["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12°
Semestre\\Trabajo de Título\\Respaldo Laboratorio\\Respaldo
2\\Experimentos Memoria Fco. Moser\\Datos Térmicos Ordenados
Francisco\\Enfriamiento\\TablaResumenParametricoPolinomio.xlsx", TablaDatos]

```

L. EvaluaciónMVF

Quit

Clear all

```
In[1]= E1 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12° Semestre\\Trabajo de
        Título\\Respaldo Laboratorio\\CFD\\Resultados MVF\\dp0-30.csv", "Data" ];
E2 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12° Semestre\\Trabajo de
        Título\\Respaldo Laboratorio\\CFD\\Resultados MVF\\dp1-30.csv", "Data" ];
E3 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12° Semestre\\Trabajo de
        Título\\Respaldo Laboratorio\\CFD\\Resultados MVF\\dp2-30.csv", "Data" ];
E4 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12° Semestre\\Trabajo de
        Título\\Respaldo Laboratorio\\CFD\\Resultados MVF\\dp0-25.csv", "Data" ];
E5 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12° Semestre\\Trabajo de
        Título\\Respaldo Laboratorio\\CFD\\Resultados MVF\\dp1-25.csv", "Data" ];
E6 = Import["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12° Semestre\\Trabajo de
        Título\\Respaldo Laboratorio\\CFD\\Resultados MVF\\dp2-25.csv", "Data" ];
EXP = List[E1, E2, E3, E4, E5, E6];
```

```
In[45]= TablaDatos = {};
For[i = 1, i ≤ 6, i++,
  For[j = 1, j ≤ 6, j++,
    EXPi = EXP[[i]];
    Laux = Length[EXPi];
    t = EXPi[[2 ;; Laux, 0 + 2]];
    T = EXPi[[2 ;; Laux, j + 2]];
    Largo = Laux - 1;
    TTaux = Table[{t[[k]], T[[k]]}, {k, 1, Largo}];
    T0aux = T[[1]];
    Tfaux = 20 + 273;
    nlmaux = NonlinearModelFit[TTaux,
      (T0aux - Tfaux) * Exp[-(x^1) / τ] + Tfaux, {τ}, x, ConfidenceLevel → .9];
    Data = {i, j, nlmaux["BestFitParameters"][[1]][[2]],
      nlmaux["RSquared"], Max[Abs[nlmaux["FitResiduals"]]]};
    d = ListLinePlot[{Table[{t[[k]], T[[k]] - 273}, {k, 1, Largo}],
      Table[{t[[k]], nlmaux[t[[k]] - 273}, {k, 1, Largo}]},
      PlotRange → {{0, 4000}, {20, 50}}, PlotMarkers → Automatic,
      PlotLabel → Style[StringJoin["v", ToString[i], "C", ToString[j]],
        FontFamily → "Courier", Black, FontSize → 14], PlotLegends →
        Placed[LineLegend[Automatic, {"Experimental", "Exponencial"}, LabelStyle → 14,
          LegendFunction → "Frame", {0.7, 0.8}], AxesStyle → 14, ImageSize → Medium];
      Labeled[d, {"Temp. [C]", "Tiempo[s]"}, {{Top, Left}, Bottom}] // Print;
    TablaDatos = Join[TablaDatos, {Data}];]
TablaDatos = Join[{"Vel."}, {"Celda"}, {"Tau"}, {"R2"}, {"MaxErr"}], TablaDatos];
```

```
In[11]= Export["C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12° Semestre\\Trabajo de
        Título\\Respaldo Laboratorio\\CFD\\TablaResumenMVF.xlsx", TablaDatos]
```

```
Out[11]= C:\\Users\\Francisco\\Desktop\\Ingenieria\\12° Semestre\\Trabajo
        de Título\\Respaldo Laboratorio\\CFD\\TablaResumenMVF.xlsx
```