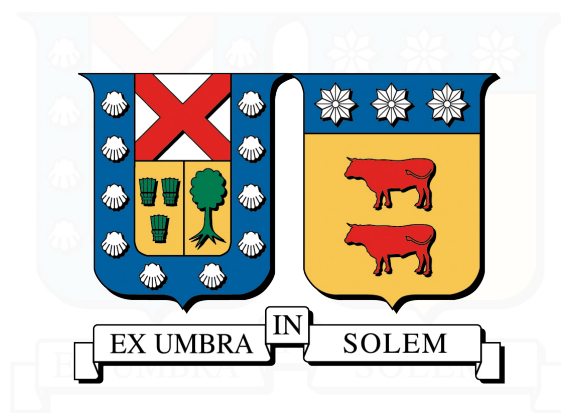


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO - CHILE



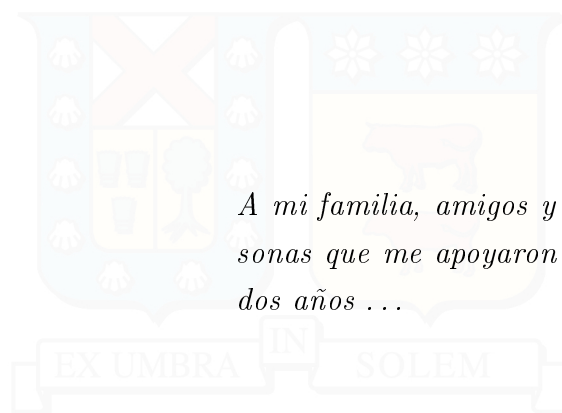
**PRUEBAS DE INFLAMABILIDAD A ESCALA DE LABORATORIO PARA
OPTIMIZAR LA EFECTIVIDAD DEL TRATAMIENTO DE
RETARDANTE DE FUEGO EN COMBUSTIBLES DE ÁREAS
FORESTALES**

CARLOS IGNACIO ÁLVAREZ AÑASCO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA	:	DR. RODRIGO DEMARCO B.
PROFESOR CORREFERENTE INTERNO	:	DR. FELIPE ESCUDERO B.
PROFESOR CORREFERENTE EXTERNO	:	DR. PEDRO RESZKA C.

DICIEMBRE 2024



A mi familia, amigos y todas las personas que me apoyaron durante estos dos años . . .

AGRADECIMIENTOS

En este segundo proceso que vivo en la universidad me gustaría agradecer a todas las personas que fueron parte de él no tan solo en lo académico, sino que también, en mi día a día como persona. En primer lugar, me gustaría partir agradeciendo a mi mamá y a mi hermana que son las personas que me han acompañado desde el primer al último día. Agradecer también a mi prima Fernanda y a su marido Juan, que junto a sus dos niños hemos compartido muchos momentos durante estos dos años y me dieron la oportunidad de ser padrino de uno de ellos. Agradecer a mi tía y a mi primo Alonso con quienes también he podido compartir muchos momentos durante este tiempo. Agradecer a mi yaya por todo el cariño y preocupación que siempre me ha entregado. Agradecer a Cami, mi compañera, con quien comparto mi día a día a pesar de la distancia en la que nos encontramos este año, pero que de igual manera me entrega su amor a través de cartas, mensajes y llamadas.

En segundo lugar me gustaría agradecer a los viejos amigos que se han mantenido en esta segunda etapa y a los nuevos que llegaron, agradecer a Pizarro, Pedro, Curi, Javier, Mari, Fran S., Pipe, Mija, Nacho, Pablo, Basti, Fran C., Nico, Joaquina, Benja, Coni, Piru, Javi, Arias, Isa, Fernando, Calquín, Sergey, Chaparro, Mathi, Amanda, Traicy, Mancilla, Jano, Reveco, Toro, Andreas, Venla y los que se me puedan estar olvidando entre esta larga lista. Agradecer también con quienes compartí mis ramos durante estos dos años, intercambié ideas, discutí tareas y viajé a Santiago.

Finalmente, me gustaría agradecer al cuerpo académico del equipo EC2G, al profesor Rodrigo, al profesor Felipe, al profesor Andrés y al profesor Pedro, quien fue de gran ayuda para terminar este proceso. Agradecezo enormemente el apoyo que me brindó Goli, las conversaciones, los almuerzos y las risas.

Gracias a todas las personas que fueron parte de esta etapa y que muchas veces sin saberlo fueron el motor para levantarme y seguir adelante en este periodo, les estoy completamente agradecido.

RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio se centra en evaluar la efectividad de retardantes de fuego en combustibles forestales, con el objetivo de mejorar su desempeño en la prevención y mitigación de incendios en zonas urbano-forestales. La investigación aborda un problema importantísimo dado el aumento global de incendios severos, impulsado por el cambio climático, que ha generado una mayor demanda de herramientas eficaces para el control de estos desastres.

La metodología empleada consistió en realizar pruebas de inflamabilidad en el laboratorio utilizando dos equipos experimentales desarrollados completamente en Chile y que simulan de manera idealizada el fenómeno de ignición discontinua y continua: Idealized Firebrand Ignition Test (I-FIT) y Sensible heat Calorimetry Apparatus (SCALA), respectivamente. La diferencia radica en la superficie que está siendo calentada en cada aparato, siendo el caso de la ignición discontinua (I-FIT) una fuente de calor puntual que entrega un flujo de calor incidente a la muestra desde el centro hacia el radio externo de la misma, mientras que en el caso de la ignición continua (SCALA), el calor fluye desde dos paneles adyacentes e incide en toda la cara superior de la muestra. Se evaluaron tres concentraciones de retardante aplicadas a acículas de *Pinus radiata* D. Don, correspondientes a la dosis recomendada por el fabricante (20 %), la mitad y el doble de esta dosis (10 % y 40 %, respectivamente). También se analiza el caso sin aplicación de retardante para contrastar con las distintas concentraciones mencionadas.

Los resultados se analizaron bajo flujos radiativos constantes y se compararon con la teoría de ignición térmica para validar su aplicabilidad. En esta investigación, los resultados obtenidos destacan claramente el efecto del tratamiento con retardante sobre el comportamiento de ignición y combustión de las muestras. En particular, la presencia de retardantes ralentiza eficazmente los procesos de ignición y propagación de la llama, reduciendo las tasas de liberación de calor y la pérdida total de masa en comparación con los combustibles sin tratar. El flujo crítico de masa para la ignición en los combustibles tratados muestra un aumento de 30 – 60 % con respecto a los combustibles sin tratar, mostrando poca dependencia de la cantidad de retardante aplicada. Todos estos resultados apuntan a un mayor efecto del retardante de fuego en la fase sólida que en la fase gaseosa. Las diferencias fundamentales entre los dos modos de ignición también se destacan en los resultados, por ejemplo, en el

hecho de que la ignición por pavesas puede ocurrir en tiempos mucho más largos que la ignición radiante y que la configuración geométrica del proceso de ignición por pavesas produce flujos de calor críticos invariantes para la ignición.

De manera interesante, los resultados muestran que los efectos beneficiosos del tratamiento con retardante de fuego se vuelven menos pronunciados más allá de $\sigma_{ret} = 20\%$. Por lo tanto, estos resultados destacan una oportunidad para optimizar el uso de estos productos utilizando dispositivos de inflamabilidad a escala de laboratorio, dependiendo del uso final previsto. Esto es particularmente importante en aplicaciones futuras en áreas de interfaz urbano-forestal (WUI), donde la ignición por pavesas juega un papel importante. Sin embargo, se requiere más investigación fundamental para avanzar en este camino de optimización, especialmente para determinar cómo se extrapolan estos resultados a pequeña escala al comportamiento a gran escala.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Problema de investigación	2
2. Objetivos	4
2.1. Objetivo General	4
2.2. Objetivos Específicos	4
3. Hipótesis	6
4. Fundamentos del Estudio Experimental	7
4.1. Fenómeno de un incendio Forestal	9
4.1.1. Descripción	9
4.1.2. Condiciones necesarias	9
4.1.3. Tipos de Incendio	9
4.1.4. Propagación de Incendios por Spotting	13
4.2. Mecanismos de Transferencia de Calor	14
4.2.1. Conducción	14
4.2.2. Convección	15
4.2.3. Radiación	16
4.3. Teoría de Ignición de Sólidos	17
4.3.1. Introducción	17
4.3.2. Descripción	18
4.3.3. Ignición piloteada	21
4.3.4. Ignición Espontánea	22
4.3.5. Ignición continua	23
4.3.6. Ignición discontinua	23

4.3.7. Ignición en sólidos Thermmally Thin	24
4.3.8. Ignición en sólidos Thermally Thick	27
4.3.9. Consideraciones	32
4.4. Biomasa	40
4.4.1. Densidad de masa	40
4.4.2. Densidad aparente	41
4.4.3. Packing ratio y porosidad	41
4.5. Retardantes de llama	42
5. Diseño Experimental	46
5.1. Equipo experimental Idealized Firebrand Ignition Test (I-FIT)	47
5.1.1. Descripción	47
5.1.2. Heater: propiedades físicas y radiativas	48
5.1.3. Radiómetro	50
5.1.4. Motor lineal	51
5.1.5. Recipiente porta muestras (basket)	52
5.1.6. Termocuplas	53
5.1.7. Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)	54
5.1.8. Piloto (Kanthal)	54
5.1.9. Variac	54
5.1.10. Cámara Basler	55
5.2. Equipo experimental Sensible heat Calorimetry Apparatus (SCALA)	55
5.2.1. Descripción	55
5.2.2. Heater	56
5.2.3. Piloto	57
5.2.4. Recipiente porta muestras (basket)	58
5.2.5. Termocuplas	59
5.2.6. Celda de carga	60
5.2.7. Entrada de aire	60
5.3. Equipos adicionales de apoyo	60
5.3.1. Horno y Cámara de humedad	61
5.3.2. Picnómetro	61
5.3.3. Balanza	62
6. Metodología	63
6.1. Metodología de extracción de muestras	64
6.2. Metodología de secado sin retardante	64

6.3. Metodología de aplicación de retardante	64
6.4. Metodología de secado con retardante	66
6.5. Metodología del cálculo de la densidad	66
6.6. Metodología del cálculo de la cantidad relativa de retardante	68
6.7. Metodología I-FIT	70
6.7.1. Calibración del heater	70
6.7.2. Cálculo de masa de combustible	72
6.7.3. Procedimiento experimental	73
6.8. Metodología SCALA	74
6.8.1. Calibración eléctrica de los paneles radiantes	74
6.8.2. Cálculo de masa de combustible	76
6.8.3. Procedimiento experimental	76
7. Resultados Experimentales	81
7.1. Registros visuales	81
7.2. Tiempos de retardo de ignición	84
7.3. Tasa de liberación de calor	85
7.4. Tasa de pérdida de masa	87
7.5. Análisis dimensional	89
8. Conclusiones	95

Índice de Tablas

5.1. Propiedades físicas y radiativas del compuesto del heater. Fuente: BACH Resistor Ceramics	50
6.1. Valores obtenidos para la cantidad relativa de retardante para cada una de las concentraciones. Fuente: elaboración propia.	70
6.2. Voltajes y sus respectivos flujos de calor incidentes utilizados en el I-FIT para la campaña experimental. Fuente: elaboración propia. . . .	72
6.3. Masa y densidad de combustible para cada concentración de retar- dante para el equipo I-FIT. Fuente: elaboración propia.	73
6.4. Masa y densidad de combustible para cada concentración de retar- dante en el equipo SCALA. Fuente: elaboración propia.	76
7.1. Flujo crítico de masa para todas las concentraciones de retardante aplicadas y sus respectivos flujos de calor incidente más cercanos al flujo crítico de calor en ambos equipos experimentales.	89
7.2. Parámetros utilizados en el análisis del escalamiento.	93

Índice de Figuras

4.1. Tipos de Incendio. Fuente: elaboración propia.	11
4.2. Incendio en Interfaz Urbano-Forestal. Fuente: El País (2024).	13
4.3. Pavesas de un incendio. Fuente: Nuestro Clima (2024)	14
4.4. Factores involucrados en la ignición de un sólido. Fuente: Hurley <i>et al.</i> (2015)	19
4.5. Evolución de la temperatura en la superficie de un sólido expuesto a un flujo de calor externo. Fuente: Hurley <i>et al.</i> (2015)	22
4.6. Balance de flujo de masa. Fuente: Elaboración propia.	36
4.7. Avión de combate contra incendios Ten Tanker esparciendo retardante Phos-Chek en área forestal de California, Estados Unidos. Fuente: Los Ángeles Times (2020)	45
5.1. Aparato experimental I-FIT. ①: Motor lineal, ②: Cámara Basler, ③: Heater, ④: Termocuplas, ⑤: Piloto (Kanthal), ⑥: Radiómetro, ⑦: Basket, ⑧: Sistema de adquisición de datos, ⑨: Variac, ⑩: Fuente de poder. Fuente: elaboración propia.	48
5.2. (a) Heater Bach RC hecho. (b) Dimensiones heater. Fuente: BACH Resistor Ceramics.	49
5.3. (a) Radiómetro Hukseflux SBG01-020. Fuente: Hukseflux. (b) Vista calibración del heater. Fuente: elaboración propia	51
5.4. Motor lineal Thorlabs modelo LTS150. Fuente: Thorlabs	52
5.5. Recipiente porta muestras (basket) I-FIT. Fuente: elaboración propia	53
5.6. Distribución de termocuplas en el basket. Fuente: elaboración propia	53
5.7. IOtech Personal Daq 56 Series. Fuente: Digilent	54
5.8. Cámara Basler ace acA720-520uc. Fuente: Basler AG	55

5.9. Aparato experimental SCALA. ①: Heater, ②: Piloto, ③: Basket, ④: Termocuplas, ⑤: Celda de carga, ⑥: Sensores láser, ⑦: Entrada de aire. Fuente: elaboración propia	56
5.10. Resistencias de carburo de silicio tipo U. Fuente: elaboración propia	57
5.11. Diseño de heaters. Fuente: elaboración propia	57
5.12. Piloto utilizado para el equipo SCALA. Fuente: elaboración propia	58
5.13. Recipiente porta muestras (basket) SCALA. Fuente: elaboración propia	58
5.14. Celda de carga SCALA. Fuente: Kern & Sohn	60
5.15. (a) Horno de secado Memmert modelo UN30. (b) Cámara de humedad Memmert modelo HCP50. Fuente: Memmert GmbH	61
5.16. Picnómetro ISOLAB. Fuente: Baltalab	62
5.17. Balanza Shimadzu UX 620 H. Fuente: Cromtek	62
6.1. Medición experimental de la calibración (puntos: voltajes medidos experimentalmente; línea continua: función ajustada). Fuente: elaboración propia	71
7.1. (a) Llamas durante las pruebas de ignición continua. (b) Llamas durante las pruebas de ignición discontinua. Ambas para $\sigma_{ret} = 0\%$ y $\sigma_{ret} = 40\%$	82
7.2. (a) Agujas de pino quemadas después de las pruebas de ignición continua. (b) Agujas de pino quemadas después de las pruebas de ignición discontinua. Ambas para $\sigma_{ret} = 0\%$ y $\sigma_{ret} = 40\%$	83
7.3. Tiempo de retardo en la ignición vs. flujo de calor incidente para cuatro concentraciones de retardante en la solución. (a) Pruebas de ignición continua (SCALA). (b) Pruebas de ignición discontinua (IFIT). Las líneas discontinuas son el valor calculado de $\dot{q}_{cri}''$ para cada σ_{ret}	85
7.4. (a) Ignición continua: HRR vs. tiempo para las cuatro concentraciones de retardante de fuego. Flujo incidente de 22 kW/m^2 . (b) Ignición continua: Peak de HRR para todas las pruebas realizadas.	86
7.5. (a) Ignición continua: energía total liberada en todas las pruebas realizadas para combustibles sin tratar. (b) Ignición continua: energía total liberada en todas las pruebas realizadas para combustibles tratados.	87
7.6. (a) Ignición continua: MLR vs. tiempo para las cuatro concentraciones de retardante. Flujo incidente: 22 kW/m^2 . (b) Ignición continua: Pérdida total de masa normalizada para todas las pruebas realizadas y concentraciones de retardante.	88

7.7. (a) Correlación entre τ/t_{ig} y φ para todas las pruebas realizadas en ignición continua (SCALA). (b) Correlación entre τ/t_{ig} y φ para todas las pruebas realizadas en ignición discontinua (I-FIT).	94
---	----



1 | Introducción

Índice

1.1. Contexto	1
1.2. Problema de investigación	2

1.1. Contexto

En los últimos años, se ha observado un aumento notable en la frecuencia y la extensión de incendios forestales severos a nivel mundial (Zhang *et al.* (2022); Zheng *et al.* (2021)). Ejemplos incluyen Australia durante el “Black Summer” de 2019-2020 (Damany-Pearce *et al.* (2022); Nolan *et al.* (2022)), los incendios de Portugal en 2017 (Leone *et al.* (2023)), los recientes incendios en España entre enero y agosto de 2022 (Liz-López *et al.* (2024)), y el oeste de Estados Unidos, que ha presenciado incendios récord con graves impactos en la biodiversidad y las comunidades (Li *et al.* (2022)).

Aunque las causas de estos incendios pueden ser diversas y únicas en varios casos, una tendencia establecida apunta inequívocamente hacia un efecto del cambio climático. Esta tendencia es especialmente notable en ecosistemas afectados por la sequía en Europa (Gudmundsson *et al.* (2014)), América del Norte (Stephens *et al.* (2018)) y América del Sur (Úbeda y Sarricolea (2016); Pontes-Lopes *et al.* (2021)). En consecuencia, se espera que en los próximos años haya una mayor demanda de herramientas para prevenir y combatir incendios forestales.

Actualmente, una de las herramientas más importantes utilizadas por las agencias de servicios forestales durante los incendios son los retardantes de fuego (Plucinski (2019)), donde la aplicación temprana de estos químicos puede mejorar el control del incendio, minimizando el daño. En los incendios forestales, los retardantes de lar-

go plazo se aplican por aviones sobre el dosel o “techo” del bosque (Plucinski (2019)), formando una barrera química para evitar la propagación del fuego (Àgueda *et al.* (2008)). Esto puede proporcionar flexibilidad para planificar el control del incendio y la intervención durante el desastre, reduciendo el riesgo para los equipos de combate de incendios (Plucinski (2019)).

Existen varias alternativas comerciales de retardantes de fuego disponibles en el mercado, y cada marca proporciona recomendaciones técnicas para su uso y correcta aplicación (Joseph y Ebdon (2009)). La mayoría de las recomendaciones provienen de pruebas que evalúan varios aspectos físicos, químicos y ambientales del retardante. Por ejemplo, el Servicio Forestal de los Estados Unidos (USFS) tiene una prueba estándar para los aspectos de combustión del retardante (Hardy (1962)). Aunque este enfoque proporciona información valiosa sobre la efectividad del retardante, deja de lado parámetros importantes relacionados con el entorno, la biología y la topografía local que afectan la efectividad del retardante bajo condiciones locales. La ausencia de datos que incluyan diferentes escenarios posibles durante un evento de incendio podría hacer que sean ineficaces bajo ciertas condiciones, y también podría significar que se utilicen de manera subóptima.

1.2. Problema de investigación

Este trabajo se centra en la efectividad de los retardantes utilizando pruebas de inflamabilidad, reportando parámetros relevantes de inflamabilidad para la comunidad científica. Algunos estudios revisados evaluaron retardantes bajo condiciones de laboratorio a diferentes escalas (Àgueda *et al.* (2008)). Es posible destacar que muchos estudios de laboratorio no evalúan los retardantes sobre camas de combustible forestal (Àgueda *et al.* (2008)), sino que utilizan pellets de madera, polvos o camas de combustible de acículas de pino, dependiendo de si el estudio es analítico o más representativo de las condiciones de incendio, lo que genera dudas sobre la aplicabilidad de los resultados obtenidos de diferentes sustratos de combustible.

Los calorímetros de fuego a escala de laboratorio son plataformas convenientes para probar el rendimiento de materiales tratados con retardantes de fuego, ya que pueden cuantificar parámetros relevantes para diferentes etapas dentro de un incendio, como la ignición y la propagación del fuego (Schartel y Hull (2007)). Además, tienen condiciones de borde cuantificadas que son útiles para el desarrollo de modelos

y se han utilizado con éxito para estudiar la inflamabilidad y la dinámica del fuego en camas de acículas de pino durante varios años (Schemel *et al.* (2008); Gong *et al.* (2023)). Sin embargo, el estudio de retardantes utilizando calorímetros de fuego se ha centrado principalmente en productos químicos para materiales de construcción, con pocos estudios realizados para probar retardantes de incendios forestales en combustibles silvestres (Liodakis *et al.* (2006, 2010); Rivera *et al.* (2023)). Dado que el modo de acción de los retardantes de fuego no es único y pueden estar involucrados varios mecanismos simultáneamente (Grzeškowiak (2017)), la investigación debería centrarse en determinar la relevancia de las sinergias observadas entre ellos (Grzeškowiak (2017)).

Otro aspecto relevante de este estudio es la concentración del retardante. Varios estudios muestran el efecto negativo de los retardantes en los ecosistemas (Xiong *et al.* (2019); Segev *et al.* (2009)), lo que plantea preguntas sobre los costos y beneficios de aumentar la cantidad de productos químicos aplicados, particularmente considerando los efectos de los incendios forestales en las sociedades y los ecosistemas. Por esta razón, en este estudio se prueban tres concentraciones diferentes de retardante, que corresponden a la dosis recomendada por el fabricante, además de la mitad y el doble de la concentración recomendada.

2 | Objetivos

2.1. Objetivo General

Realizar pruebas de inflamabilidad a escala de laboratorio con acículas de *Pinus radiata* tratadas con retardante de fuego, con la finalidad de evaluar la eficiencia de las distintas concentraciones de retardante para determinar su efectividad en el combate de incendios en zonas urbano-forestal.

2.2. Objetivos Específicos

- Establecer las configuraciones actualmente utilizadas para un combustible forestal en el aparato experimental SCALA y el aparato experimental I-FIT, con la finalidad de realizar una correcta campaña experimental.
- Plasmar las recomendaciones de uso de los equipos que componen el aparato experimental SCALA y el aparato experimental I-FIT, así como las particularidades de uso de cada uno, para llevar a cabo de manera eficiente la campaña experimental.
- Presentar los resultados obtenidos para flujos radiativos constantes y concentración de retardante variable en ambos aparatos experimentales, para analizar el comportamiento del retardante y posibles puntos en común entre los instrumentos.
- Contrastar los resultados obtenidos experimentalmente con la teoría de ignición térmica para lechos combustibles de acículas de pino, con el fin de verificar el nivel de estimación de las propiedades efectivas del pino según el aparato

experimental.

- Analizar los resultados obtenidos experimentalmente, con el fin de identificar la eficiencia del retardante en la disminución de la potencialidad de incendio a medida que su concentración aumenta.



3 | Hipótesis

Por medio de esta investigación se busca verificar la siguiente hipótesis:

“Si se aplica una mayor concentración de retardante, habrá efectos notables en la inflamabilidad de la muestra”.

Probar esta hipótesis tiene una aplicación práctica y directa al demostrar empíricamente si la aplicación de “extra” retardante siempre proporciona un beneficio significativo en el control del fuego.

4 | Fundamentos del Estudio Experimental

Índice

4.1. Fenómeno de un incendio Forestal	9
4.1.1. Descripción	9
4.1.2. Condiciones necesarias	9
4.1.3. Tipos de Incendio	9
4.1.4. Propagación de Incendios por Spotting	13
4.2. Mecanismos de Transferencia de Calor	14
4.2.1. Conducción	14
4.2.2. Convección	15
4.2.3. Radiación	16
4.3. Teoría de Ignición de Sólidos	17
4.3.1. Introducción	17
4.3.2. Descripción	18
4.3.3. Ignición piloteada	21
4.3.4. Ignición Espontánea	22
4.3.5. Ignición continua	23
4.3.6. Ignición discontinua	23
4.3.7. Ignición en sólidos Thermmally Thin	24
4.3.8. Ignición en sólidos Thermally Thick	27
4.3.9. Consideraciones	32
4.4. Biomasa	40

4.4.1. Densidad de masa	40
4.4.2. Densidad aparente	41
4.4.3. Packing ratio y porosidad	41
4.5. Retardantes de llama	42



4.1. Fenómeno de un incendio Forestal

4.1.1. Descripción

La Corporación Nacional Forestal (CONAF), define un incendio forestal de la siguiente manera: “fuego que, cualquiera sea su origen, se propaga sin control en terrenos rurales a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, ya sea viva o muerta”. (Corporación Nacional Forestal (2022))

Los diferentes tipos de incendios pueden clasificarse según su morfología, grado de intensidad o patrón de comportamiento. En el mundo forestal, la clasificación genérica en función de los estratos de combustible alcanzados y la forma del avance es:

1. Incendio de subsuelo.
2. Incendio de superficie.
3. Incendio en las copas de los árboles.
4. Incendio en forma de pavesas.

4.1.2. Condiciones necesarias

Un incendio forestal representa un proceso de combustión fuera de control con gran liberación de energía. Para esto, se requiere de combustibles en cantidad suficiente, condiciones ambientales adecuadas, generación de calor suficiente para promover la liberación de gases de pirólisis que alcancen la temperatura de ignición y que se combinen con una cantidad adecuada de oxígeno, para sustentar la quema.

4.1.3. Tipos de Incendio

Incendio de Subsuelo

Tal como lo indica su nombre, ocurren en el subsuelo, el material combustible en este caso se compone principalmente de hojas muertas, raíces y la capa mineral del suelo. Solo se identifican estos sucesos con la aparición y visibilidad del humo, ya que por norma general no aparece llama y tienen un avance lento por la escasez de

oxígeno. Ocurren en zonas boreales, tropicales y mediterráneas, predominantemente en turberas y ciénagas, tienden a tener una duración prolongada y en algunos casos son capaces de reavivar otros tipos de incendios que se consideraban controlados o apagados tras varios días o incluso semanas.

Incendio de Superficie

Es un caso menos frecuente y de menor intensidad, dado que se acumula una menor cantidad de material vegetal (combustible), fomentando además una discontinuidad, que evita en parte su propagación. En cuanto a su modalidad, ocurre sobre la superficie, sin alcanzar las ramas ni copas de los árboles, mediante la ignición sucesiva de material combustible.

Incendios de Copas

En general la intensidad de este tipo de incendios es mayor a las anteriores, dado que se propaga por casi la completitud del estrato vegetal, asimismo la severidad de los mismos tiende a ser mayor a los otros casos; de acuerdo a la forma en que se propagan pueden clasificarse como:

- **Incendios de Copa Pasivos:** Ocurren cuando la intensidad de los incendios de superficie, es decir, hojas, ramas y troncos; es suficiente para encender las copas de algunos árboles.
- **Incendios de Copa Activos:** Tienen lugar cuando los incendios de superficie generan suficiente calor para permitir el fuego sostenido en las coronas, en este tipo de incendios, las llamas son desviadas a las coronas de árboles adyacentes. Existen algunos factores tales como la densidad, la distancia entre copas y la velocidad del viento que propician este tipo de incendios.



Figura 4.1: Tipos de Incendio. Fuente: elaboración propia.

Incendio en Interfaz Urbano-Forestal (IUF)

Los incendios en la interfaz urbano-forestal (IUF) ocurren en áreas donde el entorno natural se encuentra con desarrollos humanos, como comunidades residenciales, infraestructuras y zonas industriales. Este tipo de incendios es especialmente peligroso debido a la proximidad entre vegetación combustible y estructuras humanas, lo que aumenta el riesgo de pérdida de vidas, propiedades y afectación del medio ambiente (National Wildfire Coordinating Group (2013)).

Características de los incendios en la IUF:

- Zona de alto riesgo: La IUF es un espacio crítico porque combina vegetación inflamable con estructuras humanas que pueden propagar el fuego. El material vegetal (árboles, arbustos, hierbas) y las casas están tan cerca que ambos pueden actuar como combustible en caso de incendio.
- Fuentes de ignición: Los incendios en la IUF pueden originarse por causas

naturales (como rayos) o humanas (negligencia, fallas eléctricas, fogatas mal apagadas, incendios intencionales). Dado que estas áreas están habitadas, las actividades humanas aumentan las posibilidades de ignición.

- **Clima y topografía:** Los factores meteorológicos (temperaturas altas, baja humedad, vientos fuertes) y la topografía (colinas, cañones) pueden influir en la velocidad y dirección de propagación de estos incendios, lo que hace difícil controlarlos y predecir su comportamiento.
- **Materiales combustibles:** En la IUF, tanto la vegetación como las estructuras construidas pueden arder. Las casas con techos de materiales inflamables, cercas de madera y jardines secos pueden alimentar el incendio de la misma manera que los árboles y arbustos circundantes.
- **Efectos devastadores:** Un incendio en la IUF puede generar importantes pérdidas económicas, ya que destruye tanto propiedades como infraestructuras. Además, el fuego puede afectar negativamente la salud humana debido al humo y los gases tóxicos, e impactar a los ecosistemas circundantes, provocando la pérdida de hábitats y biodiversidad.

Clasificación de las zonas de interfaz:

Las zonas de interfaz son áreas que incluyen edificaciones próximas a espacios de vegetación forestal o que se encuentran dentro de los mismos. Esto hace que cualquier intervención sobre la zona sea compleja, ya que son entornos muy diferentes (Academia Nacional de Bomberos de Chile (2020)). Las zonas de interfaz se dan por igual en el ámbito rural o en el ámbito metropolitano o periurbano, y se clasifican de tres modos:

- **Interfaz clásica:** estructura dentro del bosque distribuida en forma de conglomerados, cercanos entre sí, donde predominan la vegetación y en menor grado las viviendas. Se refiere a grandes zonas urbanizadas, más o menos continuas, y rodeadas de masas forestales o en contacto con estas.
- **Interfaz cerrada:** masas o áreas naturales de vegetación aisladas en medio de zonas urbanizadas más o menos grandes.
- **Interfaz mixta:** viviendas aisladas en medio de espacios forestales o agrícolas



Figura 4.2: Incendio en Interfaz Urbano-Forestal. Fuente: El País (2024).

4.1.4. Propagación de Incendios por Spotting

Los incendios puntuales que aparecen más allá del frente de fuego son generalmente iniciados por partículas carbonizadas incandescentes (pavesas), que son desprendidas y transportadas por convección y por el viento (Sugihara *et al.* (2006)).

Estas partículas tienen la capacidad de viajar grandes distancias, en algunos casos siendo estas de decenas de kilómetros, siendo capaces de generar otros focos de incendio. La secuencia de este mecanismo se compone de tres etapas, generación, transporte e ignición del combustible en la posición de aterrizaje. En este mecanismo, las condiciones climáticas tienen un fuerte impacto, primordialmente las condiciones de vientos, dado que a mayor intensidad, el incendio principal es mayor, las pavesas se transportan a mayor distancia y además favorecen la ignición de otras fuentes combustibles.

La vida útil de las pavesas depende del tamaño inicial de la misma, así como de la velocidad vertical del viento que genera el fuego.



Figura 4.3: Pavesas de un incendio. Fuente: Nuestro Clima (2024)

4.2. Mecanismos de Transferencia de Calor

El calor es una forma de energía que se encuentra en transferencia entre dos medios (o más), cabe señalar que en la naturaleza siempre ocurre desde el medio de mayor temperatura al de menor temperatura y termina una vez que ambos alcanzan la misma temperatura, es decir, que alcanzan el equilibrio térmico, dicho de otra manera es requisito para su ocurrencia que exista un gradiente de temperatura. Dicha transferencia puede ocurrir de tres modos:

4.2.1. Conducción

Para este caso, la energía se transfiere de las partículas más energéticas a las menos energéticas, mediante la interacción entre ellas, ya sea en medios líquidos y/o gaseosos mediante la colisión de las mismas, mientras que en sólidos ocurre por la combinación de las vibraciones entre moléculas.

De acuerdo a la geometría, el tipo de material, el espesor del mismo, la diferencia de temperatura entre medios, entre otras condiciones propias de estos; se genera una tasa de transferencia de calor. Experimentalmente se ha comprobado que en el caso de una placa plana, dicho ratio es directamente proporcional a la diferencia de temperatura e inversamente proporcional al espesor. Esto se expresa fácilmente a través de la *Ley de Fourier* para la conducción de calor:

$$\dot{q}_{cond} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.1)$$

En dicha expresión k corresponde a la conductividad térmica del material, mientras que A es el área de la sección transversal, x es la dirección a través de la que ocurre la transferencia de calor y $\frac{\partial T}{\partial x}$ es el gradiente de temperatura en la dirección estudiada.

Para el caso de la constante k debe tenerse en cuenta que esta varía de acuerdo a la temperatura, por lo cual su estudio es más complejo, sin embargo en muchos casos, en especial en medios sólidos, dado que el cambio es muy pequeño, se puede asumir constante manteniendo un error poco sustancial.

Existen fenómenos donde la transferencia de calor es bidimensional o tridimensional, por lo cual será necesario expandir la expresión a una versión más compleja que pueda representar el fenómeno, por otro lado, si se utiliza una geometría distinta, podría ser recomendable utilizar otro tipo de coordenadas.

La expresión general para la transferencia de calor en coordenadas rectangulares es:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} \quad (4.2)$$

Dicha formulación resulta muy compleja de resolver cuando no es posible simplificar alguno de los parámetros o utilizar algún supuesto que facilite la resolución; hay que tener presente que los parámetros densidad (ρ), la constante de conductividad (k) y el calor específico (c_p) podrían también variar tanto temporal como espacialmente, por ende, la resolución del modelo aún con la ayuda de la computación resulta muy lento y complejo. En muchos casos, la variación de dichos parámetros es poco significativa, por lo cual se puede asumir un comportamiento constante, sin embargo las simplificaciones de las demás condiciones dependerán mucho de la geometría y análisis realizado.

4.2.2. Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que se encuentra en movimiento. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección, por el contrario, en ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia

de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura.

Se conoce como *convección forzada* cuando el fenómeno ocurre por efecto de un agente externo como puede ser un ventilador, una bomba, entre otros. Por su parte se conoce como *convección natural* al caso donde el movimiento del fluido está dado por las fuerzas de empuje inducidas por las diferencias de densidades o de temperatura.

Se ha logrado establecer que la rapidez de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura, representado con la *Ley de enfriamiento de Newton*:

$$\dot{q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (4.3)$$

donde h corresponde al coeficiente de transferencia de calor por convección en W/m^2K , A_s al área de la superficie donde ocurre la convección, T_s a la temperatura superficial y T_∞ la temperatura del fluido lo suficientemente alejado de la superficie. Cabe destacar que el coeficiente de transferencia de calor h no es inherente al fluido, sino que depende de una multitud de variables experimentales como son la configuración geométrica, la velocidad del fluido, la naturaleza de su movimiento y propiedades termo-físicas.

4.2.3. Radiación

Es el único mecanismo de transferencia de calor que no requiere la presencia de un medio, motivo por el cual puede transmitirse a través del vacío; esto es posible dado que se transmite mediante ondas electromagnéticas (mediante fotones), como resultado del cambio en la configuración de átomos y moléculas.

De este modo, todo cuerpo, ya sea sólido, líquido o gaseoso; que se encuentre con una temperatura sobre el cero absoluto, se encuentra emitiendo, absorbiendo y transmitiendo radiación en mayor o menor grado. En el caso de los sólidos opacos (transmisividad despreciable) la radiación se considera un fenómeno superficial, dado que la parte emitida desde el interior no alcanza nunca la superficie; por su parte la radiación incidente en el mismo, se absorbe mediante unos microporos.

Usando estas ideas, se formula la *Ley de Steffan-Boltzmann*, para representar la

radiación emitida por la superficie de un cuerpo opaco y negro (emisividad = 1):

$$\dot{q}_{rad,cn} = \sigma A_s T_s^4 \quad (4.4)$$

donde $\dot{q}_{rad,cn}$ es la tasa de transferencia de calor por radiación de un cuerpo negro, σ es la constante de Steffan-Boltzmann, A_s es el área de la superficie y T_s es la temperatura de la superficie. Está expresión se puede reformular de manera más general como:

$$\dot{q}_{rad} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (4.5)$$

donde ϵ es la emisividad del cuerpo, que puede tomar valores $0 \leq \epsilon \leq 1$, y permite establecer cuanto se parece el cuerpo a un cuerpo negro.

La diferencia entre los flujos de radiación emitida por una superficie y absorbida por otra corresponde a la razón neta de transferencia de calor, por lo que determinar este valor neto entre ambas superficies depende de las propiedades radiativas de cada una, su orientación geométrica y la eventual participación del medio que las rodea.

4.3. Teoría de Ignición de Sólidos

4.3.1. Introducción

En este capítulo se explicarán los conceptos básicos y fundamentales de la teoría que rodea al fenómeno de la ignición. Los conceptos generales y su clasificaciones pueden ser variados, han cambiado con el paso de los años, por lo que es necesario realizar una breve recapitulación de los conceptos fundamentales que ayudan a entender los mecanismos involucrados en todo este proceso. Como se verá en las secciones siguientes, el proceso de ignición involucra muchos conceptos que van más allá de la simple idea de un material incendiándose, pues este proceso involucra múltiples etapas y cambios tanto físicos como químicos, los cuales pueden dirigir el estudio de la ignición en diversos sentidos.

Finalmente, luego de aclarar algunos conceptos, se profundizará en el desarrollo

de los modelos clásicos de ignición diferenciando el fenómeno por las condiciones de borde que caracterizan al problema. Concretamente, se presentarán los modelos clásicos para la ignición de sólidos bajo aproximaciones *thermally thin* y *thermally thick*, las cuales a pesar de ser teorías y acercamientos distintos, poseen varios puntos en común que pueden ser explotados en modelos generales más complejos como se verá en los capítulos posteriores.

4.3.2. Descripción

La ignición ocurre cuando un medio (combustible) es calentado hasta alcanzar temperaturas que provoquen una rápida reacción exotérmica de oxidación denominada *combustión*, en donde la energía necesaria para provocar este aumento de temperatura generalmente es obtenido desde una fuente externa. Esta energía requerida depende de diversos factores, como por ejemplo, las propiedades termo-físicas del material, características geométricas, condiciones que limitan el fenómeno y especialmente el tiempo de exposición a la fuente de calor (Hurley *et al.* (2015); Soto *et al.* (2015)).

En cuanto a las sustancias afectas a los procesos de ignición, frecuentemente se asocia a combustibles líquidos pero no está limitada a estos, pues los combustibles sólidos son parte fundamental de la teoría que ayuda a comprender la ignición. Así, cuando un material sólido en condiciones normales de presión y temperatura es expuesto a una fuente externa de energía, la temperatura de la superficie expuesta al flujo de calor comienza a aumentar. Este momento es definido como el inicio del proceso de ignición en $t = 0$, luego, se desencadena una serie de fenómenos físico-químicos en la medida que el flujo en la superficie expuesta comienza a calentar el medio (Hurley *et al.* (2015); Torero (2016)).

En este contexto, los potenciales combustibles que contribuyen a incendios forestales son en su mayoría combustibles sólidos, los cuales tienen múltiples factores de riesgo que deben ser considerados, entre los cuales se puede mencionar el potencial de *autoignición*, propensión al *smouldering*, propensión a la ignición, rapidez de propagación del fuego sobre la superficie del terreno y el calor liberado una vez que la ignición ha ocurrido. Estos factores son particularmente complejos de describir pues dependen de múltiples parámetros, incluyendo la geometría, orientación y disposición, propiedades químicas del material junto a las condiciones ambientales que contextualizan el escenario. En estas últimas se tiene flujo externo de calor y la con-

centración de oxígeno sobre la superficie del sólido como los factores más relevantes del estudio de ignición (Mowrer (2004); Soto *et al.* (2015)).

Gases de pirólisis

Generación

La ignición con presencia de llama (*flaming ignition*) y la combustión en la superficie de un sólido involucran múltiples procesos físico-químicos. Uno de los requisitos esenciales en los materiales sólidos es que primero deben gasificarse antes de que pueda ocurrir la ignición y la presencia de fuego como tal, para lo cual el sólido es calentado utilizando una fuente externa de calor, y este calor es percibido por la superficie expuesta como $\dot{q}''_{inc}$ (Mowrer (2004)). Lo cual se presenta en la Figura 4.4.

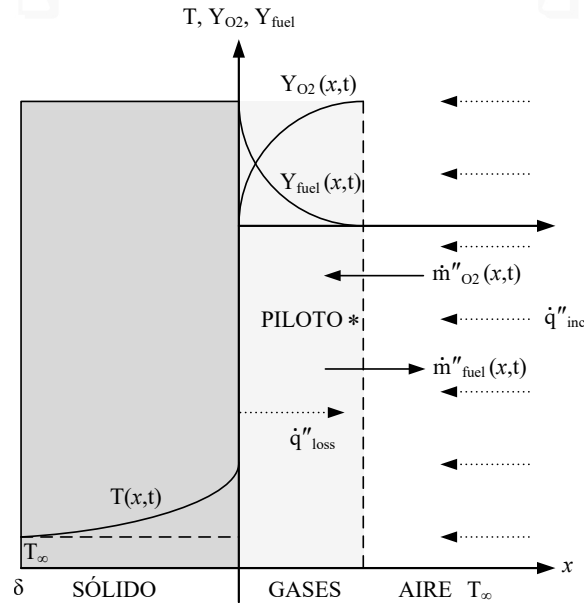


Figura 4.4: Factores involucrados en la ignición de un sólido. Fuente: Hurley *et al.* (2015)

La gasificación de materiales sólidos generalmente implica la descomposición de moléculas complejas en moléculas más simples en un proceso denominado *pirólisis*, el cual es inducido térmicamente. Este punto es de gran relevancia, pues a diferencia de los combustibles líquidos que experimentan cambios físicos (evaporación) pero no necesariamente químicos, los sólidos generalmente experimentan ambos durante el proceso de pirólisis (Hurley *et al.* (2015)).

Cuando la tasa de gasificación por calentamiento aumenta, comienza a producirse una concentración de gases inflamables cerca de la superficie del sólido. Luego, la rapidez del proceso de pirólisis en la superficie del sólido depende directamente de la temperatura de ésta y puede ser representada en función de una ecuación *exponencial de Arrhenius* como en la Ecuación 4.6 (Hurley *et al.* (2015); Quintiere (2006); Lautenberger y Fernandez-Pello (2011); Torero (2016))

$$\dot{m}_{fuel}''' = A_s Y_{O_2}^m Y_{fuel}^n \exp\left\{\left(-\frac{E_s}{RT}\right)\right\}. \quad (4.6)$$

En donde Y_{O_2} , Y_{fuel} corresponden a las fracciones en masa de oxígeno y del combustible participantes en la degradación respectivamente. A_s es el factor pre-exponencial, y E_s la energía de activación, siendo ambas propiedades del sólido. Los parámetros m , n y R son constantes de la reacción y T la temperatura. Es importante destacar que la pirólisis es un proceso endotérmico por múltiples reacciones químicas (algunas veces cientos), las cuales pueden ocurrir de manera secuencial, o bien, simultáneamente (en competición) (Hurley *et al.* (2015)).

De lo anterior, cuando la temperatura superficial incrementa, la tasa a la que ocurre la reacción también lo hace y el sólido comienza a experimentar cambios. Así, para una distribución de temperatura dentro del material, la tasa de descomposición es una función dependiente de la dirección x , en donde una gran generación de gases de pirólisis ocurre cerca de la superficie del sólido y una menor producción al interior de él, por lo que el flujo másico total de gases de pirólisis esta dado por

$$\dot{m}_{fuel}'' = \int_{x=0}^{x=\delta_T} A Y_{O_2}^m Y_{fuel}^n \exp\left\{\left(-\frac{E_s}{RT}\right)\right\} dx, \quad (4.7)$$

donde δ_T es la profundidad hasta la cual es apreciable el efecto del calentamiento. De manera general, se puede considerar que el proceso de pirólisis inicia a una temperatura $T_{py,0}$ hasta la cual el sólido es inerte químicamente (ver Figura 4.5). Es importante mencionar que $T_{py,0}$ no es un parámetro físico como tal, más bien corresponde a una manera simple de indicar el inicio de una alta actividad química (Hurley *et al.* (2015)).

Difusión

Los gases combustibles deben ser liberados desde la superficie del sólido lo suficientemente rápido como para formar una mezcla con el aire del ambiente y que esta sea susceptible a encender, mecanismo que es denominado *difusión*. Luego, ya que los vapores son retirados constantemente desde la superficie caliente por las corrientes convectivas (fenómeno propio del calentamiento, o bien, de alguna fuerza externa), deben ser reemplazados constantemente por nuevos vapores para asegurar que la mezcla con aire sea inflamable (Hurley *et al.* (2015); Mowrer (2004)). En la Figura 4.4 se representa como la fracción en masa de oxígeno Y_{O_2} es menor cerca de la superficie del sólido y mayor al alejarse de ella. Por otro lado, la fracción en masa de los gases reactantes de pirólisis Y_{fuel} posee una mayor concentración cerca de la superficie del sólido y disminuye al alejarse de ella. Naturalmente los gases de pirólisis difundirán hacia las zonas donde sea menor su concentración, mientras que el oxígeno lo hará hacia donde sea menor, lo cual, eventualmente da lugar a la formación de una mezcla inflamable.

La definición de mezcla inflamable considera el nivel de concentración de combustible de forma que será inflamable sólo si se encuentra entre el *límite inferior de inflamabilidad (LFL)* y el *límite superior de inflamabilidad (UFL)*, así, bajo el LFL la concentración de combustible es muy baja y sobre el UFL es demasiado alta como para provocar la ignición.

4.3.3. Ignición piloteada

En la mayoría de los escenarios encontrados en la naturaleza, en el lugar que ocurre la ignición es común encontrar alguna región de mayor temperatura que permita iniciar la reacción de combustión. Así, en presencia de un piloto, como puede ser una llama, chispa o arco eléctrico (Hurley *et al.* (2015)), es posible asumir que la ignición ocurre en el momento en que la mezcla inflamable alcanza la posición espacial en la que se encuentra el piloto en el LFL.

De lo anterior, se puede decir que una vez que la ignición ocurre, la llama generada se propaga a través de las regiones donde esté presente la mezcla inflamable consumiendo los reactantes, en donde la situación más probable es que esto ocurra cerca de la superficie del sólido. Por otro lado, la tasa de pirólisis al momento en que aparece la llama determinará si ésta podrá continuar existiendo o si la reacción

de combustión cesará después que la mezcla inflamable sea consumida, por lo que el calor liberado por la llama incrementará la tasa de pirólisis. Si esto no es suficiente, la llama se extinguirá y continuará el proceso de pirólisis que llevará una vez más la formación de una mezcla inflamable y una eventual ignición. Este fenómeno se manifiesta como una serie de destellos (*flashes* en inglés) que preceden a la ocurrencia de una llama sostenida. La aparición del primer destello se denomina *flash point* y se da a la temperatura T_{flash} y la aparición de la llama sostenida se denomina *fire point* a la temperatura $T_{fp} = T_{ig,pi}$ como se aprecia en la Figura 4.5 (Hurley *et al.* (2015)).

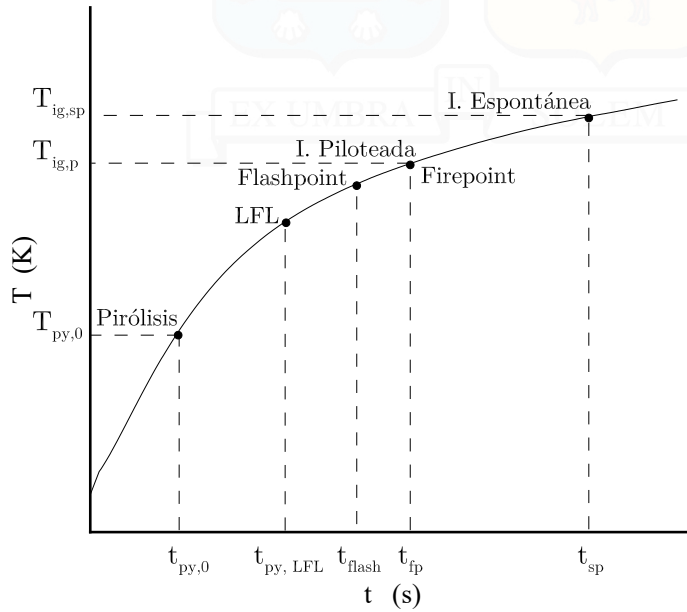


Figura 4.5: Evolución de la temperatura en la superficie de un sólido expuesto a un flujo de calor externo. Fuente: Hurley *et al.* (2015)

4.3.4. Ignición Espontánea

La ignición espontánea muestra características distintas a la piloteada descrita en la sección 4.3.3. En este caso, una vez que se ha formado la mezcla inflamable se espera que la temperatura aumente hasta que la reacción de combustión ocurra alcanzando $T_{ig,sp}$, por esto, es común asociar un tiempo de pirólisis y uno de *inducción*. El primero se refiere al tiempo necesario desde el inicio del calentamiento del sólido hasta la producción de una mezcla inflamable, mientras que el último corresponde al tiempo requerido por la mezcla inflamable para alcanzar la temperatura de ignición $T_{ig,sp}$. De esta manera, en un proceso de ignición espontánea no existe un piloto que

actúe como punto de inicio para la reacción, por lo que la mezcla inflamable debe absorber suficiente energía para alcanzar la ignición (Hurley *et al.* (2015)).

Dicha cantidad de energía requerida puede ser asociada al número de *Damköhler*, que corresponde al ratio entre el tiempo de residencia y el tiempo requerido por la reacción química, el cual puede ser obtenido como el inverso de la tasa de reacción. Mientras que esta, puede expresarse por medio de una *Ecuación de Arrhenius* similar a la de pirólisis. Con lo anterior, el tiempo de reacción química se ve afectado por la temperatura de manera que mientras mayor sea esta, la tasa de combustión será mayor y el tiempo de reacción química menor. Por otro lado, el tiempo de residencia tiene directa relación con la rapidez de los gases, por lo que a mayor velocidad el tiempo de residencia es menor. De esta manera, si el tiempo requerido por la reacción química es menor al tiempo de residencia la reacción, esta tiene suficiente tiempo para proceder y la llama puede existir, por lo que existe un número de Damköhler crítico que es necesario alcanzar antes de que la ignición pueda ocurrir (Hurley *et al.* (2015)).

4.3.5. Ignición continua

La ignición continua es un proceso en el que el fuego o una reacción de combustión se mantiene en marcha sin interrupciones. En incendios forestales, por ejemplo, la ignición continua se da cuando los combustibles presentes son capaces de arder de manera constante, lo que permite que el fuego avance sin detenerse. Este tipo de ignición es típico en áreas densas de vegetación, donde el fuego se propaga rápidamente debido a la disponibilidad constante de material inflamable (Fernández *et al.* (2008)).

En términos más técnicos, la ignición continua se refiere a la combustión sostenida en la cual el calor generado por la llama es suficiente para encender el combustible circundante de manera continua.

4.3.6. Ignición discontinua

La ignición discontinua ocurre cuando la propagación del fuego se interrumpe, ya sea por falta de combustible, por barreras físicas, o por la aplicación de retardantes. En este caso, el fuego avanza en parches o áreas separadas, donde los combustibles son lo suficientemente espaciados como para que el fuego no se mantenga de manera

constante (Fernández *et al.* (2008)).

Un ejemplo común de ignición discontinua es cuando hay combustibles separados por áreas sin vegetación o zonas húmedas, lo que genera una propagación del fuego en puntos específicos y no de manera continua.

4.3.7. Ignición en sólidos **Thermally Thin**

En esta sección se presentará la teoría básica relativa los tiempos de ignición para problemas simples, cuyo propósito es ilustrar la naturaleza del problema junto con las aproximaciones y simplificaciones clásicas utilizadas para este tipo de problemas.

Criterio para thermally thin

Primero se considera un objeto delgado, es decir, que puede ser aproximado sin considerar gradientes internos de temperatura. Esto es lo que se conoce como *thermally thin*, lo cual requiere que el espesor físico d sea menor que el espesor de penetración térmica δ_T . Para el gradiente de temperatura sea pequeño sobre el dominio d , se requiere que

$$d \ll \delta_T \approx \sqrt{\alpha t} \approx \frac{k(T_s - T_o)}{\dot{q}''}, \quad (4.8)$$

o en términos del *número de Biot*

$$Bi \equiv \frac{dh_c}{k} \ll \frac{h_c(T_s - T_o)}{\dot{q}''}. \quad (4.9)$$

Si $\dot{q}''$ se basa en el calentamiento únicamente por convección $\dot{q}'' = h_c(T_\infty - T_s)$, la Ecuación 4.9 se convierte en

$$Bi \ll \frac{T_s - T_o}{T_\infty - T_s}, \quad (4.10)$$

lo que se traduce en que para un caso thermally thin, en donde d es lo suficientemente pequeño, la diferencia de temperatura interna debe ser mucho menor que la diferencia en la interfase.

Teoría thermally thin

Este acercamiento es directo y se puede aplicar a un material de espesor d aislado por uno de sus lados, cuyas condiciones de borde están dadas por

$$\dot{q}'' = \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x_s=0} \quad (4.11)$$

$$0 = \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=d} \quad (4.12)$$

Sin embargo, con la aproximación thermally thin, la temperatura no posee un gradiente al interior $T(x, t) \approx T(t)$, por lo tanto, considerando un volumen de control alrededor del material, se tiene el siguiente balance de energía

$$\rho c_p d \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{q}'' = \dot{q}_e'' - h_c (T - T_\infty) + \epsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4). \quad (4.13)$$

El flujo neto de calor incluye las pérdidas por radiación y las ganancia provenientes desde el ambiente a temperatura T_∞ , además, debido al exponente a la cuarta de la temperatura en el término radiativo, no es posible obtener una solución analítica, por lo que se aproxima el término de la radiación mediante una expansión en series de Taylor en alrededor de T_∞ , utilizando un coeficiente efectivo total h_r

$$h_r \equiv \frac{\epsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4)}{(T - T_\infty)} \approx 4\epsilon \sigma T_\infty^3 \quad (4.14)$$

para $T - T_\infty$ pequeño. Por tanto, con $h_t \equiv h_c + h_r$

$$\rho c_p d \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{q}_e'' - h_t (T - T_\infty). \quad (4.15)$$

Ahora, se define

$$\theta = \frac{T - T_\infty}{\dot{q}_e''/h_t} \qquad \tau \equiv \frac{h_t t}{\rho c_p d}$$

Entonces

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 1 - \theta, \quad (4.16)$$

sujeto a la condición inicial $\theta(0) = 0$, por lo que su solución está **dad** por

$$\theta = 1 - \exp\{(-\tau)\} \quad (4.17)$$

Luego, volviendo a los parámetros y variables originales

$$T - T_\infty = \frac{\dot{q}_e''}{h_t} \left[1 - \exp\left\{ \left(-\frac{h_t t}{\rho c_p d} \right) \right\} \right] \quad (4.18)$$

para un sólido aislado de espesor d que es calentado por un flujo incidente de calor radiativo $\dot{q}_e''$. De esta manera, desde la Ecuación 4.18, cuando $t \rightarrow \infty$ se alcanza el estado estacionario, mientras que para $t \rightarrow 0$, el término exponencial $e^{-\tau} \approx 1 - \tau$. Lo anterior permite obtener expresiones sencillas para el tiempo de ignición t_{ig} a la temperatura $T = T_{ig}$. Entonces, para tiempos de ignición cortos $1 - e^{-\tau} \approx \tau$

$$t_{ig} \approx \frac{\rho c_p d (T_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}_e''}. \quad (4.19)$$

Mientras que para tiempo largos de exposición, eventualmente en $t \rightarrow \infty$ la temperatura alcanzará T_{ig} , en cuyo caso se tiene que para cualquier flujo de calor menor al flujo crítico de ignición $\dot{q}_{cri}''$ la ignición no es posible por el modelo de conducción. De esta forma, se puede obtener una expresión para el flujo crítico de ignición

$$\dot{q}_{cri}'' = h_t (T_{ig} - T_{\infty}), \quad (4.20)$$

la cual es obtenida para la forma aproximada mediante la linealización del término radiativo. Sin embargo, se puede obtener una expresión más precisa sin linealizar el término radiativo

$$\dot{q}_{cri}'' = h_c (T_{ig} - T_{\infty}) + \epsilon \sigma (T_{ig}^4 - T_{\infty}^4). \quad (4.21)$$

4.3.8. Ignición en sólidos Thermally Thick

En esta sección se presenta una metodología que busca al igual que en la sección 4.3.7, explicar la teoría básica que sirve de base para extrapolar a otros análisis. Esta vez se estudia para la ignición de un sólido como un medio semi-infinito, el cual es un supuesto característico ampliamente usado para este tipo de problemas. Para este caso, se requiere que la ignición ocurra antes de que el espesor térmico de penetración δ_T alcance $x = d$. Entonces, sea

$$d \geq \delta_T \approx \sqrt{Dt_{ig}} \quad (4.22)$$

con D como difusividad térmica.

Teoría thermally thick

Para el sólido semi-infinito, considerar un problema de conducción para una temperatura constante en la superficie. Las ecuaciones parciales diferenciales provenientes del balance de energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (4.23)$$

Las condiciones de borde que caracterizan el problema, junto a la condición inicial se pueden definir como

$$\begin{aligned}
x=0, & \quad T=T_s \text{ constante} \\
x \rightarrow \infty, & \quad T=T_\infty \\
t=0, & \quad T=T_\infty
\end{aligned}$$

Luego, con el propósito de resolver la ecuación diferencial anterior, se definen las siguientes variables normalizadas

$$\theta(\eta) = \frac{T - T_\infty}{T_s - T_\infty} \Rightarrow \partial T = (T_s - T_\infty) \partial \theta \quad (4.24)$$

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \Rightarrow \partial t = \frac{-2t}{\eta} \partial \eta \quad (4.25)$$

$$\Rightarrow \partial x = 2\sqrt{Dt} \partial \eta \quad (4.26)$$

Ahora, reescribiendo el problema original en las nuevas variables normalizadas

$$(T_s - T_\infty) \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \left(-\frac{\eta}{2t} \right) = D (T_s - T_\infty) \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} \left(\frac{1}{2\sqrt{Dt}} \right)^2. \quad (4.27)$$

Entonces, la Ecuación 4.27 se convierte en

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} + 2\eta \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0, \quad (4.28)$$

que corresponde a una *ecuación diferencial ordinaria de segundo orden*, sujeta a las condiciones

$$\eta=0, \quad \theta=1 \quad (4.29)$$

$$\eta \rightarrow \infty, \quad \theta=0 \quad (4.30)$$

Se resuelve la Ecuación 4.28 definiendo el cambio de variable $u = \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \rightarrow \frac{\partial u}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2}$, entonces

$$\frac{\partial u}{\partial \eta} = -2\eta u, \quad (4.31)$$

que corresponde a una ecuación diferencial de primer orden, luego, integrando el problema de variables separables

$$\ln u = -2\eta + c_1, \quad (4.32)$$

por lo que se puede aplicar la función exponencial a ambos lados

$$u = e^{(-\eta^2 + c_1)}. \quad (4.33)$$

Reemplazando el cambio de variables se obtiene

$$\partial \theta = e^{(-\eta^2 + c_1)} \partial \eta \quad (4.34)$$

integrando nuevamente y aplicando la condición de borde 4.29

$$\theta - \theta(0) = e^{c_1} \int_0^\eta e^{(-\eta^2)} \partial \eta, \quad (4.35)$$

y luego

$$\theta = 1 + e^{c_1} \int_0^\eta e^{(-\eta^2)} \partial \eta, \quad (4.36)$$

luego, con la condición de 4.30 se obtiene

$$e^{c_1} = \frac{-1}{\int_0^\infty e^{(-\eta^2)} \partial \eta}. \quad (4.37)$$

La Ecuación 4.37 se puede definir en términos de la *función error de Gauss*

$$\text{erf}(\eta) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{(-\eta^2)} \partial \eta, \quad (4.38)$$

donde $\text{erf}(\infty) = 1$ y $\text{erf}(0) = 0$, así

$$e^{c_1} = -\frac{2}{\sqrt{\pi}}, \quad (4.39)$$

con lo que la solución esta dada como

$$\theta = 1 - \text{erf}(\eta). \quad (4.40)$$

Para una forma más general de las condiciones de borde como en la Ecuación 4.18, se incluyen las pérdidas de calor en la superficie

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x_s=0} = \dot{q}'' = \dot{q}_e'' - h_t (T - T_\infty), \quad (4.41)$$

con el término radiativo linealizado, sujeto a la condición inicial $t = 0 \rightarrow T = T_\infty$. Por lo tanto, la solución para la temperatura en la superficie T_s

$$T_s = T_\infty + \frac{\dot{q}_e''}{h_t} [1 - \exp\{(\gamma^2)\} \text{erfc}(\gamma)], \quad (4.42)$$

en donde $\gamma = h_t \sqrt{t/k\rho c_p}$ y $\text{erfc}(\eta) = 1 - \text{erf}(\eta)$ es la *función error complementaria*.

Ahora, análogo como se realizó para la teoría thermally thin, se busca ver el comportamiento para tiempos cortos y tiempos largos de exposición. Realizando una expansión en series

$$\gamma \rightarrow \text{largo} \Rightarrow \operatorname{erfc}(\eta) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\exp\{(-\gamma^2)\}}{\gamma}, \quad (4.43)$$

entonces la Ecuación 4.42

$$\frac{T_s - T_\infty}{\dot{q}_e''/h_t} \approx 1 - \frac{\exp\{(\gamma^2)\} - \exp\{(-\gamma^2)\}}{\sqrt{\pi}\gamma} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}\gamma}. \quad (4.44)$$

Entonces, para tiempos largos

$$t_{ig} \approx \frac{k\rho c_p}{\pi} \frac{(\dot{q}_e''/h_t)^2}{[\dot{q}_e'' - h_t(T_{ig} - T_\infty)]^2}, \quad (4.45)$$

y como en el caso thermally thin, cuando $t_{ig} \rightarrow \infty$ el flujo critico de ignición (Ecuación 4.20)

$$\dot{q}_{cri}'' = h_t(T_{ig} - T_\infty).$$

Mientras que para los tiempos cortos,

$$\gamma \rightarrow \text{pequeño} \Rightarrow \operatorname{erf}(\eta) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}}\gamma \quad (4.46)$$

$$\exp\{(\gamma^2)\} \approx 1 + \gamma^2 \quad (4.47)$$

entonces,

$$\frac{T_s - T_\infty}{\dot{q}_e''/h_t} \approx 1 - (1 + \gamma^2) \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}\gamma}\right) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}\gamma} \quad (4.48)$$

Por lo tanto, para tiempos cortos

$$t_{ig} \approx \frac{\pi}{4} k \rho c_p \left(\frac{T_{ig} - T_{\infty}}{\dot{q}_e''} \right)^2. \quad (4.49)$$

4.3.9. Consideraciones

Charring

Durante la combustión se forma una capa de carbón sobre la superficie del combustible que podría seguir descomponiéndose completamente hasta formar cenizas inertes o continuar con un proceso de carbonización o charring secundario, repitiéndose hasta completar la descomposición. Por otro lado, materiales non-charring se descomponen sin dejar residuos (Torero (2016)).

Después de ocurrido el charring, una oxidación superficial puede ser producida antes de la ignición, durante la fase de gasificación, que es una situación común en la combustión espontánea o ante bajos flujos radiativos. La temperatura superficial aumentará a medida que la capa de carbón crezca y aisle el material (Quintiere (2006)), generando impacto en la transferencia de masa y calor. (Torero (2016)).

La principal diferencia entre los tipos de material que producen carbón en la superficie y los que no, radica en la temperatura alcanzada tanto por las características aislantes mencionadas y la re-radiación desde esta capa (Mowrer (2004)).

Flujo crítico de ignición

El flujo crítico de ignición de un material sólido, $\dot{q}_{inc,cri}''$, representa el mínimo valor que provocará la gasificación suficiente en la superficie del material para permitir su ignición (Mowrer (2004)). Se pueden evaluar flujos críticos tanto para igniciones piloteadas como espontáneas, siendo mayores los flujos radiativos necesarios para la auto-ignición o ignición espontánea. Muy poca información se encuentra disponible sobre la ignición no piloteada, principalmente para madera, donde el flujo crítico suele ser dos a tres veces mayor que al usar un piloto (Mowrer (2004)).

Desde un punto de vista práctico, Mowrer (2004) habla de evaluar el potencial de ignición a un flujo externo particular, por un período de tiempo determinado dependiendo del experimento, pudiendo no representar el mínimo absoluto al ser

una aproximación a éste. En algunos trabajos, se ha utilizado un tiempo máximo de treinta minutos para determinar el flujo crítico de ignición. Sin embargo, como en este estudio el flujo térmico incidente va desde un valor máximo hasta un valor nulo, se utiliza el tiempo que demora dicho decaimiento para determinar el flujo crítico de ignición.

Temperatura de ignición y tiempo de ignición

Si se considera que el sólido es un material inerte hasta que se produzca la ignición y la fase gaseosa se resume a un coeficiente de transferencia de calor total h_T , se puede afirmar que la ignición ocurrirá al comienzo de la pirólisis, caracterizada simplemente por medio de una temperatura superficial característica, T_{ig} . El tiempo que transcurre entre la exposición a un flujo externo de calor y la ignición se denomina tiempo de ignición, t_{ig} (Torero (2016)). Con estos dos parámetros es posible representar todo el proceso de ignición.

Torero (2016) establece una relación entre el tiempo de ignición y el flujo crítico de ignición. Por ejemplo, si el tiempo de ignición es infinitamente largo, no existirá un gradiente de temperatura dentro del sólido y las pérdidas de calor serán equivalentes al calor incidente. Esto último representa el mínimo flujo de calor requerido para alcanzar la temperatura de ignición.

Tasa de pérdida de masa

La tasa de pérdida de masa (Mass Loss Rate, MLR) es una magnitud utilizada en el estudio de la combustión y la degradación térmica de materiales. Representa la cantidad de masa que un material pierde por unidad de tiempo, generalmente expresada en gramos por segundo (g/s). Este parámetro es clave en la evaluación del comportamiento al fuego de materiales sólidos, ya que permite cuantificar la velocidad a la cual un material combustible se degrada y se convierte en gases combustibles.

La tasa de pérdida de masa está directamente influenciada por factores como la temperatura, el flujo de calor incidente y la naturaleza del material. En general, un mayor flujo de calor incidente sobre un material aumentará su MLR debido a la mayor descomposición térmica. Este fenómeno es crítico en la modelación y simulación de incendios, ya que afecta la dinámica del fuego y la velocidad de propagación.

Desde el punto de vista experimental, la MLR se obtiene mediante instrumentos como la balanza de precisión acoplada a cámaras de ensayo de fuego o mediante conos calorimétricos. Estas técnicas permiten medir la masa que el material pierde conforme se somete a un flujo de calor controlado.

Tasa de liberación de calor

La tasa de liberación de calor (Heat Release Rate, HRR) es uno de los parámetros más importantes en el análisis del comportamiento al fuego de materiales y en la dinámica de incendios. Se define como la cantidad de energía liberada por un material combustible por unidad de tiempo, comúnmente expresada en kilowatt (kW) o megawatt (MW). La HRR describe cómo el calor es emitido a lo largo del tiempo y está directamente relacionada con la severidad de un incendio.

La tasa de liberación de calor está influenciada por la cantidad y tipo de combustible presente, así como por las condiciones de ventilación. En el contexto de la seguridad contra incendios, la tasa de liberación de calor permite estimar la intensidad de un fuego y la energía que puede transferirse a los materiales cercanos, afectando la propagación del fuego y la capacidad de los sistemas de extinción para controlarlo.

El método experimental más común para medir la tasa de liberación de calor es mediante el uso del cono calorimétrico, que aplica un flujo de calor constante sobre una muestra y mide el calor liberado durante la combustión. Este valor es crítico para evaluar el riesgo que un material representa en caso de incendio y para el diseño de medidas de prevención y control.

Métodos para medir la tasa de liberación de calor

Si bien el uso del cono calorimétrico es el método experimental más común para medir la tasa de liberación de calor, existen diferentes métodos para medir esta variable en otras configuraciones experimentales. Los métodos más comunes disponibles en la literatura basados en la selección realizada por Babrauskas (1986) y Janssens (1995) son los siguientes:

- Método del aumento de entalpía sensible: Este método se basa en medir la temperatura de un flujo de aire constante que pasa a través de una cámara de combustión. El aumento de entalpía determina la tasa de liberación de calor

de la muestra en combustión (Babrauskas (1986); Janssens (1995)).

- Método de compensación: Consiste en mantener una temperatura constante en los gases producidos por la combustión del material. Para lograr la temperatura constante, es necesario suministrar calor con un quemador a la muestra. El calor requerido para mantener la temperatura constante es el negativo de la tasa de liberación de calor de la muestra (Babrauskas (1986); Janssens (1995)).
- Método de sustitución: La tasa de liberación de calor se determina a partir del flujo suministrado a un quemador de gas durante una segunda prueba, duplicando la curva de tiempo de la temperatura de los productos de combustión medida para una muestra de prueba durante la primera prueba (Janssens (1995)).
- Método de consumo de oxígeno: Existe una relación entre el oxígeno consumido en una reacción de combustión y la tasa de liberación de calor del combustible en combustión. Es necesario determinar la cantidad de oxígeno eliminada del flujo de combustión (Babrauskas (1986); Janssens (1995)).
- Método de evolución de dióxido de carbono y monóxido de carbono: Es similar al método de consumo de oxígeno. En este caso, se monitorea la producción de dióxido de carbono y monóxido de carbono. Existe una relación entre la producción de dióxido de carbono y monóxido de carbono y la tasa de liberación de calor del combustible (Babrauskas (1986)).
- Método de alturas de llama en incendios de combustión libre: Este método estima la tasa de liberación de calor y otras propiedades de la muestra en función de la altura de las llamas. Se utiliza en incendios de combustión libre (Babrauskas (1986)).
- Método de la tasa de pérdida de masa: La tasa de liberación de calor se determina conociendo el calor de combustión del material y midiendo la pérdida de masa de la muestra. La multiplicación del calor de combustión y la tasa de pérdida de masa da la tasa de liberación de calor de la muestra en combustión.

En este estudio se utilizan tres de los métodos descritos anteriormente. Estos

métodos son:

- Método del aumento de entalpía sensible (SER)
- Método de consumo de oxígeno (OC)
- Método de la tasa de pérdida de masa (MLR)

A continuación, se explican estos tres métodos en detalle.

Método del aumento de entalpía sensible

Este método se basa en el aumento de temperatura de una corriente continua de aire que fluye a través de una cámara de combustión. El aumento de entalpía y la tasa de flujo de masa de aire determinan la tasa de liberación de calor de la muestra en combustión. Supongamos un volumen de control como se describe en la Figura 4.6.

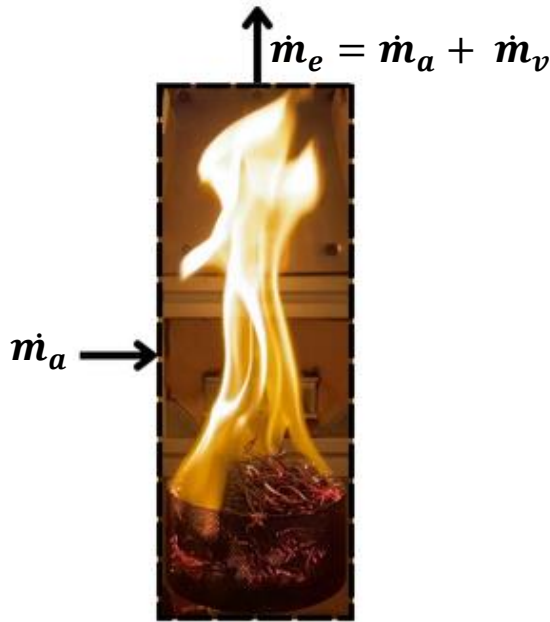


Figura 4.6: Balance de flujo de masa. Fuente: Elaboración propia.

La tasa de flujo de masa $\dot{m}_a$ entra en el sistema. Parte de esta tasa de flujo está involucrada en la reacción de combustión. El combustible se vaporiza a una tasa $\dot{m}_v$. Entonces, los gases de salida $\dot{m}_e$ son la suma del flujo de aire de entrada $\dot{m}_a$ y los

vapores generados $\dot{m}_v$. Janssens (1995) define la tasa de liberación de calor de una reacción de combustión en un volumen de control con la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} - \dot{Q}_{perdidas} = c_p \dot{m}_e (T_e - T_o) - c_p \dot{m}_a (T_a - T_o) - c_p \dot{m}_v (T_v - T_o) \quad (4.50)$$

Donde el término $\dot{Q}$ es la tasa de liberación de calor (kW) de la reacción de combustión, $\dot{Q}_{perdidas}$ es el calor perdido hacia los alrededores (kW), c_p es el calor específico ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T_e es la temperatura de los productos de combustión que salen del volumen de control (K), T_a es la temperatura del aire que entra en la zona de combustión (K), T_v es la temperatura de los volátiles que entran en la zona de combustión (K), y T_o es la temperatura de referencia (K). Las pérdidas de calor hacia los alrededores $\dot{Q}_{perdidas}$ son el componente radiativo del calor total liberado por la llama.

Si $\dot{m}_a$ es mucho mayor que $\dot{m}_v$, entonces $\dot{m}_v$ es despreciable, y $\dot{m}_a \approx \dot{m}_e$. Esto nos lleva a la Ecuación 4.51:

$$\dot{Q} - \dot{Q}_{perdidas} = c_p \dot{m}_a (T_e - T_a) \quad (4.51)$$

Suponiendo que las pérdidas de calor son independientes del combustible y que son una fracción constante de la tasa total de calor liberada (Janssens (1995)):

$$X_r = \frac{\dot{Q}_{perdidas}}{\dot{Q}} \quad (4.52)$$

El término X_r es la proporción de las pérdidas de calor (o fracción radiativa) de la tasa total de liberación de calor de la llama. Reemplazando la Ecuación 4.52 en la Ecuación 4.51 se obtiene:

$$\dot{Q} = \frac{c_p \dot{m}_a (T_e - T_a)}{1 - X_r} \quad (4.53)$$

$$\dot{Q} = K(T_e - T_a) \quad (4.54)$$

Donde K es el factor de calibración, y puede determinarse experimentalmente. Si hay un calentador radiante en la cámara, la Ecuación 4.54 sigue siendo válida, T_a es reemplazado por una temperatura de referencia. La temperatura de referencia es la temperatura de los gases de salida en estado estable cuando se encienden los calentadores radiantes. Si se establece el término de pérdidas de calor X_r en 0, la Ecuación 4.53 se convierte en la Ecuación 4.55:

$$\dot{Q}_{conv} = c_p \dot{m}_a (T_e - T_a) \quad (4.55)$$

Donde $\dot{Q}_{conv}$ ahora representa solo el componente convectivo del calor liberado por la llama. Si se utiliza la Ecuación 4.55, la tasa de liberación de calor será subestimada. Entonces, al incluir el término χ_r en la Ecuación 4.55, se considera que hay pérdidas de calor hacia los alrededores. Pero el término χ_r se asume como constante y el mismo para el combustible de calibración y para todos los combustibles. Esta suposición ha demostrado ser incorrecta para algunos combustibles en el calorímetro OSU. Algunos autores han demostrado con el calorímetro OSU que la constante de calibración depende del material probado (Babrauskas (1986); Tewarson (2002); Filipczak *et al.* (2005)) y también es dependiente del tiempo (Filipczak *et al.* (2005); Evans y Breden (1978); Lyon y Abramowitz (1995)).

Calorimetría de consumo de oxígeno

A continuación se explica el método para determinar la tasa de liberación de calor de una llama conociendo el oxígeno consumido durante la reacción de combustión y el flujo de aire involucrado. El concepto de este método es que existe una energía constante liberada por unidad de masa de oxígeno consumido. Esta relación fue descubierta por Thornton (1917) para una lista de materiales orgánicos. La constante de energía es de $13,1 \text{ kJ g}^{-1}$ para oxígeno consumido y fue encontrada por Huggett (1980). La constante tiene una variabilidad de $\pm 5\%$ (Janssens (1995); Biteau *et al.* (2008)). Esta relación se muestra en la Ecuación 4.56.

$$\dot{Q}_{OC} = E\Delta\dot{m}_{O_2} \quad (4.56)$$

Donde E es la constante de energía, $\Delta\dot{m}_{O_2}$ es la tasa de oxígeno consumido en la combustión y $\dot{Q}_{OC}$ es la tasa de liberación de calor. En una combustión incompleta, algunas moléculas de O_2 reaccionan con carbono y forman monóxido de carbono. Por lo tanto, en una combustión incompleta, es necesario considerar la cantidad de energía requerida para oxidar el monóxido de carbono a dióxido de carbono. Esta cantidad de energía debe restarse de la ecuación original (Biteau *et al.* (2008)). Tener en cuenta la cantidad de CO producido durante la combustión permite obtener resultados más precisos. Parker (1984) propuso varias ecuaciones para determinar la tasa de liberación de calor en diferentes escenarios. Algunas de las variables consideradas en las ecuaciones para determinar la tasa de liberación de calor son:

- Mediciones de concentración de oxígeno
- Mediciones de concentración de oxígeno y monóxido de carbono
- Mediciones de oxígeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono
- Atrapar o descartar el dióxido de carbono en el aparato
- Ignorar la presencia de monóxido de carbono
- Considerar o no la presencia de vapor de agua en el aire de entrada

Estas ecuaciones consideran la presencia de nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y vapor de agua en el aire. Chow y Han (2011) realizó una compilación de ecuaciones para diferentes mediciones de especies y también incluyó la producción de hollín en las ecuaciones. Existen otras relaciones utilizadas para calcular la HRR conociendo las tasas de generación de monóxido de carbono y dióxido de carbono (for Testing y Materials (2003)).

Calorimetría de tasa de pérdida de masa

La tasa de liberación de calor de un material en fase condensada en combustión puede determinarse si se conocen la tasa de pérdida de masa y el calor de combustión del material. La Ecuación 4.57 muestra esta relación.

$$\dot{Q}_{MLR} = \chi \dot{m} \Delta H_c \quad (4.57)$$

Donde χ se define como un factor entre 0 y 1 que indica qué tan completa fue la reacción de combustión, ΔH_c es el calor de combustión. Para algunos materiales, el calor de combustión es conocido y tabulado, pero para otros más complejos, debe determinarse utilizando un calorímetro de bomba de oxígeno. La tasa de pérdida de masa $\dot{m}$ se define como la tasa de masa consumida en la reacción de combustión dividida por el tiempo que tarda en consumirse. Es la pendiente de la ecuación que describe la relación entre la pérdida de masa de la muestra en combustión a lo largo del tiempo.

4.4. Biomasa

4.4.1. Densidad de masa

La densidad de masa del combustible, ρ_{fuel} , representa la masa individual de muestra combustible seca dividido por el espacio que ocupa (Keane (2015)). Se calcula como:

$$\rho_{fuel} = \frac{m_{fuel}}{v_{fuel}} \quad (4.58)$$

El volumen de muestras con formas irregulares, como el combustible forestal, se puede determinar por aproximación, asumiendo cierta semejanza a una forma geométrica estándar, estableciendo dimensiones promedio que permitan obtener un volumen referencial. Sin embargo, esto genera gran error cuando se trabaja con muestras muy pequeñas (como acículas de *Pinus radiata*). Una metodología alternativa consiste en sumergir la partícula en algún líquido y medir la diferencia de volumen provocada, teniendo en consideración que el líquido no sea absorbido por la muestra. Por otro lado, antes de ser pesada la muestra, esta se seca en un horno y luego se aplica la Ecuación 4.58 descrita arriba.

4.4.2. Densidad aparente

La densidad aparente de una muestra combustible (bulk density en inglés), ρ_a , representa la masa global del material que compone el combustible por unidad de volumen del espacio en el que esta masa se encuentra. A diferencia de la densidad de masa, la densidad aparente incluye los espacios vacíos (o con aire) entre las partículas del combustible (Keane (2015)). Se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{m_{fuel}}{v_{basket}} \quad (4.59)$$

en la cual se desprecia la masa de aire presente en el volumen de control (v_{basket}). Comúnmente se utiliza para representar la distribución espacial del material combustible. Por ejemplo, este concepto se puede aplicar a las copas de los árboles para modelar incendios de copa, o para modelar incendios de superficie de una vegetación mediana o de baja altura.

4.4.3. Packing ratio y porosidad

El packing ratio, β , es un índice usado para caracterizar la compactación de un estrato vegetal, calculado como:

$$\beta = \frac{\rho_a}{\rho_{fuel}} \quad (4.60)$$

siendo ρ_a la densidad aparente y ρ_{fuel} la densidad de masa del combustible forestal.

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, resulta ser un parámetro de gran interés porque existe una mayor pérdida de calor en estratos con bajos packing ratios (gran cantidad de espacios con aire), mientras que para elevados packing ratios, la presencia de aire y profundidad de penetración del calor es menor, resultando en una propagación e intensidad de fuego menores.

Otro indicador del nivel de compactación es la porosidad, ϵ , definida como la razón del volumen de aire (o vacío) respecto al total de volumen del estrato (Keane (2015)):

$$\epsilon = \frac{V_{aire}}{V_{basket}} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{fuel}} \quad (4.61)$$

un tercer parámetro de caracterización de la distribución de la biomasa es la fracción en volumen que ocupa el material combustible, α_{fuel} , respecto del volumen total del estrato:

$$\alpha_{fuel} = \frac{V_{fuel}}{V_{basket}} \quad (4.62)$$

Si la masa de aire, m_{aire} , es despreciable al interior del estrato, se tiene que $\alpha_{fuel} = \beta$, y entonces $\epsilon = 1 - \alpha_{fuel}$.

4.5. Retardantes de llama

Definición

Los retardantes de fuego son sustancias diseñadas para prevenir, ralentizar o detener la propagación del fuego al incrementar la resistencia al calor o inhibir las reacciones químicas responsables de la combustión (Vargas (2023)).

Clasificación de retardantes de llama

Existen varias clasificaciones de retardantes de fuego según el tipo de materiales que protegen y la forma en que interactúan con el fuego. A continuación se detallan algunas de las clases más comunes:

- Clase A: son retardantes diseñados para combatir incendios en materiales combustibles sólidos como madera, papel, telas y plásticos, que no propagan rápidamente las llamas. Estos retardantes disminuyen la temperatura de ignición y retrasan la combustión (Tonello *et al.* (2017)).
- Clase B: aplicados para incendios provocados por líquidos inflamables como aceites, gasolina y grasas. Este tipo de retardante crea una barrera que sofoca las llamas al eliminar el oxígeno de la combustión (Tonello (2003)).
- Clase C: retardantes diseñados para combatir incendios en equipos eléctricos y

electrónicos que están en funcionamiento. Estos materiales no son conductores de electricidad, lo que evita que se genere un cortocircuito al aplicarlos (Botero (2012)).

- Clase D: son retardantes especializados para incendios que involucran metales combustibles como sodio, potasio, magnesio o titanio. Estos materiales requieren un tipo específico de agente extintor que absorba el calor y elimine la reacción con el aire (Martínez *et al.* (2018)).
- Clase K: estos retardantes se utilizan principalmente para incendios relacionados con aceites de cocina y grasas animales o vegetales. Crean una capa espumosa que sofoca las llamas y enfría la sustancia (Milla y Castillo (2010)).

Formas de uso

El uso de retardantes de fuego varía según el material a proteger. Se aplican en materiales estructurales, como la madera o el concreto, o en la protección contra incendios forestales mediante aerosoles y dispersores aéreos. En este último caso, los retardantes de fuego suelen ser aplicados sobre áreas forestales para evitar la propagación del fuego (Ferrer (2008)).

Dilución y Concentración

Antes de ser aplicados, los retardantes de fuego se diluyen en agua para ajustar su concentración. Este proceso asegura una dispersión uniforme y reduce la viscosidad, facilitando la cobertura de grandes áreas. Las concentraciones comunes suelen estar entre el 10 % y 30 % volumen-volumen dependiendo del tipo de material que se desea proteger, la naturaleza del retardante y el nivel de resistencia al fuego necesario. Por ejemplo, en incendios forestales, los retardantes se diluyen y son esparcidos por aviones cisterna o helicópteros (Tonello *et al.* (2017); Milla y Castillo (2010)).

Aplicación en áreas forestales: los retardantes se mezclan con agua y se aplican mediante equipos aéreos para crear una barrera química en las áreas de vegetación. Esta mezcla diluida cubre la vegetación y reduce su inflamabilidad, inhibiendo la propagación del fuego. Aplicación en estructuras: En el caso de materiales de construcción, como madera o concreto, los retardantes pueden aplicarse en forma de pintura o aerosol, previamente diluidos para garantizar una cobertura homogénea y eficaz.

Esta práctica de dilución previa no solo facilita la aplicación, sino que también permite un uso más eficiente de los retardantes, maximizando su área de cobertura.

La determinación de la concentración a la cual se aplica el retardante se realiza por medio de la formula para % V/V cuya expresión es la siguiente

$$\% \frac{V}{V} = \frac{\text{Volumen de soluto}}{\text{Volumen de solución}} \cdot 100 \quad (4.63)$$

siendo el soluto el retardante puro y la solución la suma entre retardante puro y agua.

Phos-Chek

El Phos-Chek LC65A-Fx es un tipo de retardante de fuego clase A que se utiliza mayormente para la prevención y contención de incendios forestales, y es uno de los más usados por agencias gubernamentales y bomberos forestales en todo el mundo, como es el caso de CONAF en Chile. Algunas características de este producto son

- Composición química: el Phos-Chek LC65A-Fx está compuesto principalmente de fosfatos de amonio. Los fosfatos actúan al interrumpir las reacciones químicas que propagan el fuego, lo que lo convierte en un retardante muy efectivo para la vegetación seca en incendios forestales.
- Modo de acción: al ser aplicado sobre la vegetación, el Phos-Chek LC65A-Fx crea una capa química que inhibe la combustión. Esta capa reduce la temperatura y cambia la estructura química de los materiales inflamables, haciéndolos menos propensos a quemarse. Es especialmente útil para crear barreras alrededor de áreas forestales, protegiendo estructuras cercanas o zonas vulnerables.
- Dilución y Aplicación: este retardante se diluye con agua antes de su aplicación, generalmente utilizando aeronaves (aviones cisterna o helicópteros). La concentración de la mezcla depende de las condiciones del fuego y del área que se necesite proteger, pero generalmente el fabricante recomienda utilizar un 20 % V/V.
- Seguridad y Medio Ambiente: el Phos-Chek LC65A-Fx es conocido por su bajo impacto ambiental comparado con otros productos químicos retardantes,

siendo clasificado como seguro para el entorno y para la vida silvestre cuando se utiliza correctamente. Sin embargo, es importante monitorear su uso en áreas cercanas a cuerpos de agua, ya que puede tener efectos nocivos si se aplica en grandes concentraciones en esos entornos.



Figura 4.7: Avión de combate contra incendios Ten Tanker esparciendo retardante Phos-Chek en área forestal de California, Estados Unidos. Fuente: Los Ángeles Times (2020)

5 | Diseño Experimental

Índice

5.1. Equipo experimental Idealized Firebrand Ignition Test (I-FIT)	47
5.1.1. Descripción	47
5.1.2. Heater: propiedades físicas y radiativas	48
5.1.3. Radiómetro	50
5.1.4. Motor lineal	51
5.1.5. Recipiente porta muestras (basket)	52
5.1.6. Termocuplas	53
5.1.7. Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)	54
5.1.8. Piloto (Kanthal)	54
5.1.9. Variac	54
5.1.10. Cámara Basler	55
5.2. Equipo experimental Sensible heat Calorimetry Apparatus (SCALA)	55
5.2.1. Descripción	55
5.2.2. Heater	56
5.2.3. Piloto	57
5.2.4. Recipiente porta muestras (basket)	58
5.2.5. Termocuplas	59
5.2.6. Celda de carga	60
5.2.7. Entrada de aire	60
5.3. Equipos adicionales de apoyo	60

5.3.1. Horno y Cámara de humedad	61
5.3.2. Picnómetro	61
5.3.3. Balanza	62

5.1. Equipo experimental Idealized Firebrand Ignition Test (I-FIT)

5.1.1. Descripción

Uno de los dos conjuntos experimentales utilizados en este trabajo es mostrado en la Figura 5.1, y es conocido como I-FIT (Idealized Firebrand Ignition Test). Fue diseñado e implementado para reproducir condiciones idealizadas de un incendio forestal, en el contexto de una partícula incandescente (pavesa) que viaja por el aire y enciende un estrato de biomasa, representando así, lo que se conoce como ignición discontinua. El arreglo experimental se encuentra rodeado por Plexiglas para evitar ruidos en las mediciones de temperaturas radiales producto de corrientes de aire, permitiendo el flujo necesario para que la combustión pueda existir.

En este montaje, la emisión radiativa de la pavesa es representada por la radiación proveniente de una resistencia eléctrica de nitruro de silicio. La energía es proporcionada por la red eléctrica de 220 V, elevada por medio de un transformador trifásico y regulada por un transformador variable ITECH Variac. Un motor lineal micrométrico sirve para posicionar el heater en la sección anular del estrato vegetal del porta muestras o basket. Al interior de la biomasa se ubican radialmente un conjunto de termocuplas que miden el calentamiento del estrato. El encendido pilotado se logra con un alambre *kanthal* posicionado a 2 centímetros por encima del basket. Los datos son almacenados en un computador, digitalizados por un sistema de adquisición de datos.

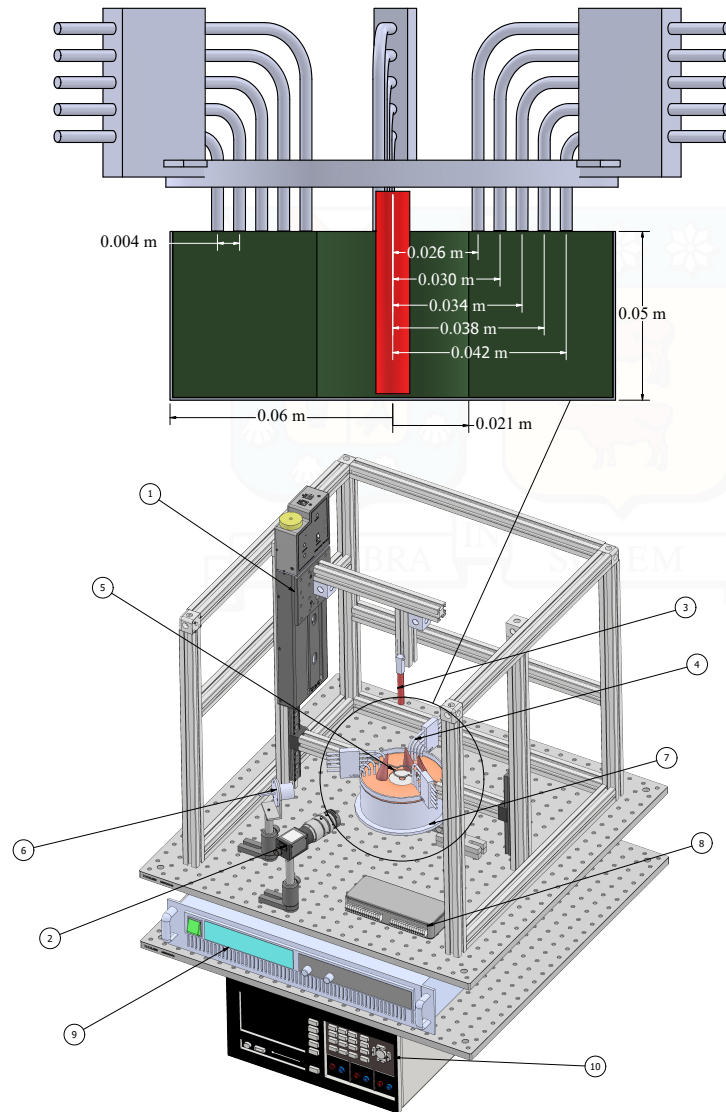


Figura 5.1: Aparato experimental I-FIT. ①: Motor lineal, ②: Cámara Basler, ③: Heater, ④: Termocuplas, ⑤: Piloto (Kanthal), ⑥: Radiómetro, ⑦: Basket, ⑧: Sistema de adquisición de datos, ⑨: Variac, ⑩: Fuente de poder. Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Heater: propiedades físicas y radiativas

La geometría y capacidad radiativa son dos de las características fundamentales que deben ser analizadas al momento de seleccionar la fuente radiativa. Manzello *et al.* (2006a); Manzello *et al.* (2006b); Manzello *et al.* (2008); Manzello *et al.* (2009) realizó varios estudios sobre la ignición por spotting, determinando formas y dimensiones características de las partículas incandescentes desprendidas en los distintos

tipos de incendios forestales. Estos estudio han mostrado que cilindros y discos son las formas geométricas más comunes, concordando con el origen de gran parte de las pavesas incandescentes, provenientes de secciones transversales y circulares de ramas. Estudios más recientes sobre la geometría de las pavesas muestran resultados algo diferentes. Filkov *et al.* (2017) realizó su investigación recolectando pavesas en incendios controlados en bosques de pino, concluyendo que las formas mencionadas efectivamente se encuentran, pero son las formas rectangulares, provenientes de la corteza de los árboles, las más frecuentes.

Basados en la distribución superficial de pavesas originadas en incendios del tipo IUF, se escoge un heater de nitruro de silicio (Si_3N_4) manufacturado por Bach RC. Se opta por una fuente de radiación cilíndrica de radio $r_h = 5$ mm y largo de la zona caliente $l = 46$ mm, resultando en una superficie de 3.612 mm^2 , ver Figura 5.2b.

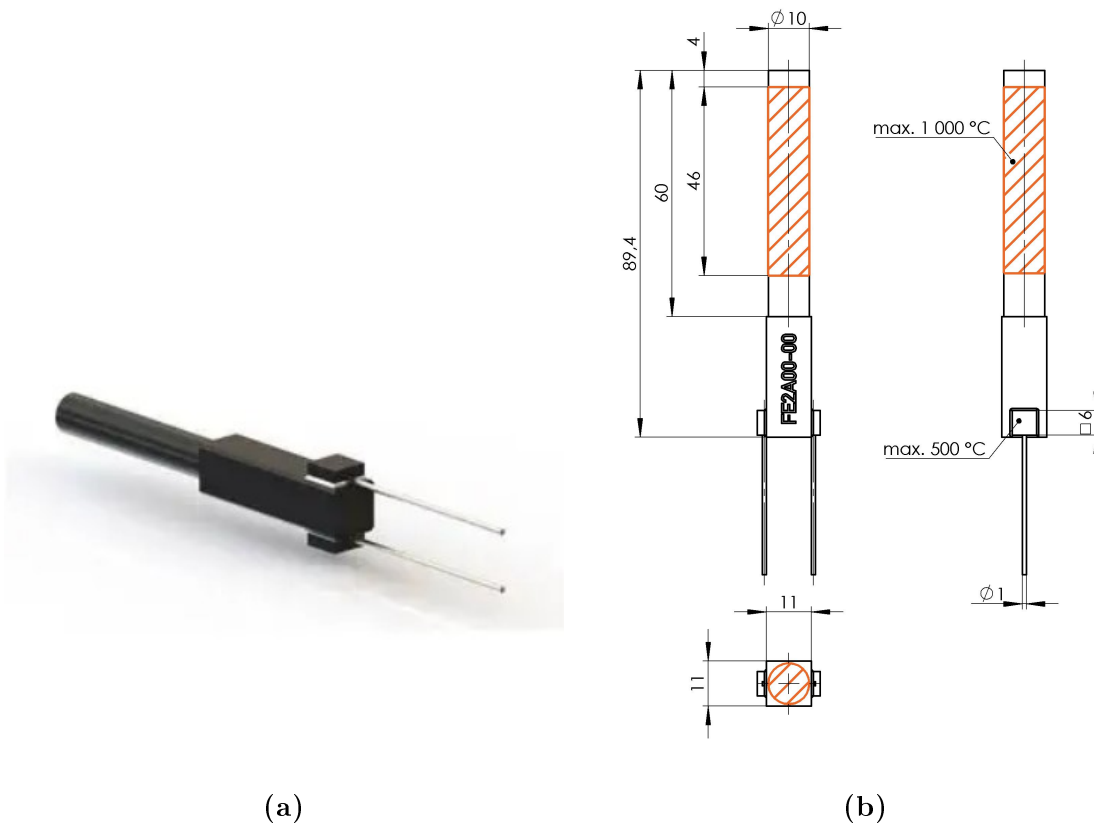


Figura 5.2: (a) Heater Bach RC hecho. (b) Dimensiones heater. Fuente: BACH Resistor Ceramics.

La emisividad del nitruro de silicio es mayor a 0.9 según información reportada por Bach RC, apreciable en la Tabla 5.1, junto a las demás características de interés de este material. Las especificaciones técnicas del heater señalan una resistencia eléctrica base de $132 \pm 25 \%$ medida a 20°C y un rango máximo de voltaje suministrado de 230 V al cual se alcanza teóricamente la temperatura máxima segura. Notar que el voltaje máximo suministrado al heater durante los experimentos fue de 250 V, ligeramente arriba del rango recomendado. Con este heater se alcanzan temperaturas de hasta 1000°C según el rango de operación segura recomendado de fábrica.

Parámetro	Símbolo convencional	Unidad	Valor
Temp. máxima segura	T_{max}	$^\circ\text{C}$	1000
Conductividad térmica	λ	W/mK	40
Calor específico	c_p	J/kgK	750
Densidad	ρ	kg/m^3	3210
Temp. de shock para la resistencia	ΔT	K	500
Emisividad (ref. 1100°C)	ϵ	-	0.96
Módulo de Young	E	GPa	320
Módulo de ruptura	δ_{bb}	MPa	400
Módulo de Weibull	m	-	7.9
Esfuerzo de compresión	δ_D	MPa	2000
Coefficiente de expansión térmica	α	10^{-6} K^{-1}	3

Tabla 5.1: Propiedades físicas y radiativas del compuesto del heater. Fuente: BACH Resistor Ceramics

5.1.3. Radiómetro

El radiómetro es un sensor que permite obtener la radiación incidente de forma local al sensor. El cual, considera una ventana de zafiro que permite proteger el aparato. Este aparato permite obtener la radiación incidente al porta muestra y conocer cuanto es la radiación que está llegando en la pared interna. Al igual que las termocuplas, el radiómetro necesita un sistema de adquisición de datos que registre y guarde los valores obtenidos. Una vez que se registran los datos a la distancia necesaria, es posible obtener los valores de flujo de calor incidente al radiómetro a partir de la calibración en kW/m^2 , desde un valor de voltaje dado. Dicha calibración

es de $7.246 \text{ kW/m}^2/\text{mV}$. Esto permite obtener físicamente cuanto es el flujo de calor que recibe el combustible vegetal.

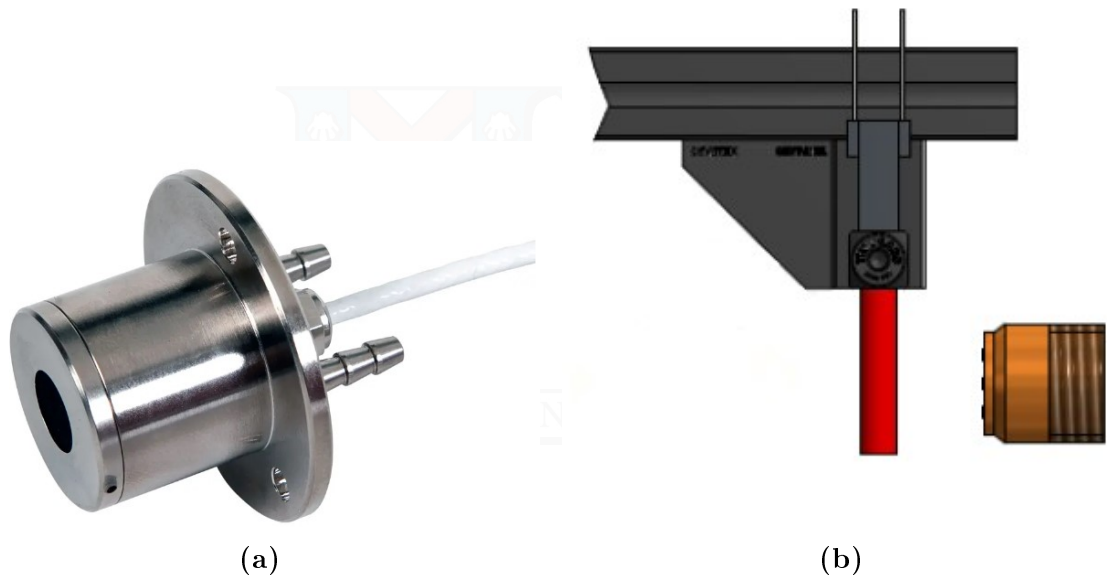


Figura 5.3: (a) Radiómetro Hukseflux SBG01-020. Fuente: Hukseflux. (b) Vista calibración del heater. Fuente: elaboración propia

5.1.4. Motor lineal

El motor lineal es fabricado por Thorlabs, modelo LTS150, con desplazamiento lineal máximo de 150 mm y un paso mínimo de 1 mm. En posición vertical permite una velocidad de hasta 3 mm/s soportando hasta 4 kg. Estas últimas características son de relevancia para retirar rápidamente el heater desde la llama generada cuando ha tenido lugar la ignición.



Figura 5.4: Motor lineal Thorlabs modelo LTS150. Fuente: Thorlabs

5.1.5. Recipiente porta muestras (basket)

La forma y distribución axisimétrica del estrato vegetal fue elegida para simplificar los cálculos de radiación incidente, $\dot{q}_{inc}''$. También, es conocida la expresión del factor de forma entre la superficie cilíndrica del heater $A_h = 2\pi r_h l$ y la del estrato $A_i = 2\pi r_i l$.

El recipiente de acero inoxidable que contiene las muestras posee una altura igual a la zona caliente del heater. Los radios interno ($r_i = 65$ mm) y externo ($r_o = 20$ mm) fueron elegidos con tal de que el espesor del estrato ($r_o - r_i$) representara condiciones realistas, y controlar el *bending* de las acículas de *Pinus radiata*. También, se incorporó una malla delgada lo suficientemente abierta para no interferir con la radiación incidente al estrato.

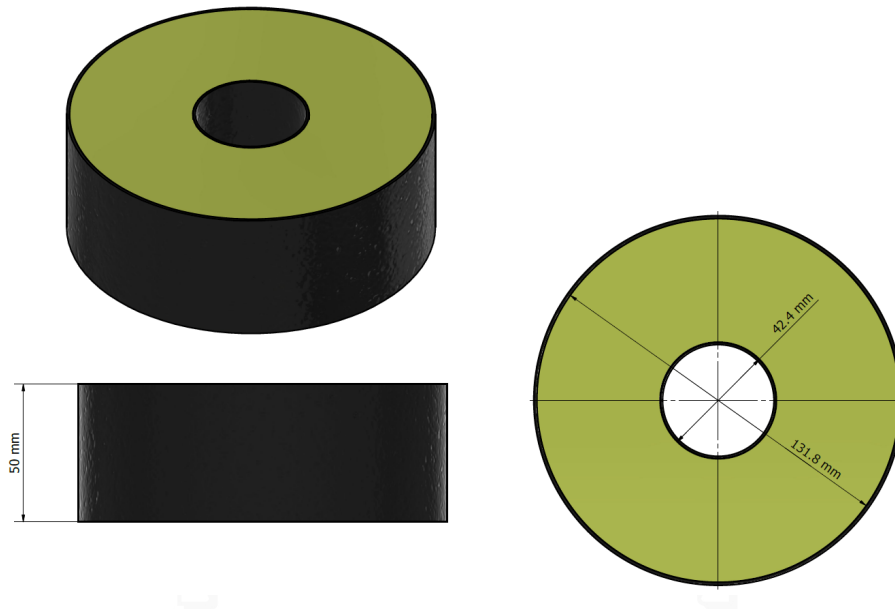


Figura 5.5: Recipiente porta muestras (basket) I-FIT. Fuente: elaboración propia

5.1.6. Termocuplas

Formada por la unión de dos metales distintos, produce una diferencia de potencial pequeña (mV), y que basado en el efecto Seebeck, es función de la diferencia de temperatura. Las termocuplas elegidas son del tipo N, donde uno de los metales es una aleación denominada cromel (Ni-Cr) y el otro alumel (Ni-Al). Así, un rango operativo se obtiene un rango de medición de entre -200°C a 1370°C . Su bajo costo y linealización de respuesta la convierten en una buena opción.

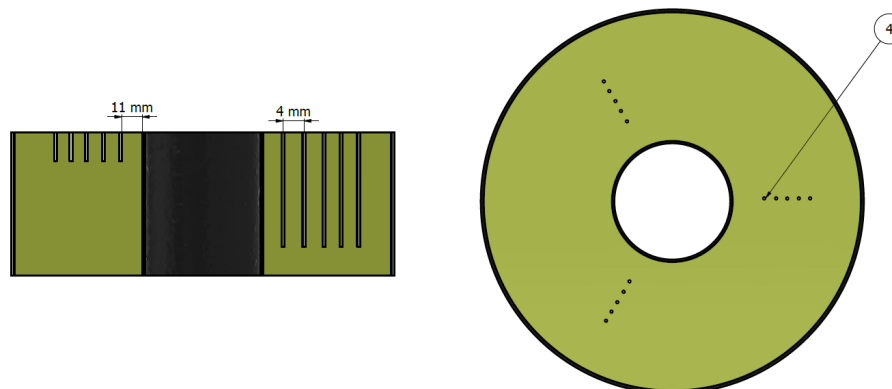


Figura 5.6: Distribución de termocuplas en el basket. Fuente: elaboración propia

5.1.7. Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)

Los datos provenientes de las cinco termocuplas dispuestas radialmente (15 en total) en el estrato vegetal son enviados al DAQ como señal analógica a cinco canales independientes. El DAQ procesa la señal en tiempo real para enviarla mediante conexión USB al computador donde se registran los datos. El dispositivo utilizado corresponde al módulo IOtech Personal Daq 56 Series y las mediciones se realizan a una frecuencia de 1.5 Hz



Figura 5.7: IOtech Personal Daq 56 Series. Fuente: Digilent

5.1.8. Piloto (Kanthal)

El Kanthal es una resistencia eléctrica de metal que permite generar la llama en el estrato combustible. Es decir, sirve de piloto para la ignición en cuestión como se menciona anteriormente. La forma en que trabaja consiste en colocar la aleación metálica en forma de anillo de forma local, y con el traspaso de corriente se torna incandescente, liberando calor hacia el medio. Este aparato es utilizado para disminuir la variabilidad entre las mediciones, sin modificar el comportamiento del experimento.

5.1.9. Variac

Con el fin de suministrar energía al heater una fuente de poder o Variac (transformador variable) fue instalado, el cual permite variar el voltaje que requiere el heater y así calentarlo. Fabricado por Carroll & Meynell, modelo 4A-CMV4X-1, el cual requiere una entrada de 210 V y corriente alterna. Dicha fuente de poder está conectada mediante un computador, por lo tanto todas las modificaciones de voltaje, potencia y corriente fueron posible modificar de forma manual de forma digital. Cabe destacar, que para un buen funcionamiento y mayor seguridad es necesario ajustar

un máximo de 400 W en la fuente de poder, con el fin de no entregar demasiada energía al heater y dañar el aparato.

5.1.10. Cámara Basler

Para registrar el momento de ocurrencia de la ignición, se utiliza una cámara Basler ace acA720-520uc USB 3.0 que permite grabar a color 525 cuadros por segundo (fps) en una resolución de 720 x 540 píxeles.



Figura 5.8: Cámara Basler ace acA720-520uc. Fuente: Basler AG

5.2. Equipo experimental Sensible heat Calorimetry Apparatus (SCALA)

5.2.1. Descripción

El segundo de los dos conjuntos experimentales utilizados en este trabajo es mostrado en la Figura 5.9, y es conocido como SCALA (Sensible Heat Calorimetry Apparatus). Fue diseñado e implementado para reproducir condiciones idealizadas de un incendio forestal, en el contexto de un lecho poroso sometido a la radiación de un foco de incendio adyacente, representando así, lo que se conoce como ignición continua. El arreglo experimental se encuentra rodeado por 4 ventanas, cada una compuesta por dos vidrios resistentes a altas temperaturas. En la parte inferior de la estructura de aluminio hay un plenum hecho de estaño, el cual conecta un sistema de suministro de aire a la cámara de combustión. En la parte superior del calorímetro

hay una estructura de acero inoxidable en forma de campana que conduce los gases hacia el exterior.

En este montaje, la emisión radiativa es representada por la radiación proveniente de 2 paneles fabricados con 4 placas de carburo de silicio (SiC) de tipo U. La energía es proporcionada por la red eléctrica de 220 V y regulada por un transformador. El encendido pilotado se logra con una especie de chispero doble posicionado a 1,5 cm por encima del basket. Los datos son almacenados en un computador y digitalizados por un sistema de adquisición de datos.

Este aparato es capaz de medir la tasa de liberación de calor a partir de diversas metodologías simultáneamente, las que se describen en la Subsección 4.3.9

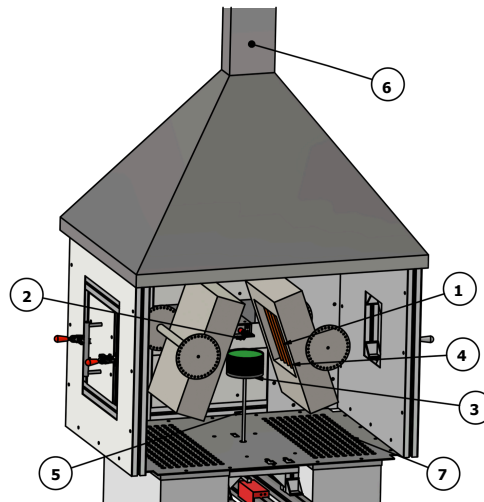


Figura 5.9: Aparato experimental SCALA. ①: Heater, ②: Piloto, ③: Basket, ④: Termocuplas, ⑤: Celda de carga, ⑥: Sensores láser, ⑦: Entrada de aire. Fuente: elaboración propia

5.2.2. Heater

La fuente de calor del SCALA es capaz de proporcionar un flujo de calor entre 0 y 50 kW/m² sobre el área del espécimen. Para ello, se dispone de 2 paneles de calefacción radiante compuestos por 4 elementos calefactores de carburo de silicio (SiC) tipo U cada uno. Los elementos calefactores de SiC son fabricados por ZhengzhouLEPE Refractory Materials Co., LTD. La Figura 5.10 muestra 4 de las resistencias descritas anteriormente. La resistencia nominal es de 4:1 ohmios. Se calcula midiendo la

tensión y la corriente de los elementos cuando alcanzan una temperatura superficial de 1000°C .



Figura 5.10: Resistencias de carburo de silicio tipo U. Fuente: elaboración propia

La estructura de los calentadores se diseñó con el programa Autodesk Inventor, ver la Figura 5.11. El objetivo del diseño era sujetar los elementos calefactores sin aplicarles demasiada presión y dirigir el calor en una sola dirección.

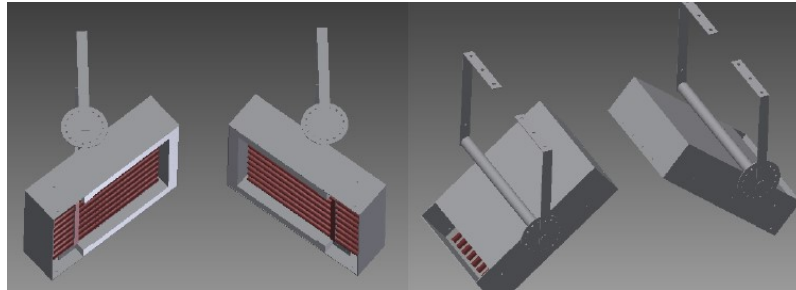


Figura 5.11: Diseño de heaters. Fuente: elaboración propia

El flujo de calor incidente sobre el espécimen se regula variando la tensión en el regulador de voltaje.

5.2.3. Piloto

La Figura 5.12 muestra el piloto utilizado para el equipo SCALA, el cual es similar al piloto que podemos encontrar en estufas a gas. Dicho elemento es calentado a través de un transformador eléctrico de ignición de la marca COFI ignitions modelo TRS1020. Este piloto como ya se mencionó en la descripción general del equipo, se posiciona aproximadamente a 1,5 cm de la muestra de combustible.



Figura 5.12: Piloto utilizado para el equipo SCALA. Fuente: elaboración propia

5.2.4. Recipiente porta muestras (basket)

La Figura 5.13 muestra el porta muestras utilizado para el equipo SCALA, el cual, como se puede apreciar, presenta diferencias con el porta muestras del equipo I-FIT, tales como su geometría maciza (sin radio interno) y el mallado externo que presenta en toda la superficie externa. Otros elementos que difieren entre ambos equipos son el tamaño y el aislamiento de la base, en el caso del SCALA el porta muestras tiene un alto de 4 cm y un diámetro de 12 cm aproximadamente, mientras que la aislación está dada por una placa de fibra de cerámica que esta dentro del porta muestras.

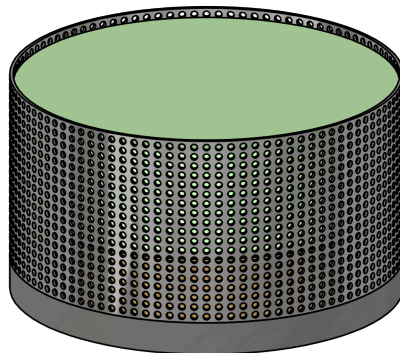


Figura 5.13: Recipiente porta muestras (basket) SCALA. Fuente: elaboración propia

5.2.5. Termocuplas

El equipo cuenta con termocuplas de tipo K de 0,5 mm de diámetro, las cuales se adhieren a zonas específicas del aparato. Se colocan tres termocuplas aisladas con PVC en la parte superior del conducto de escape, en el mismo eje, paralelos al lado más largo del conducto, con uno de las termocuplas en el centro. El conducto de escape presenta un perfil de temperatura plano. Por lo tanto, sólo la termocupla central se utiliza para controlar la temperatura de los gases de escape y calcular la tasa de liberación de calor (HRR) con el método SER.

Una termocupla se coloca en el interior de la caja aislante, como ya se ha mencionado, para controlar la temperatura cerca de la escala. Otra más se fija a la pared metálica exterior del conducto de escape, al mismo nivel del TDLAS y en la parte superior del aparato. Esta termocupla tiene dos objetivos:

- Conocer la influencia de la temperatura del metal en los gases de escape y las 3 termocuplas de la parte superior. Si la temperatura del conducto metálico es superior a la temperatura de los gases de escape y, por tanto, a la temperatura de las 3 termocuplas, aumentará la temperatura de los gases y de las termocuplas de la chimenea. En otras palabras, si se está ejecutando un experimento y la pared metálica se calienta a altas temperaturas y luego la tasa de liberación de calor de la muestra disminuye, entonces las lecturas de la termocupla del conducto disminuirán más lentamente que la disminución de la tasa de liberación de calor. Esto se debe a la inercia térmica de las paredes metálicas y puede conducir a cálculos erróneos de la tasa de liberación de calor.
- Conocer la temperatura cerca de los sensores TDLAS, para asegurarse de que están dentro del rango de funcionamiento.

También hay termocuplas fijadas a otras piezas metálicas, ventanas de cristal y perfiles de aluminio de la estructura del SCALA. Una termocupla está colocada en la entrada de aire. Dos termocuplas están fijadas a las resistencias eléctricas de los calefactores radiantes (heater), las cuales están aisladas con fibra de vidrio para soportar temperaturas más elevadas y tienen un diámetro de 1 mm. El objetivo de estas dos termocuplas es controlar la temperatura en la superficie de los elementos calefactores, y así establecer relaciones entre la temperatura del calefactor, la potencia del mismo y el flujo de calor incidente sobre la muestra.

5.2.6. Celda de carga

En la Figura 5.14 se muestra la celda de carga utilizada en el SCALA para las mediciones de pérdida de masa, la cual está fuera de la cámara de ignición, pero tiene una varilla metálica conectada sobre la que se inserta el porta muestras con el combustible forestal dentro de ella. Corresponde a una balanza de precisión KB. KERN modelo KB 3600-2N con una capacidad de 3610 g y legibilidad de 0,01 g



Figura 5.14: Celda de carga SCALA. Fuente: Kern & Sohn

5.2.7. Entrada de aire

La entrada de aire a la cámara de combustión se produce gracias al difusor de aire, el cual es una pieza metálica con muchos orificios situada en la entrada del plenum, en el extremo del codo que une el conducto de impulsión de aire con el SCALA. El objetivo de este componente es realinear el flujo de aire y distribuirlo en todas direcciones, con el fin de conseguir una distribución homogénea del aire.

5.3. Equipos adicionales de apoyo

Los equipos adicionales de apoyo corresponden a todos los instrumentos que nos permiten realizar las medidas experimentales, pero que no forman parte directa del I-FIT o SCALA. Por ejemplo, para realizar las medidas experimentales es necesario obtener la densidad del combustible vegetal, por lo tanto se utiliza un instrumento de apoyo con el fin de contar con los parámetros necesarios para realizar las pruebas en el I-FIT o SCALA.

5.3.1. Horno y Cámara de humedad

Para acondicionar el nivel de humedad de la biomasa, se utiliza un horno de secado y una cámara de humedad, ambos fabricados por la empresa alemana Memmert. El horno de secado, modelo UN30, permite ajustar la temperatura y tiempo de funcionamiento. El rango de temperatura va desde 5°C hasta 300°C , cuenta con un sistema de ventilación natural para eliminar la humedad del horno. La cámara de humedad, modelo HCP 50, permite controlar temperatura, humedad relativa y tiempo de funcionamiento. El rango de operación de temperatura va desde 18°C hasta 90°C , mientras que la humedad relativa se puede variar en un rango que va desde 20 % hasta 95 %.



Figura 5.15: (a) Horno de secado Memmert modelo UN30. (b) Cámara de humedad Memmert modelo HCP50. Fuente: Memmert GmbH

5.3.2. Picnómetro

Un picnómetro es un instrumento de medición cuyo volumen es conocido y permite obtener la densidad o peso específico de cualquier líquido o sólido mediante gravimetría a una determinada temperatura. El picnómetro utilizado es marca ISO-LAB 023.02.010 de 10 ml, más específico de 10.672 ml como el que se ve en la Figura 5.16. Con el cual es posible obtener la densidad del pino.



Figura 5.16: Picnómetro ISOLAB. Fuente: Baltalab

5.3.3. Balanza

A lo largo de la campaña experimental se necesita medir la masa de muchos elementos esenciales para llevarla a cabo, principalmente el combustible vegetal, para este fin se hace uso de una balanza semi analítica Shimadzu UX 620 H que cuenta con una capacidad de 620, una lectura [d] de 0,001 g, una reproducibilidad de 0,001 g, una linealidad de 0,002 g y un platillo de 108 mm x 105 mm. Es importante destacar que se realizan las mediciones de tasa de pérdida de masa para el I-FIT con esta balanza.



Figura 5.17: Balanza Shimadzu UX 620 H. Fuente: Cromtek

6 | Metodología

Índice

6.1. Metodología de extracción de muestras	64
6.2. Metodología de secado sin retardante	64
6.3. Metodología de aplicación de retardante	64
6.4. Metodología de secado con retardante	66
6.5. Metodología del cálculo de la densidad	66
6.6. Metodología del cálculo de la cantidad relativa de retardante	68
6.7. Metodología I-FIT	70
6.7.1. Calibración del heater	70
6.7.2. Cálculo de masa de combustible	72
6.7.3. Procedimiento experimental	73
6.8. Metodología SCALA	74
6.8.1. Calibración eléctrica de los paneles radiantes	74
6.8.2. Cálculo de masa de combustible	76
6.8.3. Procedimiento experimental	76

La metodología con la cual se lleva a cabo la campaña experimental es muy importante, ya que si se respetan cada uno de los pasos a seguir de buena manera, se disminuye la variabilidad asociada a la manipulación de la muestra y equipos en el laboratorio.

Las secciones de este capítulo están ordenadas a modo de representar el paso a

paso que se sigue para llevar a cabo la campaña experimental, es decir, la primera sección corresponde al paso 1, la segunda al paso 2, etc.

6.1. Metodología de extracción de muestras

Las muestras de pino se extraen siempre desde el mismo punto, una zona IUF ubicada en la localidad de Curauma, con el fin de asegurar que toda la campaña experimental se realice con un estándar fijo del combustible forestal. En dicho lugar se recojen las acículas muertas de pino y se guardan en bolsas plásticas para ser trasladadas al laboratorio.

6.2. Metodología de secado sin retardante

Una vez en el laboratorio, las muestras se limpian para quitar todos los elementos que no sean acículas de pino. Luego, la muestra se divide en bandejas de aluminio para colocarlas dentro de los hornos y/o cámaras de humedad, donde se realiza el proceso de secado a 65°C durante 24 h (el proceso se puede hacer a 60°C igualmente, lo importante es hacerlo siempre dentro del intervalo [60, 65] °C para no dañar la biomasa). Al terminar este proceso, las muestras están listas para el siguiente paso.

6.3. Metodología de aplicación de retardante

En esta campaña experimental se realizan mediciones a diferentes concentraciones de retardante $\sigma_{ret} = 0, 10, 20, 40 \text{ \% V/V}$, por lo tanto, es necesario acondicionar las muestras a cada una de las concentraciones requeridas para la campaña. En el caso del 0 % V/V no se aplica retardante a la muestra, así que se pasa directamente a medir la densidad según la metodología que se explica en Sección 6.5. Para el resto de las concentraciones se debe seguir lo siguiente

- Preparar la solución retardante-agua: el retardante puro se mezclará con agua según la concentración que se busque obtener, teniendo en cuenta que el cálculo se hace bajo la fórmula:

$$\% \frac{V}{V} = \frac{\text{ml de retardante puro}}{\text{ml de solución agua + retardante}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

- Aplicación de la solución: una vez preparada la solución, se debe sacar de los hornos y/o cámaras de humedad las muestras secas que se desean condicionar. Primero se pesa toda la muestra para obtener la masa de muestra seca, luego se dosifica la cantidad de solución que se le aplica, utilizando el criterio: 0,5 ml de solución por 1 g de masa seca. Al conocer el volumen de solución a utilizar, se vacía esa cantidad en un rociador o atomizador para aplicar de manera homogénea en toda la muestra, es decir, revolviendo la muestra a medida que se va aplicando la solución.
- Reposo de la muestra con retardante: con la solución ya aplicada a la muestra, se debe dejar cuidadosamente sobre una bolsa plástica durante no más de 24 h para que no absorba tanta humedad del ambiente.

A continuación, se plantea un ejemplo para plasmar de mejor manera lo que se debe hacer en la práctica. Suponga que se quiere acondicionar la muestra a $\sigma_{ret} = 20\%$, para lo cual se prepara una solución retardante-agua de 200 ml y se cuenta con una cantidad de 100 g de pino seco.

1. El primer paso es preparar la solución retardante-agua, como se quieren 200 ml a 20 % V/V de concentración de retardante, se deben mezclar 40 ml de retardante puro y 160 ml de agua. De esta forma, la Ecuación 6.1 queda

$$\% \frac{V}{V} = \frac{40 \text{ ml de retardante puro}}{160 \text{ ml de agua} + 40 \text{ ml de retardante puro}} \cdot 100 \quad (6.2)$$

$$\% \frac{V}{V} = \frac{40 \text{ ml de retardante puro}}{200 \text{ ml de solución agua + retardante}} \cdot 100 \quad (6.3)$$

$$\% \frac{V}{V} = 20\% \quad (6.4)$$

2. El segundo paso es sacar los 100 g de pino seco de los hornos para aplicar el retardante, pero antes se debe dosificar la cantidad según el criterio 0,5 ml de solución por 1 g de masa seca. Como la masa seca es de 100 g se le debe aplicar 50 ml de solución retardante-agua a toda la muestra, para ello se vierten 50 ml de los 200 ml preparados en un rociados o atomizador y se aplica poco a poco a la muestra, revolviendo y haciendo que se distribuya de la forma más homogénea en todas las acículas.

3. Finalmente, la muestra con retardante se deja sobre una bolsa plástica para que se ventile y repose antes de secarse en los hornos al día siguiente.

6.4. Metodología de secado con retardante

Una vez la muestra con retardante ya ha reposado, se divide en bandejas de aluminio para colocarlas dentro de los hornos y/o cámaras de humedad nuevamente, donde se realiza el proceso de secado a 48°C durante 24 h (el proceso se puede hacer a 50°C igualmente, lo importante es hacerlo siempre dentro del intervalo $[48, 50]^{\circ}\text{C}$ para no dañar el retardante), con el fin de que la muestra solo tenga retardante.

6.5. Metodología del cálculo de la densidad

La densidad del combustible es un parámetro sumamente importante que define la cantidad de combustible que se utilizará en las pruebas de ignición. El procedimiento consiste en medir la densidad del combustible dentro del picnómetro, a partir de la masa de esta, y el volumen que ocupa dentro del picnómetro. A continuación, se dará un ejemplo con el fin de explicar con más detalle el procedimiento experimental de la medición de la densidad. Cabe destacar que la medición de la densidad debe realizarse mínimo 20 veces, por cada concentración de retardante, con el fin de obtener una muestra representativa para cada concentración, ya que la densidad cambiará según la cantidad de retardante que exista dentro de la acícula de pino. Para un mejor entendimiento, la medición de densidad se separará en las siguientes etapas:

- Etapa 1: Una vez en el laboratorio y tomada todas las medidas de seguridad e higiene, es necesario utilizar guantes de látex para evitar la contaminación de la muestra. Luego, una vez que se tenga la concentración de retardante deseada en las acículas de pino, se deben pesar aproximadamente 5 acículas de pino diferentes e introducirlas en el picnómetro, para luego pesar el recipiente junto con las acículas dentro de este.
- Etapa 2: En la segunda etapa, se debe introducir en el picnómetro y pesar un líquido con densidad conocida, en este caso se utiliza el alcohol isopropílico.
- Etapa 3: Luego, con la masa del líquido conocido es posible obtener el volumen

de dicho fluido.

- Etapa 4: Finalmente, con el volumen del líquido obtenido en la etapa anterior, el cual se encuentra dentro del picnómetro, y el volumen de este, el cual es conocido (10,672 ml), es posible obtener el volumen de las acículas al interior de este. Con el volumen, y la masa obtenida inicialmente, es posible obtener la densidad de las acículas de pino.

Por ejemplo, se retiran 5 acículas de pino, las cuales tienen un 20 % V/V de concentración de retardante y son pesadas, obteniendo una masa de 0,227 g en total. Luego, son introducidas dentro del picnómetro para volver a pesar, obteniendo un valor de 16,692 g. Posteriormente, se introduce el alcohol isopropílico dentro del picnómetro hasta el tope y se tapa, obteniendo una masa total de 25,645 g. Obteniendo así la masa del alcohol,

$$m_{acic} = 0,227 \text{ g} \quad (6.5)$$

$$m_{picn+acic} = 16,692 \text{ g} \quad (6.6)$$

$$m_{picn+acic+alco} = 25,645 \text{ g} \quad (6.7)$$

$$m_{alco} = m_{picn+acic+alco} - m_{picn+acic} \quad (6.8)$$

$$m_{alco} = 8,953 \text{ g} \quad (6.9)$$

por lo que, junto con la densidad del alcohol conocida (0.7863 g/ml) es posible obtener el volumen del alcohol que ocupa dentro del picnómetro.

$$V_{alco} = \frac{m_{alco}}{\rho_{alco}} \quad (6.10)$$

$$V_{alco} = 11,386 \text{ ml} \quad (6.11)$$

Por consiguiente, con el volumen del alcohol obtenido, es posible obtener el volumen que ocupan las acículas dentro del picnómetro,

$$V_{acic} = |V_{picn} - V_{alco}| \quad (6.12)$$

$$V_{acic} = |10,672 - 11,386| \text{ ml} \quad (6.13)$$

$$V_{acic} = 0,714 \text{ ml.} \quad (6.14)$$

Finalmente, al obtener el volumen del pino, y la masa obtenida inicialmente es posible obtener la densidad del pino como,

$$\rho_{acic} = \frac{m_{acic}}{V_{acic}} \quad (6.15)$$

$$\rho_{acic} = 0,388 \text{ g/ml} \quad (6.16)$$

Dichas medidas se deben realizar reiteradas veces con el fin de obtener una buena medida estadística. Evitando así errores experimentales, además de disminuir la variabilidad, ya que a medida que aumenta la concentración de retardante es posible que la variabilidad aumente en las mediciones de densidad. Cabe mencionar, que el número de acículas que se debe introducir dentro del picnómetro no se encuentra detallado en la bibliografía, sin embargo, se determinó que al utilizar más acículas, la variabilidad de la densidad disminuye considerablemente.

6.6. Metodología del cálculo de la cantidad relativa de retardante

Un elemento importante en el estudio de la aplicación de retardante en el combustible forestal, es la cantidad relativa de retardante de fuego Φ , cuya expresión está dada por

$$\Phi = \frac{m_{ret}}{m_{seca}}, \quad (6.17)$$

donde m_{ret} corresponde a la masa de retardante puro que posee la muestra luego de ser tratada bajo alguna concentración en particular y m_{seca} ó m_d a la masa de

combustible forestal completamente seca (sin retardante aplicado). Esta variable es calculada experimentalmente bajo el siguiente procedimiento:

1. Secar distintas muestras de pino que posean masas similares en el horno y pesar luego del proceso de secado. Ejemplo: se colocan 3 bandejas distintas con pino en el horno y luego del proceso de secado se pesan, donde se obtiene una masa de 10,0885 g, 10,0132 g y 10,0079 g para cada una.
2. Acondicionar cada una de las muestras secadas y pesadas con la concentración de retardante que se desea medir y poner a secar las muestras nuevamente. Ejemplo: se acondicionan las 3 muestras pesadas en el primer paso con una solución 10 % de retardante, siguiendo el protocolo de aplicación descrito en la Sección 6.3, luego se secan las muestras en el horno y se vuelven a pesar, siendo las masas obtenidas 10,448 g, 10,537 g y 10,380 g respectivamente.
3. Con el registro de masa de pino seco y masa de pino seco + retardante se calcula la masa de retardante en cada una de las muestras a través de la resta de ambas cantidades ($m_{ret} = m_{seca+retardante} - m_{seca}$). Ejemplo: Para el caso de la primera muestra $m_{ret1} = 10,448 - 10,0885 = 0,3595$, para la segunda muestra $m_{ret2} = 10,537 - 10,0132 = 0,5238$ y para la tercera muestra $m_{ret3} = 10,380 - 10,0079 = 0,3721$.
4. Finalmente, se calcula Φ mediante la formula descrita para cada una de las muestras y se promedian para obtener la cantidad relativa de retardante para la concentración respectiva. Ejemplo: para la muestra 1 $\Phi_1 = 0,0356$, para la muestra 2 $\Phi_2 = 0,0523$ y para la muestra 3 $\Phi_3 = 0,0372$. Los cuales en promedio entregan un valor de $\Phi = 0,0417$.

Los valores obtenidos de Φ para cada una de las concentraciones se presentan en la siguiente tabla

σ_{ret} (%)	Φ (-)
0	0,000
10	0,042
20	0,080
40	0,153

Tabla 6.1: Valores obtenidos para la cantidad relativa de retardante para cada una de las concentraciones. Fuente: elaboración propia.

6.7. Metodología I-FIT

6.7.1. Calibración del heater

Una vez explicado todo lo necesario antes de realizar la medición, es necesario explicar y definir los procedimientos con los cuales se llevan a cabo todos los experimentos en el aparato I-FIT. Sin embargo, antes de realizar las mediciones en el I-FIT, se requiere definir el flujo de calor que se utiliza en cada una de éstas, para ello es necesario calibrar el heater, es decir, determinar experimentalmente el flujo incidente a la muestra a través del radiómetro descrito en la Subsección 5.1.3. Dicho instrumento se posiciona a 20 mm del centro del heater (donde se encuentra la muestra a la hora de realizar los experimentos) para medir el flujo de calor que emite el heater eléctrico al cambiar el voltaje del Variac, dado que se configuran distintos voltajes al realizar las mediciones, estos valores se mueven en el intervalo $[0, 230]$ V y para efectos de la calibración se miden distintos puntos en este rango para obtener una función cuadrática como la que se observa en la Figura 6.1, de esta forma se conoce a que flujo de calor incidente se traduce cada voltaje configurado en el Variac.

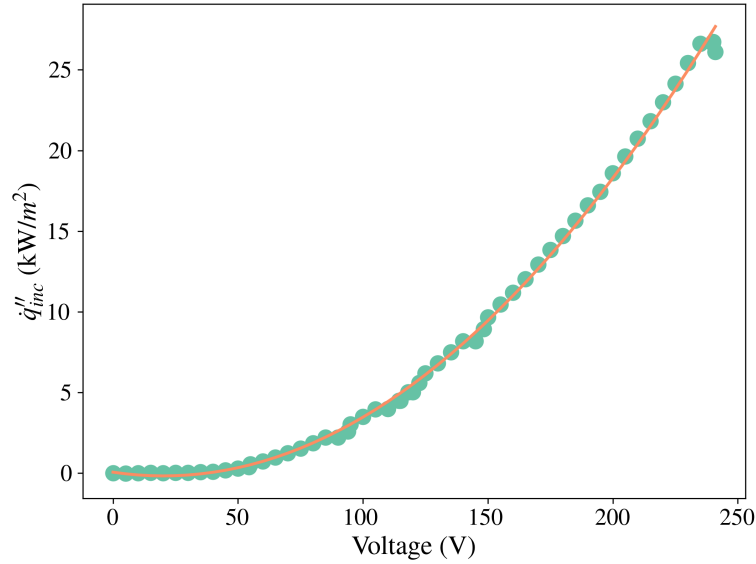


Figura 6.1: Medición experimental de la calibración (puntos: voltajes medidos experimentalmente; línea continua: función ajustada). Fuente: elaboración propia

Luego de obtener la curva de calibración es posible determinar a partir de un fit cuadrático el polinomio que lo caracteriza

$$\dot{q}''_{inc}(V) = 0,00058809 \cdot V^2 - 0,01671715 \cdot V - 0,17235345 \quad (6.18)$$

donde q''_{inc} corresponde al flujo de calor incidente al basket o al combustible vegetal y V corresponde al voltaje que se suministra al heater mediante el Variac. A continuación, se muestran los diferentes voltajes utilizados en la campaña experimental con el respectivo flujo de calor en que se traduce cada uno

Voltaje (V)	q''_{inc} (kW/m ²)
140	9,01
145	9,77
150	10,55
160	12,21
180	15,87
210	22,25
230	27,09

Tabla 6.2: Voltajes y sus respectivos flujos de calor incidentes utilizados en el I-FIT para la campaña experimental. Fuente: elaboración propia.

6.7.2. Cálculo de masa de combustible

Otro elemento que falta definir antes de utilizar el aparato I-FIT es la masa de combustible vegetal que será estudiado para cada concentración de retardante, para ello se hace uso del parámetro α_{fuel} descrito en la Subsección 4.4.3. En esta campaña experimental se fija en 0,09 el valor de la fracción en volumen, con lo cual la Ecuación 4.62 queda

$$0,09 = \frac{V_{fuel}}{V_{basket}} \quad (6.19)$$

$$0,09 = \frac{\frac{m_{fuel}}{\rho_{fuel}}}{V_{basket}} \quad (6.20)$$

$$0,09 \cdot V_{basket} \cdot \rho_{fuel} = m_{fuel} \quad (6.21)$$

donde V_{basket} corresponde al volumen del basket o porta muestra cuyo valor es $612,018 \text{ cm}^3$ y ρ_{fuel} a la densidad del combustible vegetal, la cual se calcula mediante la metodología descrita en este capítulo para cada una de las concentraciones de retardante que se estudian.

A continuación, se muestra la masa, densidad del combustible y densidad aparente según la concentración de retardante utilizada.

σ_{ret} (%)	ρ_f (g/cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	m_f (g)
0	0,521	0,0469	29,139
10	0,701	0,0631	39,225
20	0,766	0,0690	42,853
40	0,821	0,0739	45,921

Tabla 6.3: Masa y densidad de combustible para cada concentración de retardante para el equipo I-FIT. Fuente: elaboración propia.

6.7.3. Procedimiento experimental

El aparato experimental destaca por realizar mediciones altamente reproducibles y permite determinar el tiempo de ignición en cada una de ellas, entre otras variables. El procedimiento experimental consiste en el protocolo a seguir para la obtención de datos en el I-FIT, una vez se han realizado todas las actividades previas descritas anteriormente en este capítulo. Este protocolo se detalla a continuación

1. Lo primero que se hace es sacar la muestra que se desea medir de los hornos e introducir la masa correspondiente en el basket, intentando que transcurra la menor cantidad de tiempo posible para que la muestra no absorba humedad (idealmente menos de 5 minutos)
2. En segundo lugar, se debe posicionar el basket en el I-FIT sobre la plataforma dispuesta para ello, donde se insertan las termocuplas en la muestra y se verifica que el heater se encuentre centrado respecto al anillo interno que posee el basket. Para realizar esto último, el heater debe estar apagado (sin paso de corriente a través del Variac) y se debe hacer uso del motor lineal para llevarlo a la profundidad donde opera al momento de la medición, la cual es 145 mm. Una vez verificado que está centrado, se vuelve a subir el heater a su posición inicial y se acomodan algunas acículas que pudieron haber entrado al anillo interno del basket (lo cual no debe suceder), para finalmente colocar sobre el basket un aislante que permite que la muestra no reciba calor mientras el heater se calienta hasta llegar al flujo de calor incidente deseado.
3. El tercer punto a llevar a cabo es el calentado del heater al flujo de calor incidente que se desea, para esto se crean programas (archivos en formato

.csv) que serán importados en el software del Variac para indicarle que suba progresivamente el voltaje (para no dañar el heater ante un cambio abrupto de voltaje) hasta el valor que entrega el flujo de calor incidente deseado, una vez alcanzado ese flujo deben transcurrir 120 s para que se estabilice, cuando pase ese tiempo, el programa le da 3 s al usuario para que retire el aislante y baje el heater a 145 mm (el descenso dura 18 s), al mismo tiempo que el heater va descendiendo, se debe activar la fuente de poder que alimenta el piloto Kanthal. Finalmente, cuando el heater ya está en su posición final, se debe activar en el software del sistema de adquisición de datos (LabVIEW) el cronómetro que permite conocer al final de la medición el tiempo de ignición de la muestra y colocar la ventanilla frontal del I-FIT que la protege del flujo de aire externo. Es importante mencionar que se comienzan a guardar los datos inmediatamente después de iniciar el programa de calentado del heater, tanto para el Variac como para el sistema de adquisición de datos.

4. El cuarto y último punto consiste en el término de la medición, es decir, cuando se observa *flaming ignition* o ignición de llama visible. Inmediatamente después de ver la aparición de la llama, se debe detener el cronómetro y dejar de guardar la data en todos los equipos, se sube el heater a su posición de origen, se apaga la fuente de poder al kanthal, se retira la ventanilla, se retiran las termocuplas y se ahoga la muestra con el mismo aislante que se utilizó anteriormente. Luego, se eliminan los restos de combustible vegetal y, una vez se enfría el basket, se limpia y prepara para la siguiente medición. Es importante mencionar que existen mediciones en las que no ocurre ignición de llama visible, ya que se trabaja con flujos de calor incidente bajos en la búsqueda del flujo crítico, en estos casos, la medición se detiene al transcurrir tiempos mayores a 1 h y cuando se observa que el combustible vegetal está altamente degradado (en cenizas). La metodología para encontrar dicho flujo crítico es la misma que aplicó Mindykowski *et al.* (2011), definido como dicotomía.

6.8. Metodología SCALA

6.8.1. Calibración eléctrica de los paneles radiantes

El objetivo principal de la calibración eléctrica es encontrar los voltaje que se deben ajustar a cada panel para obtener el flujo de calor incidente deseado. Además,

para cada medición, se deben registrar los valores del voltaje alterno que se encuentra alimentando a los paneles, la intensidad de la corriente y el voltaje registrado por el radiómetro ubicado en la posición de la muestra. Los pasos para la calibración eléctrica son los siguientes.

1. Obtener el valor base del radiómetro.
2. Encender los calefactores del calorímetro.
3. Luego hay que ir variando los voltajes de ambos paneles. Nunca variar en más de 10. Si, por ejemplo, se busca el primer flujo de calor, que será de 10 kW/m^2 , cada panel se debe ajustar en 5 y 5 e ir viendo cómo evoluciona el radiómetro a partir de dichos cambios en el voltaje. Es por lo anterior que esta calibración toma tiempo, ya que se buscan los valores más cercanos a los flujos de calor deseado. Siguiendo el mismo ejemplo, si se requiere un valor de 20/20 en cada panel radiante, entonces eso se verá en la tercera u cuarta iteración, donde para cada una se espera alrededor de 15 minutos para lograr estabilidad en las mediciones del radiómetro.
4. Cuando se logra el flujo de calor incidente deseado, se debe medir el voltaje con el multímetro en el panel eléctrico interno. Para esto, se debe medir el voltaje alterno
5. El siguiente paso consiste en medir la intensidad de la corriente en los cables ubicados en la parte trasera de los calefactores. Para esto, al momento de medir, se deben extraer las ventanas que permiten el acceso a la parte trasera de los calefactores. Hay un total de tres cables, que corresponden a dos fases y la tierra. Se debe buscar medir la corriente en una de las fases. Sólo habrá un cable que proporcionará el valor de la corriente. Notar que para medir la intensidad de la corriente se utiliza el multímetro de tenaza.
6. Luego de medir y registrar los valores de voltaje de los paneles, intensidad de la corriente y el voltaje registrado por el radiómetro, se suben los valores del porcentaje de voltaje que se busca medir y se repiten los pasos anteriores.

6.8.2. Cálculo de masa de combustible

La metodología para calcular la masa de combustible que debe ir dentro del porta muestras en cada una de las mediciones es la misma utilizada para el I-FIT (ver Subsección 6.7.2), con la diferencia de que en la Ecuación 6.19 el volumen del basket (V_{basket}) tiene un valor de 385,28 cm³. Para el caso de la densidad del combustible, los valores son los mismos, ya que se debe recordar que es una propiedad intrínseca de la especie utilizada.

σ_{ret} (%)	ρ_a (g/cm ³)	m_f (g)
0	0,0469	18,067
10	0,0631	24,321
20	0,0690	26,570
40	0,0739	28,472

Tabla 6.4: Masa y densidad de combustible para cada concentración de retardante en el equipo SCALA. Fuente: elaboración propia.

6.8.3. Procedimiento experimental

El procedimiento que se realiza para llevar a cabo las mediciones en el equipo experimental SCALA se puede describir en 4 pasos, los cuales se describen a continuación.

Encender y regular el calorímetro

1. Se debe encender el extractor de aire. Este se encuentra a un costado del panel eléctrico.
2. Luego hay que abrir la llave que proporciona el flujo de agua que alimenta al radiómetro y funciona como intercambiador de calor. Se debe abrir la llave al máximo.
3. Después, se debe instalar y encender el ventilador que proporciona el flujo de aire entrante al calorímetro.

Abrir software de captura de datos

1. SCALA measurement project. Este software es utilizado para monitorear las temperaturas registradas por las termocupas ubicadas en los distintos puntos de interés. Además, permite digitalizar la señal proveniente del radiómetro (radiación incidente, en mV). Para convertir el voltaje (mV) a flujo de calor incidente (kW/m^2), se requiere un valor base proporcionado por el radiómetro (V_{base}). Para esto, es necesario dejar el radiómetro dentro del calorímetro con todo encendido (agua, ventilador y extractor) durante, al menos, 45 minutos para estudiar el valor base del radiómetro (mV). Luego, el flujo de calor incidente se calcula como:

$$\dot{q}_{inc}''(t) = (V_{rad}(t) - V_{base}) \cdot 4,926 \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (6.22)$$

donde $V_{rad}(t)$ es el voltaje (mV) medido por el radiómetro al instante t , y 4,926 es la constante de conversión de radiómetro dada por el fabricante. Una observación es que el valor base del radiómetro generalmente es negativo.

2. Spectral Data View (PKL Technologies Inc.). Su función es registrar las concentraciones de oxígeno medida por el TDLAS en los gases de escape. Cada vez que se encienda el equipo se debe verificar en el TDLAS que el nivel de señal (LVL) se encuentre entre 30–80 % para su mejor operación, idealmente cercano a 65 %.
3. Para medir con la celda de carga, lo primero es abrir el software de la máquina virtual con Windows (Oracle VM Virtualbox) y hacer click en Iniciar. Luego, entrar con el usuario “equipo soporte”. En el escritorio se encuentra un programa llamado “SartoCollect 1.0”, abrir dicho programa. Se abrirá una ventana con nombre “Registrar SartoCollect”, hacer click en “Trialz el programa abrirá una nueva ventana y en ésta seleccionar “Celda UAI”, hacerle doble click. Se abrirá una nueva ventana para controlar la celda de carga. Los pasos son los siguientes.
 - a) Click en “Monitor” y luego click en “Celda de carga UAI”.
 - b) Luego en Celda de Carga UAI, click en “Get Weightz el programa debería mostrar los valores de la masa.

- c) El siguiente paso consiste en parar las mediciones ("Stop weight") y luego click en "Tare" para tarar la celda de carga y luego nuevamente click en "Get Weight" para registrar la masa.
- d) Para exportar los datos hay que copiarlos y pegarlos en un archivo de texto (se recomienda utilizar el software NotePad++).

Encender los paneles radiantes

1. Lo primero consiste en conectar los cables del calorímetro a la corriente. Cada cable debe ir en su respectivo puerto de conexión. Notar que cada uno de los cables y puertos de conexión se encuentran marcados con su respectiva letra. Además, notar que la conexión R es para el panel izquierdo, mientras que la conexión S es para el panel derecho.
2. Abrir el panel eléctrico exterior (fuera del laboratorio de combustión) y levantar 4 automáticos ubicados en la última fila del mismo. Corresponden a los automáticos 13 (son 4 ahí). Se encuentran marcados como automáticos para el panel R y para el panel S.
3. Luego, abrir el panel eléctrico interior (dentro del laboratorio de combustión), y encendedor (subir) solo los tres primeros automáticos ubicados de izquierda a derecha.
4. Para modificar el voltaje proporcionado a los paneles, se debe ir variando de a poco los porcentajes de voltaje entregado a los paneles. Partir de 5 en 5, y dejar unos minutos para visualizar el estado estacionario en el software SCALA measurement project.

Esperar el estado estacionario

Esperar un tiempo prudente (aproximadamente 1 hora), hasta que el sistema alcance el estado estacionario. Esto ocurre cuando no hay mayores o relevantes variaciones de temperatura a la salida del calorímetro (visualizar en el software SCALA measurement project).

Determinación de la HRR por el método SER

La determinación de la HRR por el método del aumento en la entalpía sensible (SER) se determina a partir de la ecuación

$$\dot{q}_{SER}''(t) = K_{SER}(T_e(t) - T_a) \quad (6.23)$$

Por tanto, el primer paso consiste en determinar la constante de calibración para el método SER (K_{SER}). El detalle paso a paso de su cálculo experimental se presenta en los Anexos. Por lo tanto, las únicas variables (luego de determinar la constante de calibración) son los valores de las temperaturas $T_e(t)$ y T_a . Una vez que se está midiendo y el sistema se encuentra en estado estacionario, T_a se calcula como un promedio de éstas temperaturas en estado estacionario, y $T_e(t)$ es variable para cada intervalo de tiempo durante el proceso de la combustión.

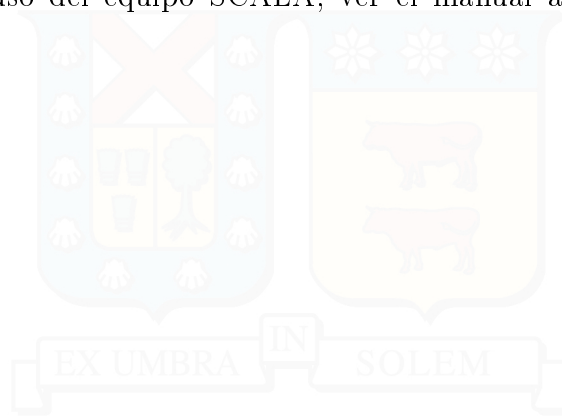
Por ejemplo, supongamos que el sistema se encuentra encendido durante 30 minutos y nos damos cuenta que unos 10 minutos antes (minuto 20) el sistema ya se encuentra en estado estacionario (no hay variaciones en las temperaturas medidas por las termocuplas posicionadas a la salida del aparato). Se recomienda que se promedien todos los valores de temperatura cada un segundo durante los minutos 25 y 30 (recordar que el programa CATMAN entrega valores de temperatura cada 0,5 s), es decir, se tendrán al rededor de 600 valores de temperatura. Este promedio corresponde a T_a . Luego de los 30 minutos, se abre la puerta del calorímetro y se coloca la muestra a estudiar y se van registrando los valores de la temperatura en el tiempo. Estos valores de temperatura corresponden a T_e , y por tanto es más correcto establecerlo como $T_e(t)$. El valor de T_a es fijo, mientras que $T_e(t)$ varía conforme avanza el tiempo. De esta forma, ya se puede determinar $\dot{q}_{SER}(t)$.

Consideraciones

Es importante destacar que la organización del combustible forestal en el porta muestras es más simple que en el caso del I-FIT, ya que no existe un radio interno que limite la disposición de acículas dentro del mismo. Lo único que se debe cuidar es la masa utilizada para mantener el packing ratio deseado y que al momento de montar el basket en la cámara de combustión ninguna acícula esté en contacto con el piloto del equipo.

En el caso de la obtención del flujo de calor crítico, el procedimiento es el mismo utilizado en el I-FIT, es decir, por dicotomía, tal como lo realiza Mindykowski *et al.* (2011).

Para más detalles del uso del equipo SCALA, ver el manual adjunto en los Anexos



7 | Resultados Experimentales

Índice

7.1. Registros visuales	81
7.2. Tiempos de retardo de ignición	84
7.3. Tasa de liberación de calor	85
7.4. Tasa de pérdida de masa	87
7.5. Análisis dimensional	89

7.1. Registros visuales

En la configuración de ignición continua, el comportamiento de las muestras con y sin aplicación de retardante fue notablemente diferente. Durante la fase de ignición con llama, las muestras sin tratar mostraron un resplandor considerable en toda la profundidad de la muestra, con las llamas anclándose cerca de la base del basket por momentos, como se muestra en la Figura 7.1a. El rol de los puntos de resplandor en las agujas de pino durante la ignición se ha reportado previamente y se ha vinculado a la ignición bajo condiciones de flujo forzado (Gong *et al.* (2023)), que son más representativas de los incendios forestales. En las muestras con agujas de pino tratadas, se observó mucho menos combustión lenta en la profundidad del lecho de combustible, con la llama anclándose visiblemente en la superficie de la muestra (ver Figura 7.1a). El anclaje fue más inestable en este caso, denotando un menor flujo de gases volátiles hacia la zona de reacción, con pequeñas llamas observadas ocasionalmente cerca de la base del basket. La apariencia de las llamas también fue diferente. Las agujas de pino sin tratar mostraron llamas “ahumadas”, a diferencia de las llamas de combustibles con retardantes de fuego, que tenían un tono azul pálido, particularmente en concentraciones más altas de retardante, ver Figura 7.1a. Dado

que no se realizaron mediciones de las emisiones de las llamas, la naturaleza de estas diferencias de color no está clara en este momento. Sin embargo, se conjetura que las menores fracciones de volumen de hollín en este último caso probablemente causan llamas con una menor fracción radiativa, dificultando la propagación de la llama.

En el caso de ignición discontinua, el diseño actual del aparato I-FIT no permite realizar un análisis calorimétrico. Sin embargo, desde una perspectiva puramente visual, se pueden notar ligeras diferencias entre las llamas de agujas de pino tratadas y no tratadas, ver Figura 7.1b. Como en el caso de la ignición continua, se observó que para concentraciones más altas de retardante las llamas tenían un tono azul pálido, que debido a la configuración del equipo experimental no es tan evidente como en el caso continuo. Quizás una imagen con la luz apagada hubiese ayudado a una mejor percepción de lo recién comentado.

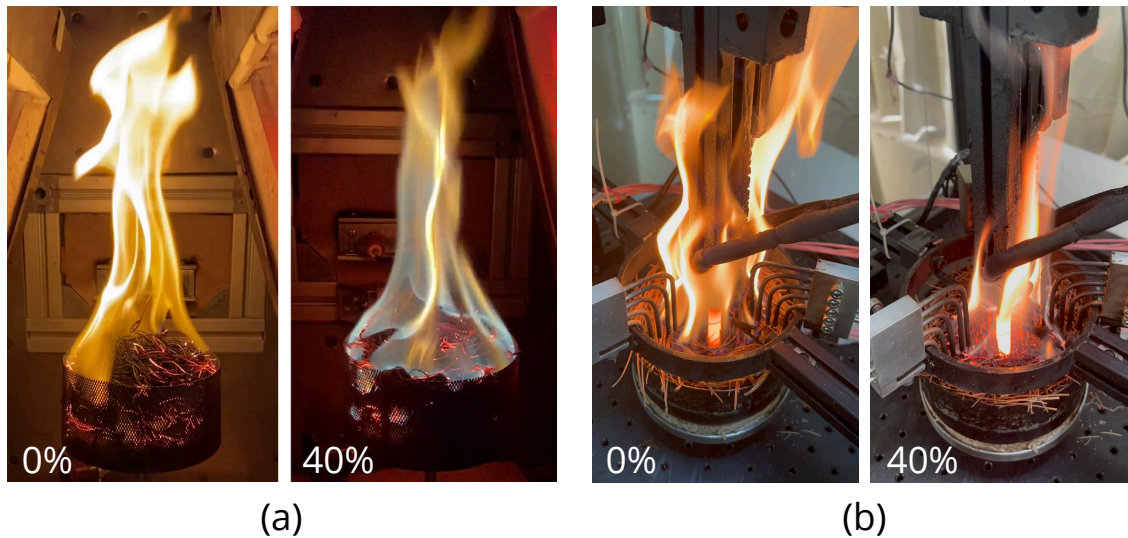


Figura 7.1: (a) Llamas durante las pruebas de ignición continua. (b) Llamas durante las pruebas de ignición discontinua. Ambas para $\sigma_{ret} = 0\%$ y $\sigma_{ret} = 40\%$.

Después de las pruebas, las agujas de pino quemadas también mostraron diferencias. En el caso de ignición continua, se observa para todas las concentraciones de retardante que la fase sólida se contrajo hacia el centro del basket. Este fenómeno favorece la entrada de aire fresco al lecho poroso de combustible debido al arrastre provocado por la llama. Las agujas de pino sin tratar mostraron una fuerte presencia de cenizas, denotando una conversión completa de la fracción no volátil del combustible, como se muestra en la Figura 7.2a. La presencia de cenizas se observa principalmente a lo largo del perímetro de la muestra, en toda la profundidad del

lecho, en línea con las reacciones heterogéneas de combustión lenta observadas, alimentadas con oxígeno fresco del aire arrastrado. Los productos basados en fosfato mejoran la formación de carbón en la fase sólida, alterando el proceso de pirólisis del combustible sólido (Rivera *et al.* (2023)). Para las muestras de combustible tratadas, la menor presencia de cenizas en las agujas de pino es una indicación de este cambio en la cinética del sólido. Las cenizas se distribuyeron homogéneamente en la superficie de la muestra, lo que nuevamente denota las diferencias en la dinámica de combustión de los combustibles tratados, ver Figura 7.2a.

En el caso de la ignición discontinua, las observaciones son similares. Se observa una fuerte presencia de cenizas a lo largo del perímetro exterior de la muestra en las agujas de pino sin tratar (ver Figura 7.2b) y una contracción de la fase sólida hacia el centro del basket. Para las muestras de combustible tratadas, la presencia de cenizas disminuye, como en el caso de ignición continua. Sin embargo, debido a la disminución radial del flujo de calor desde el centro de la muestra hacia sus bordes, las llamas no pueden sostenerse por mucho tiempo después de la ignición, y típicamente queda un anillo de agujas de pino sin quemar tras las pruebas.

Además, el hecho de que no se queme toda la superficie del basket sugiere que la aplicación del retardante efectivamente dificulta la propagación de la llama sobre la muestra y es una indicación, *ceteris paribus*, de un aumento en el flujo de calor crítico para la ignición a medida que aumenta la concentración de retardante (cf. Sección 7.2 y Quintiere (1981)). Este comportamiento se observa para $\sigma_{ret} \geq 20\%$.

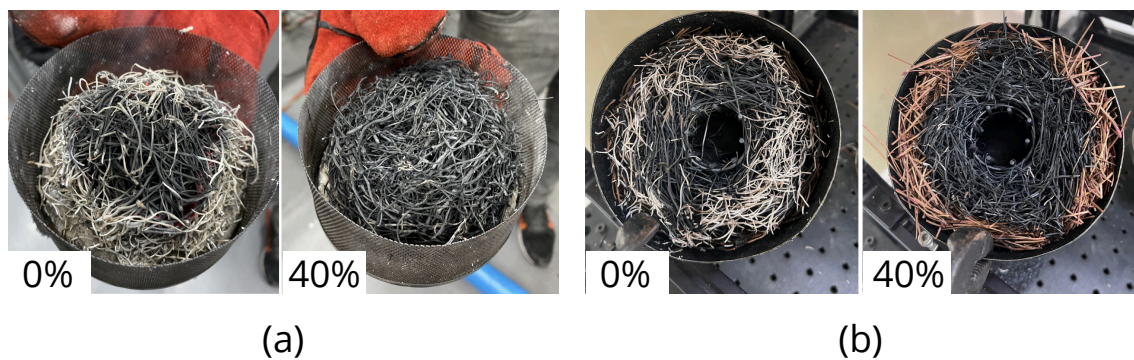


Figura 7.2: (a) Agujas de pino quemadas después de las pruebas de ignición continua. (b) Agujas de pino quemadas después de las pruebas de ignición discontinua. Ambas para $\sigma_{ret} = 0\%$ y $\sigma_{ret} = 40\%$.

7.2. Tiempos de retardo de ignición

La Figura 7.3 presenta los tiempos de retardo en la ignición pilotada, t_{ig} , como función del flujo de calor incidente $\dot{q}''_i$ para todas las concentraciones de retardante σ_{ret} probadas, en ambas configuraciones de ignición. Como era de esperarse, la ignición con llama ocurrió más rápido para los combustibles sin tratar ($\sigma_{ret} = 0\%$) en ambos equipos experimentales. A concentraciones más altas de retardante, los tiempos de ignición son más largos, así como la dispersión en los resultados, particularmente en el rango de menor flujo de calor. Una diferencia interesante entre los dos modos de ignición es la magnitud de los tiempos de retardo en la ignición, que pueden ser $\sim 3 - 5$ veces más largos en el caso de ignición discontinua. Esto se debe a las diferencias en las superficies calentadas de ambas muestras (ver Capítulo 5). En la ignición continua, la radiación de las llamas afecta toda la superficie de la muestra, lo que ayuda a liberar grandes cantidades de gases volátiles en un tiempo relativamente corto. En el caso de la caída de una brasa sobre un sustrato de combustible, el calentamiento es mucho más localizado (representado por la superficie interna del cilindro en las pruebas I-FIT, ver Figura 5.1), liberando consecuentemente menores cantidades de gases y retrasando la transición a la ignición con llama.

Considerando las pruebas de ignición continua (Figura 7.3a), los incrementos en la concentración de retardante resultan en tiempos de retardo en la ignición t_{ig} más largos. Sin embargo, el aumento de concentración de $\sigma_{ret} = 20\%$ a 40% tiene efectos insignificantes en el comportamiento de ignición de las agujas de pino. Se observa una tendencia similar en las pruebas de ignición discontinua presentadas en la Figura 7.3b. Esto sugiere que el efecto del retardante sobre la ignición alcanza una condición de saturación en $\sigma_{ret} \sim 20\%$, y que concentraciones superiores a este valor son subóptimas. Cabe señalar que la concentración recomendada para Phos-Chek LC65A es del 20% .

En términos del flujo de calor crítico para la ignición continua, $\dot{q}''_{cri}$, el efecto de incrementar las concentraciones de retardante es notable hasta $\sigma_{ret} = 20\%$. Más allá de ese valor, no se observó un cambio en el flujo de calor crítico (Figura 7.3a). Cabe señalar que para flujos de calor más bajos, aunque se observó incandescencia y las pruebas duraron ~ 1000 s, las agujas de pino estaban demasiado descompuestas para alcanzar la ignición con llama, es decir, los gases volátiles estaban demasiado diluidos para lograr condiciones inflamables. En contraste, la ignición se observó en

tiempos mucho más largos para las pruebas de ignición discontinua. Esto nuevamente señala las diferencias en la superficie calentada: incluso después de largos tiempos de exposición, hay suficiente reserva de combustible “virgen” para liberar gases inflamables que permitan sostener una llama. Otra diferencia subyacente entre los dos modos de ignición es que el flujo de calor crítico para ignición discontinua parece ser independiente de la concentración de retardante en el lecho de combustible (algo observado previamente (Rivera *et al.* (2023))). Esto podría implicar que las pavesas podrían encender combustibles dentro de estas barreras químicas contra incendios. Dado que en estos casos la ignición con llama ocurriría en tiempos mucho más largos, el consumo de la pavesa jugaría un papel importante y probablemente evitaría muchas de estas situaciones.

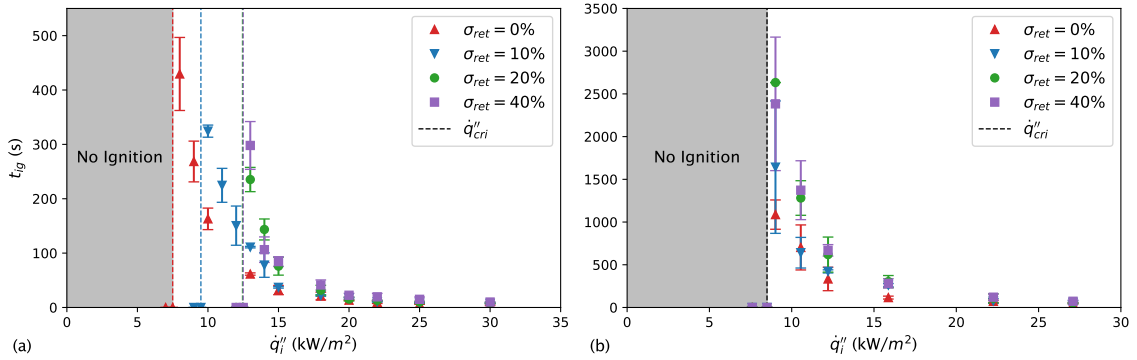


Figura 7.3: Tiempo de retardo en la ignición vs. flujo de calor incidente para cuatro concentraciones de retardante en la solución. (a) Pruebas de ignición continua (SCALA). (b) Pruebas de ignición discontinua (IFIT). Las líneas discontinuas son el valor calculado de q''_{cri} para cada σ_{ret} .

7.3. Tasa de liberación de calor

La tasa de liberación de calor, $\dot{Q}(t)$, es un parámetro clave en los incendios, particularmente en la etapa de crecimiento posterior a la ignición (Schartel y Hull (2007)). En el caso de incendios superficiales que se propagan sobre lechos de combustible forestal, la HRR de las llamas determinará si el frente de llama es capaz de encender el combustible circundante y propagarse de manera autosostenida. La Figura 7.4a muestra las curvas de HRR vs. t , obtenidas utilizando únicamente el método de aumento de entalpía sensible, para un flujo de calor incidente de 22 kW/m² para todas las concentraciones de retardante probadas. No se observan novedades en las tendencias obtenidas, con la concentración del 0 % generando tasas de liberación

de energía más altas pero decayendo más rápido que las muestras de combustible tratadas. A diferencia de t_{ig} , para $\sigma_{ret} > 20\%$, hay un efecto notable en el peak de HRR, $\dot{Q}_{max}$, como también se muestra en la Figura 7.4b para todo el rango de flujos de calor probados. El comportamiento de los peaks de HRR medidos parece ser relativamente independiente de $\dot{q}''_i$, aunque se observa una ligera tendencia decreciente.

Las tendencias en esta figura muestran el efecto del tratamiento con retardante de fuego en la dinámica de incendios forestales, ya que para valores mayores de σ_{ret} los peaks de HRR disminuyen aproximadamente 1 kW, lo que representa una reducción de $\sim 40\%$. Esto confirma la expectativa de que en lechos de combustible poroso tratados, la propagación de la llama se verá obstaculizada o casi totalmente impedida por la presencia de los químicos, particularmente si los combustibles circundantes están vivos o tienen altos contenidos de humedad, lo que dificulta la ignición Liodakis *et al.* (2010); Reszka *et al.* (2020). Se requieren pruebas detalladas de propagación de llama en condiciones realistas para diferentes valores de σ_{ret} para verificar estas afirmaciones.

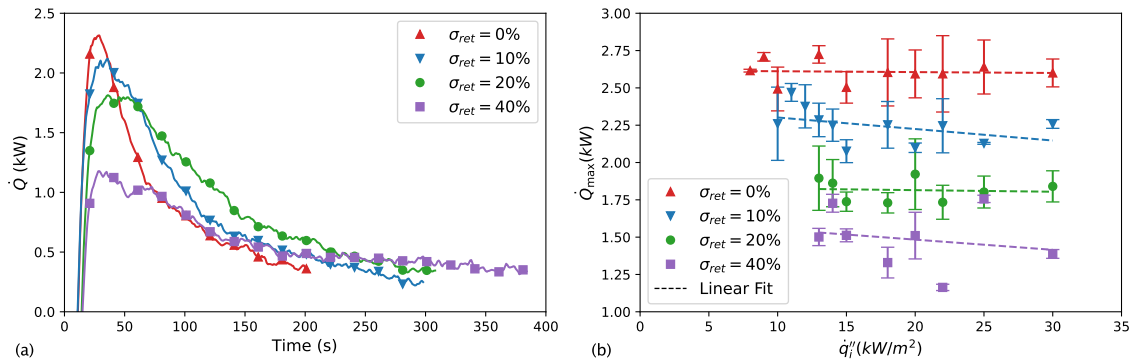


Figura 7.4: (a) Ignición continua: HRR vs. tiempo para las cuatro concentraciones de retardante de fuego. Flujo incidente de 22 kW/m^2 . (b) Ignición continua: Peak de HRR para todas las pruebas realizadas.

El tratamiento con retardante de fuego también tiene un efecto en la energía total liberada $Q_{tot} = \int \dot{Q} dt$ durante la fase de combustión con llama, como se presenta en la Figura 7.5. Los resultados muestran dos tendencias, una para combustibles sin tratar y otra para combustibles tratados. En el caso de $\sigma_{ret} = 0$, Q_{tot} disminuye con el aumento del flujo de calor incidente. Esto se explica por la tendencia similar observada en los peaks de HRR, Figura 7.4b, y también en la pérdida total de masa

(ver discusión a continuación y Figura 7.6b). Además, se observó que la duración de la combustión con llama disminuyó a medida que aumentaba el flujo de calor incidente.

En el segundo caso, el comportamiento también se explica por el aumento observado en la duración de la llama, en línea con resultados previos (Lioudakis *et al.* (2010)). Los incrementos promedio en la duración de la llama con respecto a $\sigma_{ret} = 0\%$ fueron del 86 % para $\sigma_{ret} = 10\%$, del 115 % para $\sigma_{ret} = 20\%$ y del 129 % para $\sigma_{ret} = 40\%$. En consecuencia, los retardantes hacen que las llamas duren más tiempo pero con menores HRR ($\dot{Q}$), ralentizando la propagación de las llamas.

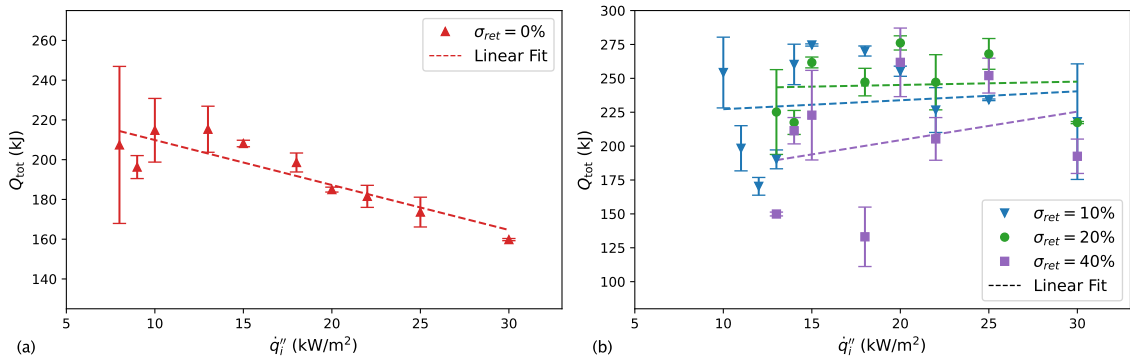


Figura 7.5: (a) Ignición continua: energía total liberada en todas las pruebas realizadas para combustibles sin tratar. (b) Ignición continua: energía total liberada en todas las pruebas realizadas para combustibles tratados.

7.4. Tasa de pérdida de masa

El comportamiento observado en la tasa de pérdida de masa ($\dot{m}$) es similar a las mediciones de HRR: el peak de $\dot{m}$ disminuye a medida que σ_{ret} aumenta, como se muestra en la Figura 7.6a. La duración de la etapa de pérdida de masa también es consistente con las mayores duraciones de la combustión con llama mencionadas anteriormente. Antes de la ignición, $\dot{m} \sim \text{constante}$ para todas las muestras tratadas. Esto podría indicar una cinética de pirólisis similar, independiente de σ_{ret} , lo cual podría deberse al hecho de que las agujas de pino tienen pequeñas escalas características de longitud (térmicamente delgadas). Cabe destacar que los efectos asociados al contenido de humedad del combustible están excluidos en este caso, ya que todas las pruebas se realizan con agujas de pino secas. También se observa que, antes de la ignición, la masa total perdida no es despreciable en los combustibles tratados, lo

que contribuye a retardar la ignición. También se ha encontrado que la masa total perdida durante la fase de combustión con llama es similar para todos los valores de σ_{ret} (para el mismo $\dot{q}_i''$), pero con mayores duraciones para concentraciones más altas de retardante. Nuevamente, esto apunta a un comportamiento asintótico o a efectos de saturación después de un valor umbral de σ_{ret} , lo cual debe tenerse en cuenta dependiendo de la aplicación y el uso previsto del tratamiento químico.

La masa total normalizada perdida en cada prueba se muestra en la Figura 7.6b, donde se revelan dos tendencias diferentes: una para combustibles sin tratar y otra para combustibles tratados. La primera tendencia se explica por la rápida ignición y las duraciones relativamente constantes de la combustión con llama (ver Figura 7.6a). En el segundo caso, esto se atribuye al aumento en la masa perdida durante la fase de combustión con llama y al incremento en la duración de la llama con respecto al caso sin tratar. Sin embargo, por ejemplo, en el caso de 22 kW/m^2 , la masa total perdida para $\sigma_{ret} = 40\%$ es menor que para concentraciones más bajas, lo que indica un efecto beneficioso para concentraciones más altas de retardante, aunque la gran dispersión de los datos hace necesario realizar pruebas adicionales.

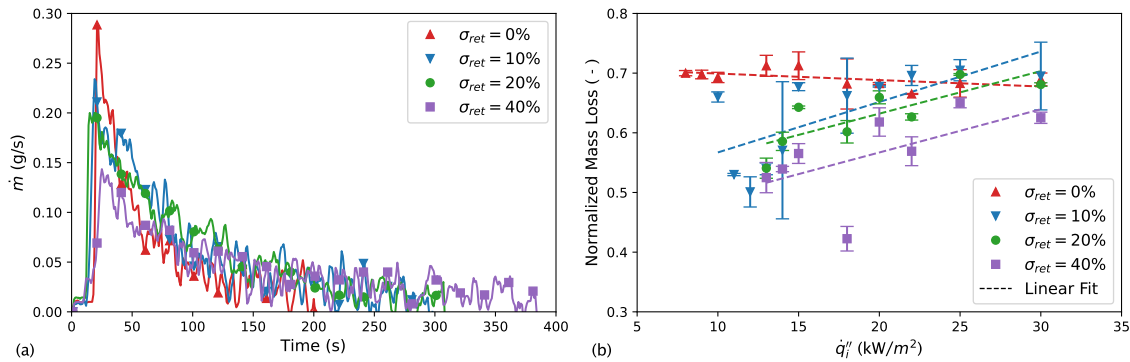


Figura 7.6: (a) Ignición continua: MLR vs. tiempo para las cuatro concentraciones de retardante. Flujo incidente: 22 kW/m^2 . (b) Ignición continua: Pérdida total de masa normalizada para todas las pruebas realizadas y concentraciones de retardante.

La Tabla 7.1 muestra el flujo crítico de masa por unidad de área para la ignición, $\dot{m}_{cri}''$, para cada una de las concentraciones de retardante probadas y ambos equipos experimentales, al flujo de calor $\dot{q}_i''$ más cercano a $\dot{q}_{cri}''$ para el cual se observó ignición, para cada respectivo σ_{ret} . Se observa que $\dot{m}_{cri}''$ es similar entre ambos dispositivos y para diferentes valores de σ_{ret} , con un aumento notable en comparación con el flujo crítico de masa medido para agujas de pino sin tratar. Esto implica que, indepen-

dientemente de las diferencias en la geometría del calentamiento (radial para I-FIT o axial para SCALA) y de $\dot{q}_i''$ utilizado, ambos sistemas logran alcanzar una condición crítica de generación de gases volátiles suficiente para sostener la ignición.

Además, las concentraciones de retardante no parecen alterar significativamente esta condición crítica, lo que sugiere la existencia de un “umbral universal” de pérdida de masa por unidad de área para la ignición, determinado principalmente por las propiedades térmicas y químicas características de las agujas de pino. Esta observación indica que el efecto de los compuestos retardantes de fuego en la fase gaseosa es menos marcado que su efecto en la fase sólida. Considerando la ignición continua, el aumento en el flujo crítico de calor a medida que σ_{ret} crece muestra que se requiere más energía para producir la cantidad mínima de masa necesaria para sostener una llama, y que, una vez alcanzado ese flujo crítico de masa, la mayor concentración de retardantes en la fase gaseosa no es capaz de evitar la ignición.

σ_{ret}	$\dot{m}_{cri,S}''$	$\dot{q}_{i,S}''$	$\dot{m}_{cri,I}''$	$\dot{q}_{i,I}''$
%	g/cm ² s	kW/m ²	g/cm ² s	kW/m ²
0	0.00012 ± 0.000061	8	0.00010 ± 0.000054	9.01
10	0.00017 ± 0.000104	10	0.00014	9.01
20	0.00015 ± 0.000081	13	0.00015	9.01
40	0.00015 ± 0.000078	13	0.00018 ± 0.000064	9.01

Tabla 7.1: Flujo crítico de masa para todas las concentraciones de retardante aplicadas y sus respectivos flujos de calor incidente más cercanos al flujo crítico de calor en ambos equipos experimentales.

7.5. Análisis dimensional

Utilizando la teoría de ignición térmica desarrollada para la ignición de lechos de agujas de pino (Mindykowski *et al.* (2011); Rivera *et al.* (2023); Parot *et al.* (2022); Hernández *et al.* (2019)), es posible realizar un escalamiento análogo de los datos experimentales para ambas configuraciones de ignición. La Ecuación 7.1 representa la ecuación general de conservación de energía para un medio poroso bajo las consideraciones descritas en Mindykowski *et al.* (2011); Rivera *et al.* (2023),

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_d \rho_d h_d + \alpha_{ret} \rho_{ret} h_{ret}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_f \frac{\partial T}{\partial r} - \alpha_g \rho_g h_g r u_g \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial z} - \alpha_g \rho_g h_g u_g \right), \quad (7.1)$$

donde α_k es la fracción de volumen, ρ_k es la densidad, $h_k = \int_{T_\infty}^T c_{p,k} dT$ es el cambio de entalpía, k_f es la conductividad de la fase sólida y u_g es la velocidad radial de la fase gaseosa. En todos los casos, el subíndice k se define para cada fase d : combustible sin tratar (fase sólida); ret : retardante (fase sólida); g : fase gaseosa.

Considerando que la muestra está limitada por el tamaño del basket, donde $l_{z,S}$ denota la altura y $r_{o,S}$ el radio exterior del basket del SCALA, mientras que $l_{z,I}$ es la altura, $r_{i,I}$ el radio interior y $r_{o,I}$ el radio exterior del basket del I-FIT, los operadores $*2/(l_{z,S} r_{o,S}^2) \int_0^{l_{z,S}} \int_0^{r_{o,S}} r dr dz$ en el caso del SCALA y $*2/l_{z,I} (r_{i,I}^2 - r_{o,I}^2) \int_0^{l_{z,I}} \int_{r_{i,I}}^{r_{o,I}} r dr dz$ en el caso del I-FIT se aplican en ambos lados de la ecuación de energía, obteniendo un balance energético en términos de una temperatura promediada espacialmente $\bar{T}$ (procedimiento más detallado en Rivera *et al.* (2021)).

Una vez aplicado el operador para el caso del SCALA, y considerando que la transferencia de calor en el aparato es unidimensional en la dirección z , la Ecuación 7.1 se integra obteniendo:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} (\alpha_d \rho_d c_{p,d} + \alpha_{ret} \rho_{ret} c_{p,ret}) = \frac{1}{l_{z,S}} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial z} - \alpha_g \rho_g h_g u_g \right) \Big|_0^{l_{z,S}}. \quad (7.2)$$

En el caso del I-FIT, al aplicar el operador y considerando que la transferencia de calor en el aparato es unidimensional en la dirección r , la ecuación obtenida por integración es:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} (\alpha_d \rho_d c_{p,d} + \alpha_{ret} \rho_{ret} c_{p,ret}) = \frac{2}{r_{o,I}^2 - r_{i,I}^2} \left(r k_f \frac{\partial T}{\partial r} - \alpha_g \rho_g h_g r u_g \right) \Big|_{r_{i,I}}^{r_{o,I}}. \quad (7.3)$$

Para ambos casos, se emplean las siguientes condiciones de borde (donde la

variable $u = z$ y $u = r$ en las configuraciones SCALA e I-FIT, respectivamente):

$$\left(k_f \frac{\partial T}{\partial u} - \alpha_g \rho_g h_g u_g \right) \Big|_{u_i} = \dot{q}_i'' - \dot{q}_{\text{conv}}'' - \dot{q}_{\text{rad}}'' \quad (7.4)$$

$$\left(k_f \frac{\partial T}{\partial u} - \alpha_g \rho_g h_g u_g \right) \Big|_{u_o} = 0. \quad (7.5)$$

El coeficiente convectivo en el término de pérdida de calor es particularmente difícil de evaluar experimentalmente para esta geometría y medio poroso. Se considera el enfoque simplificado de Delichatsios *et al.* (1991). En este método, el parámetro de pérdida de calor χ ($\chi = 1.0$) caracteriza el efecto de las pérdidas de calor convectivo en la superficie en términos del flujo crítico de calor de ignición para el material. El término de pérdida radiativa se expresa como el intercambio radiativo entre dos superficies negras (Quintiere (2006)). Al integrar y reemplazar las condiciones de borde, se introduce una longitud característica $L_{c,k}$ representativa de la geometría de cada aparato experimental ($L_{c,S} = l_{z,S}$ y $L_{c,I} = (r_{o,I}^2 - r_{i,I}^2) / 2r_{i,I}$). En consecuencia, la ecuación de energía se convierte en:

$$L_{c,k} (\alpha_d \rho_d c_{p,d} + \alpha_{ret} \rho_{ret} c_{p,ret}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \dot{q}_i'' - \chi \dot{q}_{cri}'' - \sigma (\bar{T}^4 - T_\infty^4). \quad (7.6)$$

Para linealizar el término $\bar{T}^4$ en la Ecuación 7.6, se aplica una aproximación de Taylor alrededor de la temperatura ambiente T_∞ . Se define un coeficiente radiativo efectivo como $h_R = 4\sigma T_\infty^3$ (Quintiere (2006); Mindykowski *et al.* (2011)). Por conveniencia, se define un flujo de calor neto, $\dot{q}_T'' = \dot{q}_i'' - \chi \dot{q}_{cri}''$. Además, se introduce la densidad aparente para el medio poroso ($\rho_a = m_f/V_b$) utilizando el parámetro $\Phi = m_{ret}/m_d$, y un parámetro normalizado,

$$\mu = \int_{T_\infty}^{\bar{T}_{ig}} c_{p,ret} dT \Big/ \int_{T_\infty}^{\bar{T}_{ig}} c_{p,d} dT, \quad (7.7)$$

que representa el incremento normalizado de energía sensible necesario para calentar la masa de retardante contenida en la fase sólida hasta la temperatura $\bar{T}_{ig}$.

El uso de μ permitirá estimar $c_{p,ret}$ a partir de resultados experimentales, ya que su valor no está disponible fácilmente. Entonces, la Ecuación 7.6 se reescribe en términos del contenido de retardante Φ como:

$$\alpha_f L_{c,k} \rho_a c_{p,d} (1 + \mu \Phi) \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \dot{q}_T'' - h_R (\bar{T} - T_\infty). \quad (7.8)$$

Nótese que el papel del retardante de fuego se representa como un requerimiento adicional de energía (μ) ponderado por la cantidad relativa de retardante (Φ) para que el sólido poroso alcance la temperatura de ignición ($\bar{T}_{ig}$). Para obtener una solución analítica para la temperatura, es necesario reescribir la Ecuación 7.8 en una forma normalizada con los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{\bar{T} - T_\infty}{\bar{T}_{ig} - T_\infty}; \quad \psi = \frac{h_R (\bar{T}_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}_{cri}''}; \\ \tau &= \frac{\alpha_f L_{c,k} \rho_a c_{p,d} (1 + \mu \Phi) (\bar{T}_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}_{cri}''}; \quad \varphi = \frac{\dot{q}_T''}{\dot{q}_{cri}''}. \end{aligned} \quad (7.9)$$

La solución analítica para la temperatura promediada espacialmente se obtiene a través de la forma normalizada de la Ecuación 7.8, sujeta a la condición inicial $\Theta|_{t=0} = 0$ y se describe a continuación:

$$\bar{T} = T_\infty + \frac{\dot{q}_T''}{h_R} \left[1 - \exp \left(- \frac{h_R t}{\alpha_f \rho_a L_{c,k} c_{p,d} (1 + \mu \Phi)} \right) \right]. \quad (7.10)$$

Parameters	SCALA	I-FIT	Common
T_{∞} (K)	377 - 456	298	-
T_{ig} (K)	-	-	566 (Rivera <i>et al.</i> (2023))
$c_{p,d}$ (kJ/kgK)	-	-	1.47 (Rivera <i>et al.</i> (2021))
α_f	-	-	0.09 (Rivera <i>et al.</i> (2023))
L_c (m)	0.0365	0.08	-
$\dot{q}''_{cri}$ (kW/m ²)	7.5 - 12.5	8.5	-
V_b (cm ³)	385.28	621.4	-

Tabla 7.2: Parámetros utilizados en el análisis del escalamiento.

Utilizando los parámetros presentados en la Tabla 7.2, los resultados de ignición escalados se presentan en la Figura 7.7. Cabe destacar que los marcadores de color sólidos representan el valor de τ/t_{ig} calculado con el promedio de t_{ig} para cada σ_{ret} y flujo de calor incidente, mientras que los marcadores transparentes corresponden a los valores individuales de τ/t_{ig} para cada una de las pruebas. El escalamiento confirma que para valores grandes de φ , $\tau/t_{ig} \propto \varphi$, lo que permite estimar propiedades efectivas. Sin embargo, la gran dispersión observada en los resultados de ignición continua (ver Figura 7.7a) indica la necesidad de realizar mediciones específicas de T_{ig} y de μ para este equipo en particular. Lo anterior, tiene que ver con que la configuración actual del equipo SCALA no permite registrar la temperatura en la muestra durante las mediciones, teniendo que utilizar el valor de la temperatura de ignición promedio medido en el equipo I-FIT, el cual no necesariamente es representativo del SCALA. Recordar también que para la temperatura ambiente del equipo SCALA, se cuenta con un intervalo de temperatura dentro de la cámara de combustión, debido a que cuando se miden flujos de calor mayores, la temperatura dentro de la cámara es mayor, haciendo que la temperatura ambiente sea distinta para cada flujo de calor, provocando que la diferencia de temperatura ($\overline{T}_{ig} - T_{amb}$) sea un valor no tan representativo de todos los casos estudiados si se trabaja con el promedio del intervalo de temperatura ambiente.

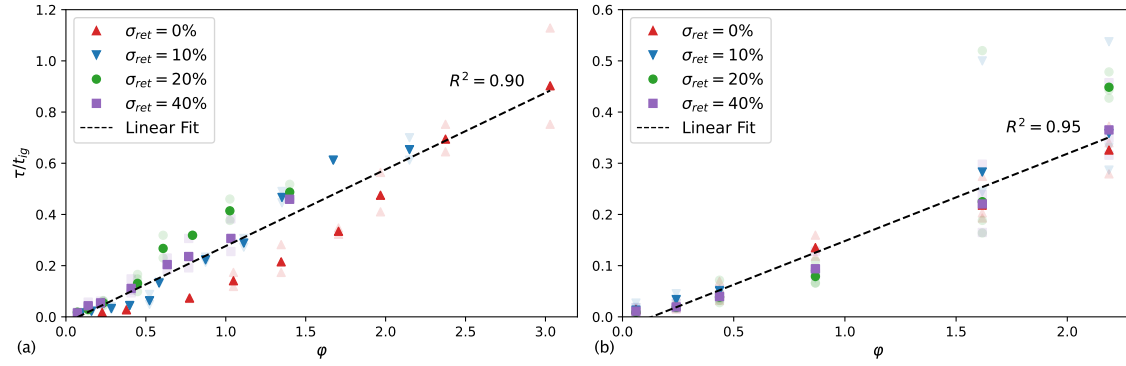


Figura 7.7: (a) Correlación entre τ/t_{ig} y φ para todas las pruebas realizadas en ignición continua (SCALA). (b) Correlación entre τ/t_{ig} y φ para todas las pruebas realizadas en ignición discontinua (I-FIT).

8 | Conclusiones

Se llevó a cabo un conjunto exhaustivo de experimentos en dos dispositivos de inflamabilidad representativos de dos modos comunes de ignición en incendios forestales: ignición continua (SCALA) e ignición discontinua (I-FIT), con el objetivo de cuantificar el efecto y el rendimiento de diferentes cantidades de retardante de fuego en la inflamabilidad de agujas de pino. Los resultados destacan claramente el efecto del tratamiento con retardante sobre el comportamiento de ignición y combustión de las muestras. En particular, la presencia de retardantes ralentiza eficazmente los procesos de ignición y propagación de la llama, reduciendo las tasas de liberación de calor y la pérdida total de masa en comparación con los combustibles sin tratar. El flujo crítico de masa para la ignición en los combustibles tratados muestra un aumento de 30 – 60 % con respecto a los combustibles sin tratar, mostrando poca dependencia de la cantidad de retardante aplicada. Todos estos resultados apuntan a un mayor efecto del retardante de fuego en la fase sólida que en la fase gaseosa. Las diferencias fundamentales entre los dos modos de ignición también se destacan en los resultados, por ejemplo, en el hecho de que la ignición por pavesas puede ocurrir en tiempos mucho más largos que la ignición radiante y que la configuración geométrica del proceso de ignición por pavesas produce flujos de calor críticos invariantes para la ignición.

De manera interesante, los resultados muestran que los efectos beneficiosos del tratamiento con retardante de fuego se vuelven menos pronunciados más allá de $\sigma_{ret} = 20\%$. Por lo tanto, estos resultados destacan una oportunidad para optimizar el uso de estos productos utilizando dispositivos de inflamabilidad a escala de laboratorio, dependiendo del uso final previsto y, además, permiten hacer una salvedad en la hipótesis de que el efecto del retardante es notable a mayor concentración utilizada, ya que pudimos observar que al parecer el uso de estos productos tienen una

cantidad óptima en su aplicación. Esto es particularmente importante en aplicaciones futuras en áreas de interfaz urbano-forestal (WUI), donde la ignición por pavesas juega un papel importante. Sin embargo, se requiere más investigación fundamental para avanzar en este camino de optimización, especialmente para determinar cómo se extrapolan estos resultados a pequeña escala al comportamiento a gran escala.



Bibliografía

- Academia Nacional de Bomberos de Chile (2020). Control de incendios forestales para bomberos. Recuperado el 17/09/2024. 4.1.3
- Àgueda, A., Pastor, E., y Planas, E. (2008). Different scales for studying the effectiveness of long-term forest fire retardants. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 34:782–796. 1.1, 1.2
- Babrauskas, V. (1986). Comparative rates of heat release from five different types of test apparatuses. *Journal of Fire Sciences*, 4(2):148–159. 4.3.9, 4.3.9
- Biteau, H., Steinhaus, T., Simeoni, A., Schemel, C., Marlair, G., Bal, N., y Torero, J. L. (2008). Calculation methods for the heat release rate of materials of unknown composition. 4.3.9, 4.3.9
- Botero, J. (2012). Diseño de un sistema para la detección y extinción de incendio en la iue. Último acceso: 19 de septiembre de 2024. 4.5
- Chow, W. K. y Han, S. (2011). Heat release rate calculation in oxygen consumption calorimetry. *Applied Thermal Engineering*, 31(2-3):304–310. 4.3.9
- Corporación Nacional Forestal (2022). Incendios forestales en Chile. [Acceso Julio de 2022]. 4.1.1
- Damany-Pearce, L., Johnson, B., Wells, A., Osborne, M., Allan, J., Belcher, C., Jones, A., y Haywood, J. (2022). Australian wildfires cause the largest stratospheric warming since pinatubo and extends the lifetime of the antarctic ozone hole. *Sci. Rep.*, 12(1):12665. 1.1

- Delichatsios, M., Panagiotou, T., y Kiley, F. (1991). The use of time to ignition data for characterizing the thermal inertia and the minimum (critical) heat flux for ignition or pyrolysis. *Combustion and Flame*, 84(3-4):323–332. 7.5
- El País (2024). Incendios forestales en Chile: sube a 99 el número de muertos y se decreta luto nacional. Último acceso: 17/09/2024. (document), 4.2
- Evans, D. D. y Breden, L. (1978). Time delay correction for heat release rate data. *Fire Technology*, 14:85–96. 4.3.9
- Fernández, J., Marco, D., Ribau, M., Terrén, D., Delgado, F., y Andrés, E. (2008). Curso básico de incendios forestales destinado a personal de operaciones de extinción. 4.3.5, 4.3.6
- Ferrer, J. (2008). *Estudio experimental de tratamientos protectores para la madera contra el fuego*. Tesis doctoral, UPC, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, Departament de Construccions Arquitectòniques II. 4.5
- Filipczak, R., Crowley, S., y Lyon, R. E. (2005). Heat release rate measurements of thin samples in the OSU apparatus and the cone calorimeter. *Fire safety journal*, 40(7):628–645. 4.3.9
- Filkov, A., Prohanov, S., Mueller, E., Kasymov, D., Martynov, P., El Houssami, M., Thomas, J., Skowronski, N., Butler, B., y Gallagher, M. (2017). Investigation of firebrand production during prescribed fires conducted in a pine forest. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(2):3263–3270. 5.1.2
- for Testing, A. S. y Materials (2003). E2058-03: Standard test method for measurement of synthetic polymer material flammability using a fire propagation apparatus. *ASTM International, West Conshohocken, PA*. 4.3.9
- Gong, W., Cuevas, J., Reszka, P., y Simeoni, A. (2023). The role of smoldering in the ignition of *Pinus palustris* needles. *Fire Saf. J.*, p. 104053. 1.2, 7.1
- Grzeškowiak, W. Ł. (2017). Effectiveness of new wood fire retardants using a cone calorimeter. *J. Fire Sci.*, 35(6):565–576. 1.2
- Gudmundsson, L., Rego, F. C., Rocha, M., y Seneviratne, S. I. (2014). Predicting

- above normal wildfire activity in southern europe as a function of meteorological drought. *Environ. Res. Lett.*, 9(8):084008. 1.1
- Hardy, C. E. (1962). *Evaluation of forest fire retardants: a test of chemicals on laboratory fires*. Intermountain Forest and Range Experiment Station. 1.1
- Hernández, N., Fuentes, A., Reszka, P., y Fernández-Pello, A. (2019). Piloted ignition delay times on optically thin pmma cylinders. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(3):3993–4000. 7.5
- Huggett, C. (1980). Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and materials*, 4(2):61–65. 4.3.9
- Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall Jr, J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., Watts Jr, J. M., y Wieczorek, C. J. (2015). *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer. (document), 4.3.2, 4.4, 4.3.2, 4.3.2, 4.3.2, 4.3.3, 4.5, 4.3.4
- Janssens, M. (1995). Methods and equations of fire calorimetry. *Fire Calorimetry, DOT/FAA/CT-95/46, US Department of Transportation*, pp. 12–21. 4.3.9, 4.3.9, 4.3.9, 4.3.9
- Joseph, P. y Ebdon, J. R. (2009). Phosphorus-based flame retardants. *Fire Retardancy of Polymeric Materials, 2nd ed.*, pp. 107–128. 1.1
- Keane, R. E. (2015). *Wildland fuel fundamentals and applications*. Springer. 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3
- Lautenberger, C. y Fernandez-Pello, C. (2011). Optimization algorithms for material pyrolysis property estimation. *Fire Safety Science*, 10:751–764. 4.3.2
- Leone, V., Elia, M., Lovreglio, R., Correia, F., y Tedim, F. (2023). The 2017 extreme wildfires events in portugal through the perceptions of volunteer and professional firefighters. *Fire*, 6(4):133. 1.1
- Li, Z., Angerer, J. P., y Wu, X. B. (2022). The impacts of wildfires of different burn severities on vegetation structure across the western united states rangelands. *Sci. Total Environ.*, 845:157214. 1.1

- Liodakis, S., Antonopoulos, I., y Kakardakis, T. (2010). Evaluating the use of minerals as forest fire retardants. *Fire Saf. J.*, 45(2):98–105. 1.2, 7.3, 7.3
- Liodakis, S., Vorisis, D., y Agiovlasis, I. (2006). Testing the retardancy effect of various inorganic chemicals on smoldering combustion of pinus halepensis needles. *Thermochim. Acta*, 444(2):157–165. 1.2
- Liz-López, H., Huertas-Tato, J., Pérez-Aracil, J., Casanova-Mateo, C., Sanz-Justo, J., y Camacho, D. (2024). Spain on fire: A novel wildfire risk assessment model based on image satellite processing and atmospheric information. *Knowledge-Based Syst.*, 283:111198. 1.1
- Los Ángeles Times (2020). It's a staple of fire season, but what is it? Último acceso: 20/09/2024. (document), 4.7
- Lyon, R. E. y Abramowitz, A. (1995). Effect of instrument response time on heat release rate measurements. *Fire and materials*, 19(1):11–17. 4.3.9
- Manzello, S. L., Cleary, T. G., Shields, J. R., Maranghides, A., Mell, W., y Yang, J. C. (2008). Experimental investigation of firebrands: generation and ignition of fuel beds. *Fire Safety Journal*, 43(3):226–233. 5.1.2
- Manzello, S. L., Cleary, T. G., Shields, J. R., y Yang, J. C. (2006a). On the ignition of fuel beds by firebrands. *Fire and Materials: An International Journal*, 30(1):77–87. 5.1.2
- Manzello, S. L., Maranghides, A., Mell, W. E., Cleary, T. G., y Yang, J. C. (2006b). Firebrand production from burning vegetation. *Forest Ecology and Management*, 234(1):S119. 5.1.2
- Manzello, S. L., Maranghides, A., Shields, J. R., Mell, W. E., Hayashi, Y., y Nii, D. (2009). Mass and size distribution of firebrands generated from burning korean pine (pinus koraiensis) trees. *Fire and Materials: An International Journal*, 33(1):21–31. 5.1.2
- Martínez, Y., Paes, J., y Martínez, E. (2018). Fireproof properties of wood plastic composite produced with different forest species and recycled thermoplastics. *Madera y bosques*, 24(2). 4.5

- Milla, L. y Castillo, R. (2010). *Estudio de las propiedades mecánicas y el comportamiento al fuego de morteros epoxídicos modificados*. Tesis doctoral, UPC, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, Departament de Construccions Arquitectòniques II. 4.5
- Mindykowski, P., Fuentes, A., Consalvi, J., y Porterie, B. (2011). Piloted ignition of wildland fuels. *Fire Safety Journal*, 46(1-2):34–40. 4, 6.8.3, 7.5, 7.5
- Mowrer, F. W. (2004). Fundamentals of the fire hazards of materials. *Handbook of Building Materials for Fire Protection*. 4.3.2, 4.3.2, 4.3.9
- National Wildfire Coordinating Group (2013). Fire operations in the wildland/urban interface. s-215. instructor guide. Recuperado el 17/09/2024. 4.1.3
- Nolan, R. H., Anderson, L. O., Poulter, B., y Varner, J. M. (2022). Increasing threat of wildfires: the year 2020 in perspective: A global ecology and biogeography special issue. *Global Ecol. Biogeogr.*, 31:1898–1905. 1.1
- Nuestro Clima (2024). Estos fenómenos influyen en la propagación de incendios. Último acceso: 17/09/2024. (document), 4.3
- Parker, W. J. (1984). Calculations of the heat release rate by oxygen consumption for various applications. *Journal of fire sciences*, 2(5):380–395. 4.3.9
- Parot, R., Rivera, J. I., Reszka, P., Torero, J. L., y Fuentes, A. (2022). A simplified analytical model for radiation dominated ignition of solid fuels exposed to multiple non-steady heat fluxes. *Combustion and Flame*, 237:111866. 7.5
- Plucinski, M. P. (2019). Fighting flames and forging firelines: Wildfire suppression effectiveness at the fire edge. *Curr. For. Rep.*, 5:1–19. 1.1
- Pontes-Lopes, A., Silva, C. V., Barlow, J., Rincón, L. M., Campanharo, W. A., Nunes, C. A., de Almeida, C. T., Silva Júnior, C. H., Cassol, H. L., y Dalagnol, R. (2021). Drought-driven wildfire impacts on structure and dynamics in a wet central amazonian forest. *Proc. R. Soc. B*, 288(1951):20210094. 1.1
- Quintiere, J. (1981). A simplified theory for generalizing results from a radiant panel rate of flame spread apparatus. *Fire and Materials*, 5(2):52–60. 7.1

- Quintiere, J. G. (2006). Fundamentals of fire phenomena. 4.3.2, 4.3.9, 7.5, 7.5
- Reszka, P., Cruz, J., Valdivia, J., González, F., Rivera, J., Carvajal, C., y Fuentes, A. (2020). Ignition delay times of live and dead pinus radiata needles. *Fire Saf. J.*, 112:102948. 7.3
- Rivera, J., Hernández, N., Consalvi, J., Reszka, P., Contreras, J., y Fuentes, A. (2021). Ignition of wildland fuels by idealized firebrands. *Fire Safety Journal*, 120:103036. 7.5, ??
- Rivera, J. I., Ebensperger, F., Valenzuela, F., Escandar, L., Reszka, P., y Fuentes, A. (2023). Understanding the role of fire retardants on the discontinuous ignition of wildland fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*, 39:3775–3783. 1.2, 7.1, 7.2, 7.5, ??, ??
- Schartel, B. y Hull, T. (2007). Development of fire-retarded materials—interpretation of cone calorimeter data. *FIRE MATER*, 31(5):327–354. 1.2, 7.3
- Schemel, C., Simeoni, A., Biteau, H., Rivera, J., y Torero, J. (2008). A calorimetric study of wildland fuels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(7):1381–1389. Fifth mediterranean combustion symposium. 1.2
- Segev, O., Kushmaro, A., y Brenner, A. (2009). Environmental impact of flame retardants (persistence and biodegradability). *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 6(2):478–491. 1.2
- Soto, M. C., Julio-Alvear, G., y Salinas, R. G. (2015). Current wildfire risk status and forecast in chile: Progress and future challenges. En *Wildfire hazards, risks and disasters*, pp. 59–75. Elsevier. 4.3.2
- Stephens, S. L., Collins, B. M., Fettig, C. J., Finney, M. A., Hoffman, C. M., Knapp, E. E., North, M. P., Safford, H., y Wayman, R. B. (2018). Drought, tree mortality, and wildfire in forests adapted to frequent fire. *BioScience*, 68(2):77–88. 1.1
- Sugihara, N. G., Van Wagtendonk, J. W., Fites-Kaufman, J., Shaffer, K. E., y Thode, A. E. (2006). *Fire in California's ecosystems*. University of California Press. 4.1.4

- Tewarson, A. (2002). Generation of heat and chemical compounds in fires. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 4.3.9
- Thornton, W. (1917). Xv. the relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 33(194):196–203. 4.3.9
- Tonello, M. L. (2003). Tratamiento ignífugo de maderas. Último acceso: 19 de septiembre de 2024. 4.5
- Tonello, M. L., Keil, G. D., Maly, L. E., y Canosa, G. (2017). *Evaluación del comportamiento al fuego de la madera de pino ponderosa impregnada con 8 soluciones potencialmente ignífugas*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 4.5
- Torero, J. (2016). Flaming ignition of solid fuels. En *SFPE handbook of fire protection engineering*, pp. 633–661. Springer. 4.3.2, 4.3.2, 4.3.9
- Úbeda, X. y Sarricolea, P. (2016). Wildfires in chile: A review. *Global Planet. Change*, 146:152–161. 1.1
- Vargas, A. (2023). Estudio de técnicas de extracción y análisis para la determinación de retardantes de llama en alimentos. Último acceso: 19 de septiembre de 2024. 4.5
- Xiong, P., Yan, X., Zhu, Q., Qu, G., Shi, J., Liao, C., y Jiang, G. (2019). A review of environmental occurrence, fate, and toxicity of novel brominated flame retardants. *Environ. Sci. Technol.*, 53(23):13551–13569. 1.2
- Zhang, Y., Fan, J., Shrivastava, M., Homeyer, C. R., Wang, Y., y Seinfeld, J. H. (2022). Notable impact of wildfires in the western united states on weather hazards in the central united states. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(44):e2207329119. 1.1
- Zheng, B., Ciais, P., Chevallier, F., Chuvieco, E., Chen, Y., y Yang, H. (2021). Increasing forest fire emissions despite the decline in global burned area. *Sci. Adv.*, 7(39):eabh2646. 1.1

Anexos





UAI
UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ

Combustion Laboratory | Campus Peñalolén.

Manual del uso del calorímetro SCALA

Jorge VALDIVIA GAVILÁN

[*Jorvaldivia@alumnos.uai.cl*](mailto:Jorvaldivia@alumnos.uai.cl)

Nicolás Correa Porras

[*Nicorrea@alumnos.uai.cl*](mailto:Nicorrea@alumnos.uai.cl)

Profesor:

Dr. Pedro RESZKA C.

Versión 1.0

28 de julio de 2022

TABLA DE CONTENIDOS

Nomenclatura	2
Simbología	2
1. Introducción	4
1.1. Objetivo	4
2. Calorímetro SCALA versión 2.0	4
2.1. Aumento en la entalpía sensible	5
2.2. Consumo de oxígeno calorimétrico	7
2.3. Pérdida de masa	8
2.3.1. Calor de combustión	8
3. Procedimiento experimental	10
3.1. Encendiendo el calorímetro	10
3.2. Determinación de la HRR por el método SER	13
3.3. Determinación de la HRR por el método OC	14
3.4. Determinación de la HRR por el método MLR	14
4. Peligros	15
4.1. Peligros eléctricos	15
4.2. Peligros de exposición al calor	15
Referencias	17
Anexo	19
A. Calibración eléctrica	19
A.1. Ejemplo de calibración eléctrica	20
B. Calibración método SER	22
B.1. Calibración diaria (SER)	22
B.1.1. Ejemplo calibración diaria (SER)	23
B.2. Calibración semanal (SER)	25
B.2.1. Ejemplo de calibración semanal (SER)	26
C. Calibración por el método OC	28
C.1. Calibración diaria (OC)	28
C.2. Calibración semanal (OC)	29

Nomenclatura

SCALA	<i>Sensible Heat Calorimetry Apparatus</i>
HRR	<i>Heat Release Rate</i>
HHC	<i>High Heat of Combustion</i>
LHC	<i>Low Heat of Combustion</i>
EHC	<i>Effective Heat of Combustion</i>
OSU	<i>Ohio State University rate of heat release apparatus</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
FPA	<i>Fire Propagation Apparatus</i>
SER	<i>Sensible Enthalpy Rise</i>
OC	<i>Oxygen Consumption calorimetry</i>
MLR	<i>Mass Loss Rate</i>
CDG	<i>Carbon Dioxide Generation</i>
TDLAS	<i>Tuneable Diode Laser Absorption Spectroscopy</i>
LPG	<i>Liquified Petroleum Gas</i>

Simbología

$\dot{q}_{conv}$	Tasa de liberación de calor por convección (kW)
$\dot{q}_{loss}$	Pérdida de calor por convección (kW)
$\dot{q}_{SER}$	Tasa de liberación de calor por el método del aumento en la entalpía sensible (kW)
$\dot{q}_{OC}$	Tasa de liberación de calor por el método del consumo de oxígeno calorimétrico (kW)
$\dot{q}_{MLR}$	Tasa de liberación de calor por el método de la pérdida de masa (kW)
$\dot{q}_{inc}''$	Flujo de calor incidente (radiante) (kW·m ⁻²)
t_{ig}	Tiempo de ignición (s)
t_{eof}	Tiempo al finalizar la llama (s)
Δh_c	Calor de combustión neto (kJ·kg ⁻¹)
$\Delta h_{c,eff}$	Calor de combustión efectivo (kJ·kg ⁻¹)
$\Delta h_{c,LPG}$	Calor de combustión neto del gas licuado de petróleo (kJ·kg ⁻¹)
$m_{t_{ig}}$	Masa en el tiempo de ignición (kg)
$m_{t_{eof}}$	Masa en cuando ya no hay llamas (kg)
$\dot{m}_e$	Flujo másico de aire saliendo de la cámara de combustión (kg·s ⁻¹)
$\dot{m}_a$	Flujo másico de aire entrando a la cámara de combustión (kg·s ⁻¹)
$\dot{m}_v$	Tasa de evaporación del combustible en la cámara de combustión (kg·s ⁻¹)
$\dot{m}_{O_2}^0$	Flujo másico de oxígeno que ingresa a la cámara de combustión (kg·s ⁻¹)
$\dot{m}_{O_2}$	Flujo másico de oxígeno que escapa de la cámara de combustión (kg·s ⁻¹)
$\dot{m}_{high}$	Flujo másico alto de LPG para la calibración (kg·s ⁻¹)
$\dot{m}_{low}$	Flujo másico bajo de LPG para la calibración (kg·s ⁻¹)
$\dot{m}_{base}$	Flujo másico base de LPG para la calibración (kg·s ⁻¹)

c_p	Calor específico del aire y los productos de la combustión ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
T_e	Temperatura de los gases de escape ($^\circ\text{C}$)
T_o	Temperatura inicial del sistema ($^\circ\text{C}$)
T_a	Temperatura de la masa de aire entrante a la cámara de combustión ($^\circ\text{C}$)
T_v	Temperatura de la masa de combustible que se evapora en la combustión ($^\circ\text{C}$)
T_{high}^{ss}	Temperatura en estado estacionario del flujo másico alto en la calibración ($^\circ\text{C}$)
T_{low}^{ss}	Temperatura en estado estacionario del flujo másico bajo en la calibración ($^\circ\text{C}$)
χ_r	Proporción de las pérdidas de calor (adimensional)
χ	Eficiencia de la combustión (adimensional)
ρ_{LPG}	Densidad del gas licuado de petróleo ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
C.F.	Factor de corrección del gas licuado pasando por el flujómetro (adimensional)
FMC	Contenido de humedad (%)
E	Calor de combustión del oxígeno para materiales orgánicos típicos ($13,1 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ O}_2$)
$X_{\text{O}_2}^A$	Fracción molar de oxígeno durante la combustión (adimensional)
$X_{\text{O}_2}^o$	Fracción molar de oxígeno previo a la combustión (adimensional)
K_{SER}	Constante de calibración por el método SER ($\text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
$K_{\text{SER,D}}$	Constante de calibración por el método SER diaria ($\text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
$K_{\text{SER,W}}$	Constante de calibración por el método SER semanal ($\text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
K_{OC}	Constante de calibración por el método OC ($\text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
$K_{\text{OC,D}}$	Constante de calibración por el método OC diaria ($\text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
$K_{\text{OC,W}}$	Constante de calibración por el método OC semanal ($\text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
L	Camino óptico que recorre el láser del TDLAS (m)
X_{PPMM}	Concentración de oxígeno entregada por el TDLAS (PPMM)
C_{high}	Concentración de oxígeno del flujo másico alto en la calibración (%)
C_{low}	Concentración de oxígeno del flujo másico bajo en la calibración (%)

1. Introducción

Un calorímetro es un aparato capaz de cuantificar variables de inflamabilidad de combustibles. Entre estas se encuentran el tiempo de ignición (t_{ig}), el calor de combustión efectivo ($\Delta h_{c,eff}$ en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), la tasa de liberación de calor (*Heat Release Rate*, HRR – kW), entre otras. En la categoría de experimentos a escala se pueden determinar, principalmente, tres aparatos normados a nivel internacional, que corresponden al caso del “Cone Calorimeter” (Babrauskas, 1984), el cual mide la tasa de liberación de calor a partir de la metodología del consumo de oxígeno calorimétrico (OC – *Oxygen Consumption*), el “Ohio State University (OSU) Rate of Heat Release Apparatus” (Smith, 1972), que mide la tasa de liberación de calor a partir del aumento de la entalpía sensible (SER – *Sensible Enthalpy Rise*) y el “ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus (FPA)”, desarrollado por la *Factory Mutual Research Corporation* (ASTM, 2013), que mide la tasa de liberación de calor a partir del consumo de oxígeno calorimétrico (OC) y generación de dióxido de carbono (CDG – *Carbon Dioxide Generation*). Es importante mencionar que, a su vez, todos los aparatos son capaces de registrar la pérdida de masa gracias a la celda de carga dentro de cada uno de estos, de forma tal de cuantificar la tasa de liberación de calor a partir de la pérdida de la masa en la combustión (MLR – *Mass Loss Rate*).

1.1. Objetivo

El objetivo del presente documento es establecer la metodología para el correcto uso y empleo de los diversos sistemas y/o aparatos con los que cuenta el calorímetro SCALA para realizar las mediciones de las variables y, a su vez, establecer las expresiones matemáticas para su cálculo, así como la metodología para la calibración y uso del aparato.

2. Calorímetro SCALA versión 2.0

El calorímetro *Sensible Heat Calorimetry Apparatus* (SCALA v2.0) fue desarrollado por alumnos y profesores de la Universidad Adolfo Ibáñez (Santiago – Chile) con fines de investigación científica. Un esquema del SCALA se puede apreciar en la Figura 1. Este aparato es capaz de medir la tasa de liberación de calor a partir de diversas metodologías (simultáneamente). En el presente documento sólo se hace hincapié en las tres siguientes: (i) Aumento en la entalpía sensible (SER – *Sensible Enthalpy Rise*), (ii) consumo de oxígeno calorimétrico (OC – *Oxygen Consumption*) y (iii) pérdida de masa (MLR – *Mass Loss Rate*). Esta versión del SCALA (versión 2.0) corresponde a una modificación del SCALA v1.0, desarrollado por alumnos y profesores de la Universidad Técnica Federico Santa María (Volkwein, 2016). Cabe destacar que el calorímetro SCALA es capaz de proporcionar flujos de calor incidentes en el rango $\sim 10 - 50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ haciendo uso de los tres pares de resistencias en cada uno de los calefactores (Kanthal de carbono de silicio, SiC), cuya resistencia es de $\approx 7 \Omega$. A continuación se establecerán las tres metodologías que utiliza el SCALA para cuantificar la tasa de liberación de calor.

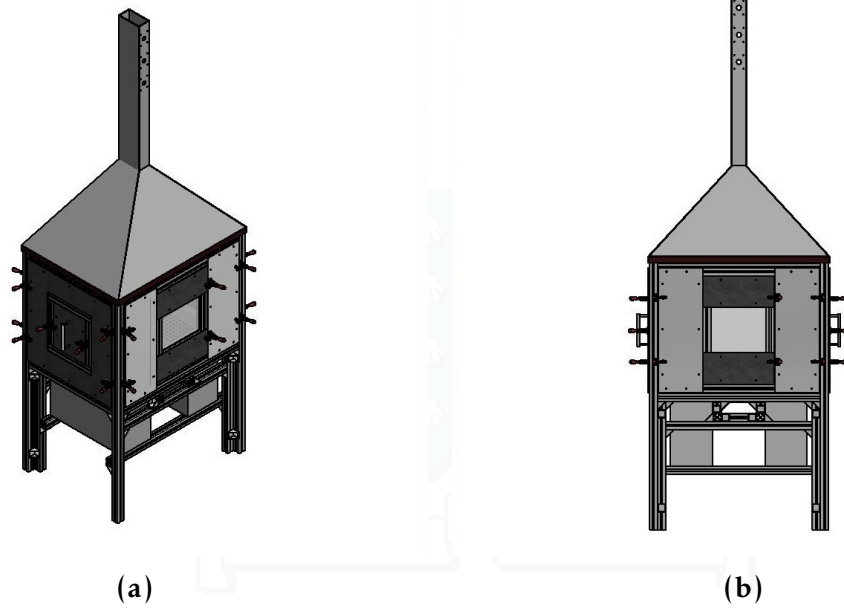


Figura 1: Calorímetro SCALA (render 3D).

2.1. Aumento en la entalpía sensible

El aumento en la entalpía sensible (SER) es un método para estimar la tasa de liberación de calor al realizar un balance energético en la fase gaseosa entre el calor liberado por el material que se está quemando y el aumento de la entalpía (temperatura) de la masa de aire y los productos de la combustión en un volumen de control determinado. Si se considera un sistema ideal (adiabático), el balance energético puede determinarse a partir de la siguiente expresión (Filipczak et al., 2005).

$$\dot{q}_{conv}(t) = \dot{m}_e c_p (T_e(t) - T_o) \quad (1)$$

donde $\dot{q}_{conv}$ corresponde al calor total liberado por convección (kW), $\dot{m}_e$ es el flujo másico de aire que sale de la cámara de combustión (del volumen de control, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), c_p es el calor específico a presión constante de la mezcla de gases ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), T_e es la temperatura del aire y productos de la combustión (en función del tiempo, $^{\circ}\text{C}$) y T_o es la temperatura inicial del sistema previo a la combustión ($^{\circ}\text{C}$). Es importante notar que en cada instante de tiempo existirá un valor para $T_e(t)$, mientras que T_o se calcula como un promedio de temperaturas previo al ensayo (previo a la combustión), i.e. en estado estacionario. La expresión (1) es la base metodológica del calorímetro OSU. Así, la tasa de liberación de calor es estimada por el aumento de la entalpía ($T_e(t) - T_o$) del flujo de aire y los productos de la combustión a través del aparato, la cual se genera a partir de la energía que se libera del sistema mientras que el combustible se quema.

Sin embargo, la Ecuación (1) se restringe a sistemas adiabáticos, lo cual es bastante lejano a la realidad. Si se considera que existe un flujo de aire $\dot{m}_a$ que entra al volumen

de control ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) y que, A su vez, el combustible se evapora a una tasa de $\dot{m}_v$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), luego, los gases de salida $\dot{m}_e$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) equivalen a la suma de la masa de aire que entra al sistema ($\dot{m}_a$) y a la masa de aire evaporada por el combustible ($\dot{m}_v$). Así, una expresión que involucra las pérdidas de calor en el sistema será la siguiente (Janssens, 1995).

$$\dot{q}_{conv} - \dot{q}_{loss} = \dot{m}_e c_p (T_e - T_o) - \dot{m}_a c_p (T_a - T_o) - \dot{m}_v c_p (T_v - T_o) \quad (2)$$

donde $\dot{q}_{conv}$ es la tasa de liberación de calor en la combustión (kW), $\dot{q}_{loss}$ es la pérdida de calor hacia los alrededores del sistema (kW), c_p es el calor específico ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), T_e es la temperatura de los productos de la combustión en el ducto de salida ($^{\circ}\text{C}$), T_a es la temperatura del aire que entra a la cámara de combustión ($^{\circ}\text{C}$), T_v es la temperatura de los volátiles en la combustión ($^{\circ}\text{C}$) y T_o es la temperatura de referencia en estado estacionario, i.e. previo a la combustión ($^{\circ}\text{C}$).

Para la mayoría de los materiales comburentes, el razón estequiométrica entre el aire y el combustible varía entre 3 y 16. De hecho, en general la mayoría de los calorímetros de ensayo operan con exceso de aire de entrada a la cámara de combustión ($\dot{m}_a$), que corresponde al caso del calorímetro SCALA. Debido a lo anterior, la razón de producción de gases volátiles en la combustión ($\dot{m}_v$) puede despreciarse en comparación a $\dot{m}_a$. Luego, si $\dot{m}_a \approx \dot{m}_e$, entonces la expresión (2) puede reescribirse como (Janssens, 1995):

$$\dot{q}_{conv} - \dot{q}_{loss} \approx \dot{m}_e c_p (T_e - T_a) \quad (3)$$

Luego, si se asume que las pérdidas de calor son independientes del combustible, y que equivalen a una fracción de la tasa de liberación total, se tendrá que:

$$\chi_r = \frac{\dot{q}_{loss}}{\dot{q}_{conv}} \implies \dot{q}_{conv} - \dot{q}_{loss} \equiv (1 - \chi_r) \dot{q}_{conv} \quad (4)$$

El término χ_r es la proporción de las pérdidas de calor de la tasa de liberación de calor total de la llama. Si el calorímetro opera con un flujo másico de aire constante $\dot{m}_a$ (y $\dot{m}_a \approx \dot{m}_e$), la ecuación (3) (utilizando el resultado de la expresión (4)) puede reescribirse como:

$$\dot{q}_{conv} = \dot{q}_{SER} \approx \frac{\dot{m}_e c_p}{1 - \chi_r} (T_e - T_a) \quad (5)$$

$$K_{SER} \equiv \frac{\dot{m}_e c_p}{1 - \chi_r} \quad (6)$$

$$\dot{q}_{SER} = K_{SER} (T_e - T_a) \quad (7)$$

donde $\dot{q}_{SER}$ corresponde a la tasa de liberación de calor por medio del método del aumento en la entalpía sensible (kW) y K_{SER} es un factor de calibración que debe

determinarse experimentalmente (ver el [Anexo B](#)).

2.2. Consumo de oxígeno calorimétrico

La base fundamental de este método consiste en que existe una energía constante (E) que se libera por unidad de masa de oxígeno consumida en la combustión. Esta constante equivale a $13,1 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, cuyo valor ha tenido variaciones de $\pm 5\%$ en la literatura ([Biteau et al., 2008](#); [Janssens, 1995](#)). Así, la tasa de liberación de calor por medio del método del consumo de oxígeno calorimétrico ($\dot{q}_{OC}$) se puede determinar a partir de la siguiente expresión.

$$\dot{q}_{OC} = E \Delta \dot{m}_{O_2} \quad (8)$$

$$\dot{q}_{OC} = E(\dot{m}_{O_2}^o - \dot{m}_{O_2}) \quad (9)$$

donde E es la constante de energía, $\Delta \dot{m}_{O_2}$ es la tasa de consumo de oxígeno en la combustión, $\dot{m}_{O_2}^o$ es el flujo másico de oxígeno que ingresa al volumen de control y $\dot{m}_{O_2}$ es el flujo másico de oxígeno que sale del volumen de control.

En el calorímetro SCALA, la forma en la cual se determina la tasa de liberación por el método del consumo de oxígeno es a partir de una diferencia entre las concentraciones de oxígeno previo y durante la combustión. Esto se logra producto de la determinación de la concentración de oxígeno utilizando un analizador de gases llamado *Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy* (TDLAS), cuyo resultado será en PPM. En términos simples, el TDLAS para oxígeno emite un láser en los 662 nm, donde la mayoría de las moléculas que éste capta en su camino corresponde a moléculas de oxígeno. Si se utiliza el método del empleo de una constante de calibración (K_{OC}) ([Filipczak et al., 2005](#)), y realizando algunos ajustes para las unidades, se tendrá que:

$$\dot{q}_{OC}(t) = K_{OC} \left(\frac{X_{O_2}^A(t) - X_{O_2}^o}{10^4 \cdot L} \right) \quad (10)$$

donde $X_{O_2}^A(t)$ y $X_{O_2}^o$ corresponden a las concentraciones de oxígeno medidas por el TDLAS en PPM durante el ensayo y previo a la ignición, respectivamente. L corresponde a la distancia o camino óptico recorrido por el láser (entre la fuente de emisión y el receptor), y el valor 10^4 es para convertir las unidades a porcentaje (%), y, finalmente, K_{OC} equivale al factor de calibración que debe determinarse experimentalmente (ver [Anexo C](#)).

2.3. Pérdida de masa

La energía liberada de un material que se está quemando se puede determinar si la tasa de pérdida de masa y el calor de combustión del material son conocidos.

$$\dot{q}_{MLR} = \chi \dot{m} \Delta h_c \quad (11)$$

donde $\dot{q}_{MLR}$ es la tasa de liberación de calor por medio del método de la pérdida de masa, χ es un valor entre 0 y 1 que indica qué tan completa fue la combustión, Δh_c es el calor de combustión del material ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) y $\dot{m}$ es la razón de la masa consumida en la combustión dividida por el tiempo que le tomó consumirla ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), que se conoce como la velocidad de la combustión. Generalmente, se utiliza un valor de $\chi = 1$, i.e. se asume combustión completa, lo que ha llevado a errores menores al 10% (Biteau et al., 2008). Luego, si se cuenta con una balanza de precisión en donde se coloca la muestra (que es el caso del calorímetro SCALA), entonces la única complejidad sería la determinación del calor de combustión. A continuación se profundizará sobre lo anterior.

2.3.1. Calor de combustión

El calor de combustión (Δh_c) corresponde a la energía liberada cuando las especies de una reacción realizan el proceso de combustión de forma completa con oxígeno (Agueda et al., 2009). Cuando el calor de combustión de un material es conocido, se puede obtener una buena estimación teórica de la tasa de liberación de calor (HRR) (Biteau et al., 2008). Sin embargo, en la mayoría de los casos (sobre todo en los experimentos asociados al SCALA), el calor de combustión no es conocido y varía. Así, existen diversas definiciones asociadas al calor de combustión. Entre estas se encuentran el HHC (*High Heat of Combustion*), que corresponde al valor obtenido a partir del uso de una bomba calorimétrica, Δh_c , el LHC (*Low Heat of Combustion*), EHC (*Effective Heat of Combustion*, $\Delta h_{c, \text{eff}}$), entre otros. El valor más común empleado en la literatura es el HHC, sin embargo, éste resultado dista de aquellos encontrados en incendios forestales, y por tanto un valor más ad hoc sería el del EHC, que es menor (Jervis & Rein, 2016; Madrigal et al., 2011). Experimentalmente, el valor del EHC se calcula a partir de la siguiente expresión (Madrigal et al., 2011; Morandini et al., 2013).

$$\text{EHC} = \Delta h_{c, \text{eff}} = \frac{1}{m_{t_{ig}} - m_{t_{eof}}} \int_{t_{ig}}^{t_{eof}} \text{HRR}(t) dt \quad (12)$$

donde $m_{t_{ig}}$ y $m_{t_{eof}}$ corresponden al valor de la masa en el tiempo de ignición y la masa al finalizar la combustión con llamas (cuando ya no hay llamas, en kg), respectivamente, t_{ig} y t_{eof} corresponden al tiempo de ignición y tiempo al finalizar la combustión con llamas (s), respectivamente, y HRR es la tasa de liberación de calor, que puede ser tanto por el método SER ($\dot{q}_{SER}$) como OC ($\dot{q}_{OC}$). La forma experimental más fácil de determinar el valor del EHC es discretizando la integral anterior en una suma, como se

presenta en la expresión (13) (Madrigal et al., 2011).

$$EHC = \Delta h_{c,eff} = \frac{1}{m_{t_{ig}} - m_{t_{eof}}} \sum_{i=t_{ig}}^{t_{eof}} HRR_i \cdot \Delta t \quad (13)$$

donde Δt es el intervalo de tiempo de análisis (que debiese ser $\Delta t = 1$ s). Para determinar un valor medio de la EHC ($\overline{EHC}$) se utiliza la expresión (14).

$$\overline{EHC} = \overline{\Delta h_{c,eff}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta h_{c,eff_i} \quad (14)$$

donde N es la cantidad de experimentos. Se recomienda utilizar $\overline{EHC}$ como del calor de combustión para determinar la tasa de liberación de calor por el método de la pérdida de masa ($\dot{q}_{MLR}$). Por otra parte, se puede agregar el cálculo de la eficiencia de la combustión (χ) en la expresión (11) a partir de la siguiente relación (Morandini et al., 2013).

$$\chi = \frac{\Delta h_{c,eff}(1 + FMC/100)}{\Delta h_c} \quad (15)$$

donde Δh_c es el calor de combustión neto ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) obtenido de la bomba calorimétrica, y FMC es el contenido de humedad de la muestra (*fuel moisture content*, %), que se calcula mediante la siguiente expresión (Yebra et al., 2018).

$$FMC = \frac{m_f - m_d}{m_d} \times 100 \text{ (\%)} \quad (16)$$

donde m_f y m_d corresponden a la masa fresca y seca de combustible vegetal, respectivamente. Para la masa seca generalmente se utiliza la metodología del *oven-dry weight* donde la muestra fresca se seca en un horno por convección natural entre 60-110°C y durante 24-72 horas (Desbois et al., 1997; Zahn & Hensen, 2011). Cabe destacar que el valor de Δh_c se ha asumido en algunos estudios como constante para la mayoría de combustibles forestales, siendo su valor correspondiente a $18.000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Morandini et al., 2013).

3. Procedimiento experimental

3.1. Encendiendo el calorímetro

Para poder encender el calorímetro, se deben seguir los pasos que se darán a conocer a continuación.

Paso 1: Encender y regular

1. Se debe encender el extractor de aire (ver la [Figura 2a](#)). Este se encuentra a un costado del panel eléctrico.
2. Se debe abrir la llave que proporciona el flujo de agua que alimenta al radiómetro y funciona como intercambiador de calor (ver la [Figura 2b](#)). Se debe abrir la llave al máximo.
3. Se debe instalar y encender el ventilador (ver figuras [2c](#) y [2d](#)) que proporciona el flujo de aire entrante al calorímetro.

Paso 2: Abrir los software de captura de datos

1. SCALA measurement project. Este software es utilizado para monitorear las temperaturas registradas por las termocuplas ubicadas en los distintos puntos de interés. Además, permite digitalizar la señal proveniente del radiómetro (radiación incidente, en mV). Para convertir el voltaje (mV) a flujo de calor incidente ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$), se requiere un valor **base** proporcionado por el radiómetro (V_{base}). Para esto, es necesario dejar el radiómetro dentro del calorímetro con todo encendido (agua, ventilador y extractor) durante, al menos, 45 minutos para estudiar el valor base del radiómetro (mV). Luego, el flujo de calor incidente se calcula como:

$$\dot{q}_{inc}''(t) = (V_{rad}(t) - V_{base}) \cdot 4,926 \quad (\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (17)$$

donde, $V_{rad}(t)$ es el voltaje (mV) medido por el radiómetro en el instante t , y 4,926 es la constante de conversión del radiómetro dada por el fabricante.

OBS: generalmente el valor base del radiómetro es negativo.

2. Spectral Data View (PKL Technologies Inc.). Su función es registrar las concentraciones de oxígeno medida por el TDLAS en los gases de escape. Cada vez que se encienda el equipo se debe verificar en el TDLAS que el nivel de señal (LVL) se encuentre entre 30–80 % para su mejor operación, idealmente cercano a 65 %.
3. Para medir con la celda de carga, lo primero es abrir el software de la máquina virtual con Windows (Oracle VM Virtualbox) y hacer *click* en Iniciar. Luego, entrar con el usuario “equipo soporte”. En el escritorio se encuentra un programa llamado “SartoCollect 1.0”, abrir dicho programa. Se abrirá una ventana con nombre

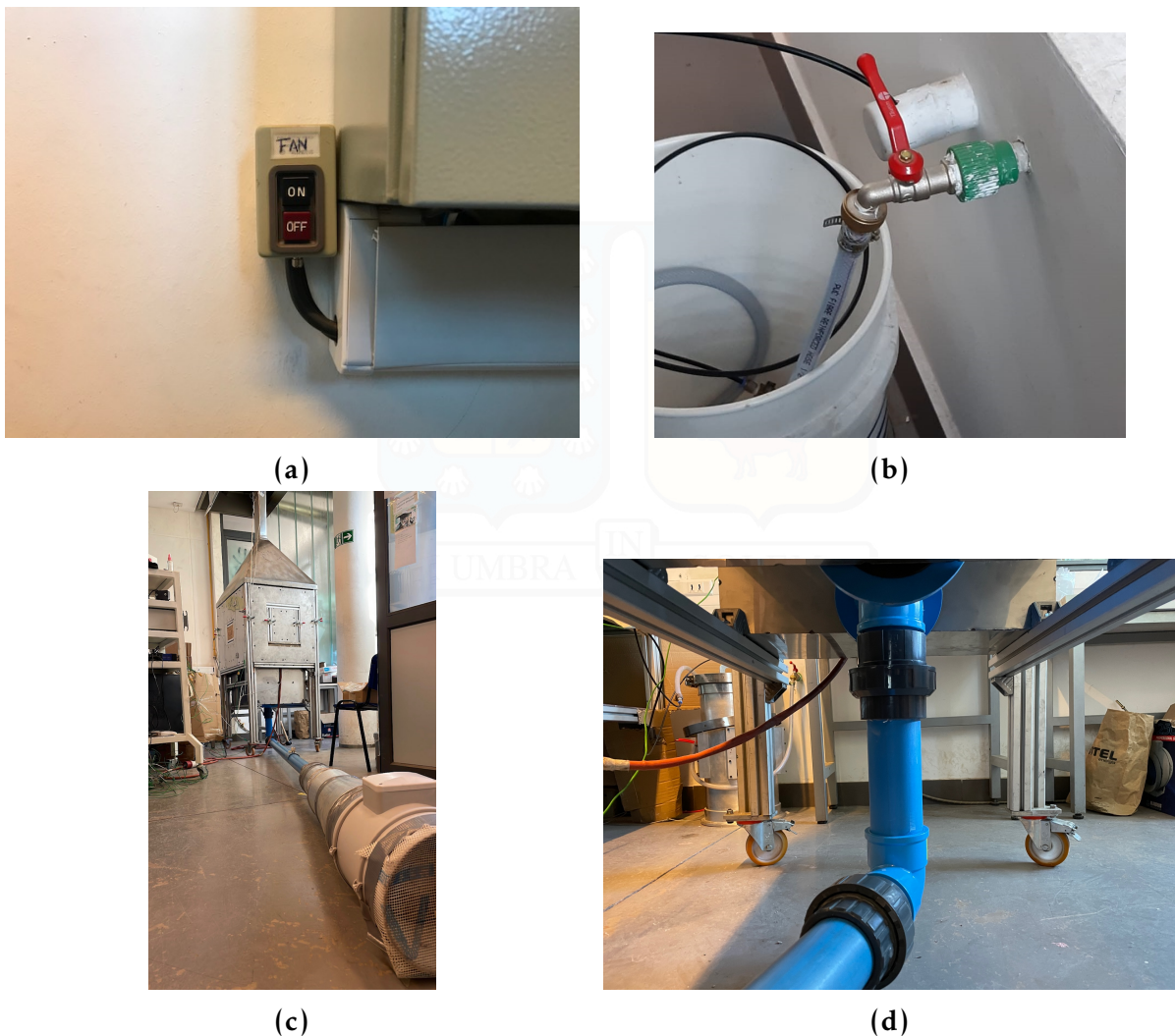


Figura 2: Conexiones y encendido de diversos componentes del SCALA. (a) es el botón de encendido del extractor de aire, que se encuentra a un costado del panel eléctrico interno, (b) es la llave a abrir para el paso de agua hacia el radiómetro, (c) es la instalación del ventilador al calorímetro y (d) es el codo de conexión del ventilador al calorímetro.

“Registrar SartoCollect”, hacer click en “Trial” y el programa abrirá una nueva ventana y en ésta seleccionar “Celda UAI”, hacerle doble click. Se abrirá una nueva ventana para controlar la celda de carga. Los pasos son los siguientes.

- (a) Click en “Monitor” y luego click en “Celda de carga UAI”.
- (b) Luego en Celda de Carga UAI, click en “Get Weight” y el programa debería mostrar los valores de la masa.
- (c) El siguiente paso consiste en parar las mediciones (“Stop weight”) y luego click en “Tare” para tarar la celda de carga y luego nuevamente click en “Get Weight” para registrar la masa.
- (d) Para exportar los datos hay que copiarlos y pegarlos en un archivo de texto

(se recomienda utilizar el software NotePad++).

Paso 3: Encender los paneles radiantes

1. Lo primero consiste en conectar los cables del calorímetro a la corriente, como se presenta en la [Figura 3a](#). Cada cable debe ir en su respectivo puerto de conexión. Notar que cada uno de los cables y puertos de conexión se encuentran marcados con su respectiva letra (como se puede apreciar en la [Figura 3b](#). Además, notar que la conexión R es para el panel izquierdo, mientras que la conexión S es para el panel derecho.
2. Abrir el panel eléctrico exterior (fuera del laboratorio de combustión, ver [Figura 4a](#)) y levantar 4 automáticos ubicados en la última fila del mismo (ver [Figura 4b](#)). Corresponden a los automáticos 13 (son 4 ahí). Se encuentran marcados como automáticos para el panel R y para el panel S.
3. Luego, abrir el panel eléctrico interior (dentro del laboratorio de combustión), y encendedor (subir) solo los tres primeros automáticos ubicados de izquierda a derecha.
4. Para modificar el voltaje proporcionado a los paneles, se debe ir variando de a poco los porcentajes de voltaje entregado a los paneles. Partir de 5 en 5, y dejar unos minutos para visualizar el estado estacionario en el software SCALA measurement project.

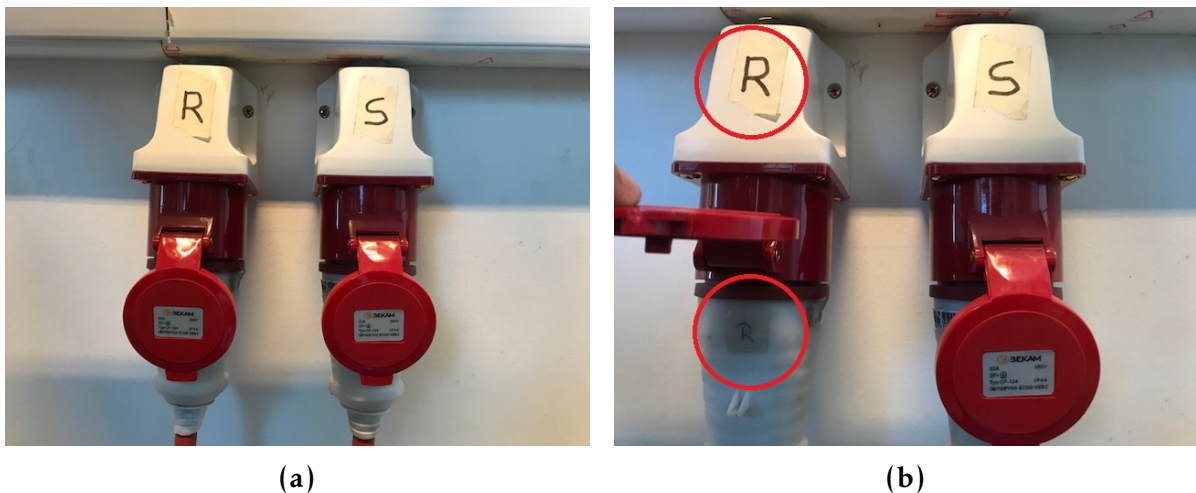
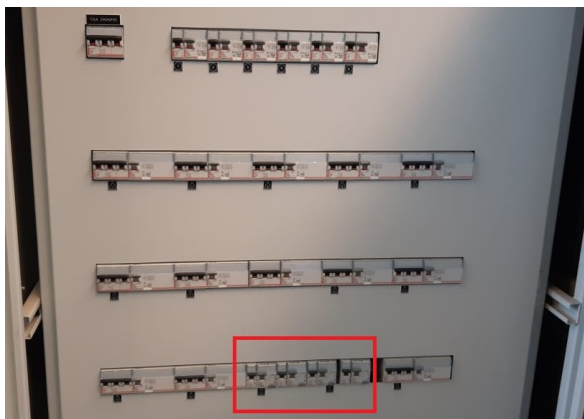
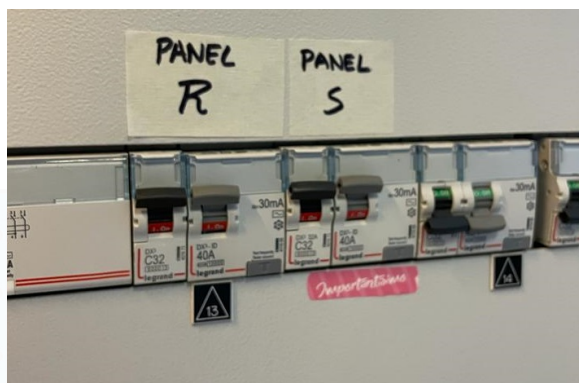


Figura 3: Conexión del calorímetro a los terminales de corriente. En (a) se muestran las conexiones R y S, mientras que en (b) se presenta una marca en el cable R conectado a su respectivo terminal.



(a) Panel exterior.



(b) Automáticos a levantar.

Figura 4: (a) Panel eléctrico exterior y (b) los automáticos que se deben levantar, ubicados en la última fila del panel exterior.

Paso 4: Esperar el estado estacionario

Esperar un tiempo prudente (aproximadamente 1 hora), hasta que el sistema alcance el estado estacionario. Esto ocurre cuando no hay mayores o relevantes variaciones de temperatura a la salida del calorímetro (visualizar en el software SCALA measurement project).

3.2. Determinación de la HRR por el método SER

La determinación de la HRR por el método del aumento en la entalpía sensible (SER) se determina a partir de la ecuación (7). Recordando, ésta se calcula como:

$$\dot{q}_{\text{SER}}(t) = K_{\text{SER}}(T_e(t) - T_a)$$

Por tanto, el primer paso consiste en determinar la constante de calibración para el método SER (K_{SER}). El detalle paso a paso de su cálculo experimental se presenta en el [Anexo B](#). Por tanto, las únicas variables (luego de determinar la constante de calibración) son los valores de las temperaturas $T_e(t)$ y T_a . Una vez que se está midiendo y el sistema se encuentra en estado estacionario, T_a se calcula como un promedio de éstas temperaturas en estado estacionario, y $T_e(t)$ es variable para cada intervalo de tiempo durante el proceso de la combustión.

Por ejemplo, supongamos que el sistema se encuentra encendido durante 30 minutos y nos damos cuenta que unos 10 minutos antes (minuto 20) el sistema ya se encuentra en estado estacionario (no hay variaciones en las temperaturas medidas por las termocuplas posicionadas a la salida del aparato). Se recomienda que se promedien todos los valores de temperatura cada un segundo durante los minutos 25 y 30 (recordar que el programa CATMAN entrega valores de temperatura cada 0,5 s), es decir, se tendrán al rededor de 600 valores de temperatura. Este promedio corresponde a T_a . Luego de los 30 minutos,

se abre la puerta del calorímetro y se coloca la muestra a estudiar y se van registrando los valores de la temperatura en el tiempo. Estos valores de temperatura corresponden a T_e , y por tanto es más correcto establecerlo como $T_e(t)$. El valor de T_a es fijo, mientras que $T_e(t)$ varía conforme avanza el tiempo. De esta forma, ya se puede determinar $\dot{q}_{SER}(t)$.

3.3. Determinación de la HRR por el método OC

Para determinar la tasa de liberación de calor por medio del método del consumo de oxígeno calorimétrico (OC), se utiliza la ecuación (10). Recordando, ésta se calcula como:

$$\dot{q}_{OC}(t) = K_{OC} \left(\frac{X_{O_2}^A(t) - X_{O_2}^o}{10^4 \cdot L} \right)$$

Así, el primer paso consiste en determinar la constante de calibración K_{OC} . El detalle paso a paso de su cálculo experimental se presenta en el [Anexo C](#). El valor de L corresponde a la distancia del camino óptico recorrido por el láser del TDLAS entre la salida del láser y el fotodiodo que recibe la señal, la cual es constante. El valor de 10^4 es un factor para convertir el paréntesis a % de oxígeno (% O_2).

Experimentalmente, el valor de $X_{O_2}^A$ es en realidad $X_{O_2}^A(t)$, i.e. varía conforme ocurre la combustión, mientras que $X_{O_2}^o$ es en realidad $\overline{X_{O_2}^o}$, i.e. es un promedio de las concentraciones de oxígeno previo al ensayo en estado estacionario (y es fijo). Por tanto, sólo conociendo éstos valores es posible determinar la tasa de liberación de calor por el método del consumo de oxígeno calorimétrico. El ejemplo que se utilizó en la [Sección 3.2](#) es replicable para este caso, sólo se debe “reemplazar” el término temperatura de los gases a la salida por concentración de oxígeno. Es decir, durante el estado estacionario entre los 25 y 30 minutos se debe calcular un promedio de las concentraciones de O_2 que daría como resultado el valor de $\overline{X_{O_2}^o}$, y durante el ensayo (una vez situada la muestra en la cámara de combustión) se comenzaría a medir $X_{O_2}^A(t)$.

3.4. Determinación de la HRR por el método MLR

Para determinar la tasa de liberación de calor por medio del método de la pérdida de masa, se utiliza la ecuación (11). Recordando, ésta se calcula como:

$$\dot{q}_{MLR} = \chi \dot{m} \Delta h_c$$

Existen dos posibilidades, se puede determinar la eficiencia de la combustión χ como 1, i.e. asumir combustión completa, o bien se puede utilizar la ecuación (15), pero requiere de un mayor análisis ya que se necesitaría el calor de combustión neto del combustible a estudiar y su contenido de humedad.

Por otra parte, el calor de combustión presente en la ecuación (11) hace referencia al valor neto (Δh_c), no obstante, cómo se mencionó en la Sección 2.3.1, es más ad hoc utilizar el calor de combustión efectivo ($\Delta h_{c,eff}$), el cual se puede determinar a partir de $\dot{q}_{SER}$ o $\dot{q}_{OC}$, como se especifica en las expresiones (12), (13) y (14). El valor de $\dot{m}$ se determina a partir de los registros de la celda de carga, que corresponde a la masa medida en el mismo intervalo de tiempo que el resultado de la $HRR(t)$ ya sea por el método SER u OC.

4. Peligros

Lo primero consiste en comprender que se está trabajando con altas potencias y temperaturas. Por ejemplo, para un valor de $\dot{q}_{inc}'' = 50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, la potencia total requerida por los calefactores es cercana a los 10.000 W. De esta forma, los peligros se pueden caracterizar en eléctricos y de calor.

4.1. Peligros eléctricos

Los cables conectores que proporcionan energía a las resistencias de carbono de silicio en los paneles radiantes tienden a desgastarse con el paso del tiempo por tanto las altas potencias así como la exposición al calor dentro del calorímetro, y es común que éstos puedan “cortarse” durante algún experimento. Esto ha pasado antes con el calorímetro SCALA v1.0. De esta forma, es importante comprender que cuando algún problema eléctrico de este tipo u otro ocurren, lo primero es cortar el paso de la corriente en el panel eléctrico exterior, y luego en el panel eléctrico interior. Y luego evaluar la situación. Si se llega a producir un incendio, lo primero es evaluar si es factible apagarlo con el uso del extintor, en caso contrario se debe dar aviso inmediatamente a los guardias y alejarse del lugar.

Por otro lado, notar que en la calibración eléctrica, para medir el voltaje en el panel eléctrico interno se deben utilizar guantes para electricidad.

4.2. Peligros de exposición al calor

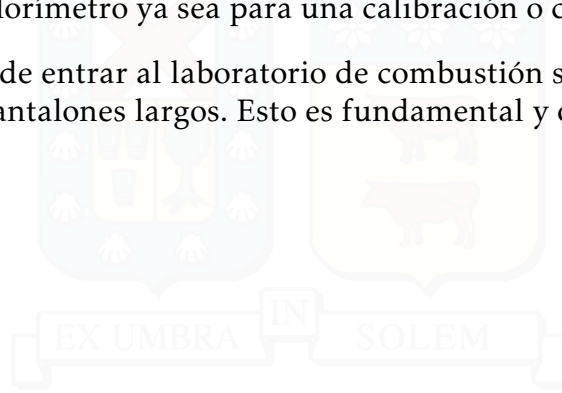
Es bastante común el tender a sub-valorar el riesgo intrínseco a quemaduras u otros a la exposición del calor, pero trabajar a flujos de calor elevados implica temperaturas del aire cercanas a los 200°C. De esta forma, las paredes, puertas, ventanas y perfiles del calorímetro se calientan sustancialmente. Cada vez una persona tenga que hacer una medición (colocar una muestra en el aparato o realizar una calibración), ésta debe contar con los siguientes equipos de protección personal.

1. Lentes de seguridad.
2. Guantes. Notar que hay distintos tipos de guantes. Por ejemplo, si se va a colocar una muestra o realizar alguna medición dentro del aparato resulta incómodo utilizar guantes para radiación (que reflejan gran parte de la radiación incidente), y por lo mismo se recomienda utilizar guantes delgados y encima otros más gruesos.

No obstante, es muy posible que no se pueda estar dentro del calorímetro por más de 5-10 segundos, porque comienza a sentirse el calor en la piel.

3. En lo posible, se recomienda utilizar bloqueador solar en la cara y brazos para la exposición a la radiación térmica.
4. Utilización de mangas aislantes. Se recomienda utilizarlas sobre la ropa y cada vez que se ingrese al calorímetro ya sea para una calibración o colocar una muestra.

Ninguna persona puede entrar al laboratorio de combustión si no se encuentra con zapatos cerrados y con pantalones largos. Esto es fundamental y obligatorio.



Referencias

- Agueda, A., Liidakis, S., Pastor, E., & Planas, E. (2009). Characterization of the thermal degradation and heat of combustion of pinus halepensis needles treated with ammonium-polyphosphate-based retardants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 98(1), 235–243.
- ASTM (2013). Standard test methods for measurement of material flammability using a Fire Propagation Apparatus (FPA). ASTM E2058-13a, ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Babrauskas, V. (1984). Development of the cone calorimeter—a bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption. *Fire and Materials*, 8(2), 81–95.
- Biteau, H., Steinhaus, T., Simeoni, A., Schemel, C., Marlair, G., Bal, N., & Torero, J. L. (2008). Calculation Methods for the Heat Release Rate of Materials of Unknown Composition. *Fire Safety Science*, 9, 1165–1176.
- Desbois, N., Deshayes, M., & Beaudoin, A. (1997). Protocol for fuel moisture content measurements. In E. Chuvieco (Ed.), *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires* (pp. 61–72). Alcalá de Henares, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá.
- Filipczak, R., Crowley, S., & Lyon, R. E. (2005). Heat release rate measurements of thin samples in the OSU apparatus and the cone calorimeter. *Fire Safety Journal*, 40(7), 628–645.
- Janssens, M. (1995). Methods and equations of fire calorimetry. In M. M. Hirschler & R. E. Lyon (Eds.), *Fire Calorimetry* (pp. 11–22). FAA Technical Center DOT/FAA/CT-95/46, US Department of Transportation.
- Jervis, F. X. & Rein, G. (2016). Experimental study on the burning behaviour of pinus halepensis needles using small-scale fire calorimetry of live, aged and dead samples. *Fire and Materials*, 40(3), 385–395.
- Madrigal, J., Guijarro, M., Hernando, C., Diez, C., & Marino, E. (2011). Effective heat of combustion for flaming combustion of mediterranean forest fuels. *Fire Technology*, 47(2), 461–474.
- Morandini, F., Perez-Ramirez, Y., Tihay, V., Santoni, P.-A., & Barboni, T. (2013). Radiant, convective and heat release characterization of vegetation fire. *International Journal of Thermal Sciences*, 70, 83–91.
- Smith, E. E. (1972). Measuring rate of heat, smoke and toxic gas release. *Fire Technology*, 8(3), 237–245.
- Volkwein, C. H. (2016). Calorimetric study of renewable fuels with the sensible heat calorimetry apparatus. Master's thesis, Universidad Técnica Federico Santa María – Departamento de Industrias.

- Yebra, M., Quan, X., Riaño, D., Larraondo, P. R., van Dijk, A. I., & Cary, G. J. (2018). A fuel moisture content and flammability monitoring methodology for continental australia based on optical remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 212, 260–272.
- Zahn, S. & Hensen, C. (2011). *A Synthesis of Fuel Moisture Collection Methods and Equipment – A Desk Guide*. Technical Report 5100–Fire Management 1151 1806–SDTDC, U.S. Department of Agriculture - Forest Service.



Anexo

A. Calibración eléctrica

El objetivo principal de la calibración eléctrica es encontrar los voltaje que se deben ajustar a cada panel para obtener un flujo de calor incidente ($\dot{q}_{inc}''$) deseado. Además, para cada medición, se deben registrar los valores del voltaje alterno que se encuentra alimentando a los paneles, la intensidad de la corriente y el voltaje registrado por el radiómetro. Los pasos para la calibración eléctrica son los siguientes.

1. Obtener el valor base del radiómetro (ver el Paso 2 de la [Sección 3](#)).
2. Encender los calefactores del calorímetro (ver la [Sección 3](#)).
3. Luego hay que ir variando los voltajes de tanto el panel R como el S. Nunca variar en más de 10. Si, por ejemplo, se busca el primer flujo de calor, que será de $\dot{q}_{inc}'' = 10 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, cada panel se debe ajustar en 5 y 5 e ir viendo el cómo evoluciona el radiómetro a partir de dichos cambios en el voltaje. Es por lo anterior que esta calibración toma tiempo, ya que se buscan los valores más cercanos a los flujos de calor deseado. Siguiendo el mismo ejemplo, si se requiere un valor de 20/20 en cada panel radiante, entonces eso se verá en la tercera u cuarta iteración, donde para cada una se esperó alrededor de 15 minutos para lograr estabilidad en las mediciones del radiómetro.
4. Cuando se logra el flujo de calor incidente deseado, se debe medir el voltaje (V) con el multímetro en el panel eléctrico interno. Para esto, se debe medir el voltaje alterno como se muestra en la [Figura A.1](#).

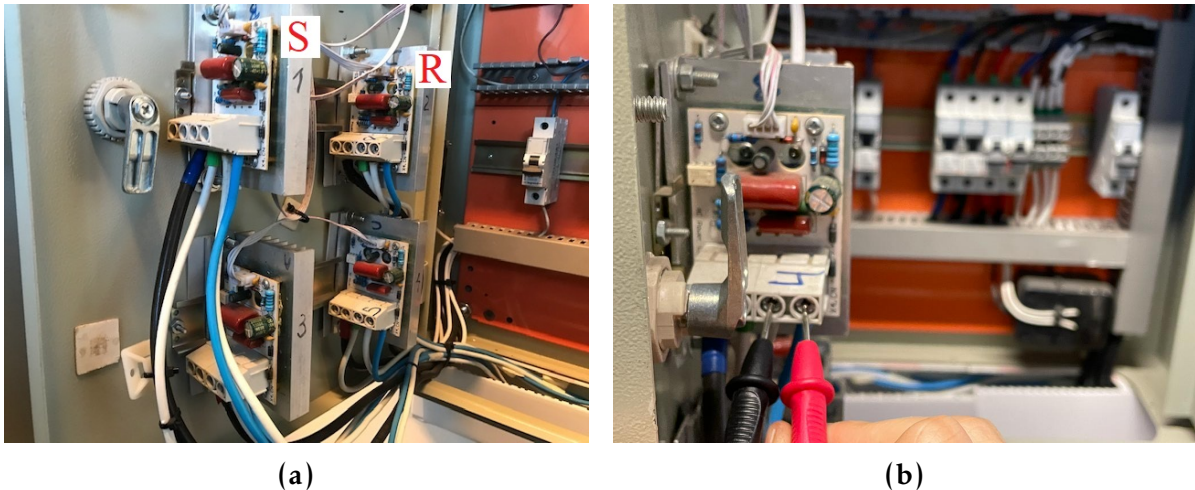


Figura A.1: (a) Disposición de los controladores de voltaje dentro del panel eléctrico interno y (b) medición del voltaje con el multímetro.

5. El siguiente paso consiste en medir la intensidad de la corriente (A) en los cables ubicados en la parte trasera de los calefactores. Para esto, al momento de medir, se deben extraer las ventanas que permiten el acceso a la parte trasera de los calefactores. Hay un total de tres cables, que corresponden a dos fases y la tierra. Se debe buscar medir la corriente en una de las fases. Sólo habrá un cable que proporcionará el valor de la corriente. Notar que para medir la intensidad de la corriente (A) se utiliza el multímetro de tenaza.
6. Luego de medir y registrar los valores de voltaje de los paneles, intensidad de la corriente y el voltaje registrado por el radiómetro, se suben los valores del porcentaje de voltaje que se busca medir y se repiten los pasos anteriores.

A.1. Ejemplo de calibración eléctrica

El día 19 de Julio de 2022 se realizó la primera calibración eléctrica al calorímetro. Los flujos de calor buscados fueron: $\dot{q}_{inc}'' \in \{10,15,20,25,30,35,40,45,50\}$ ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$). Los resultados de la calibración eléctrica se muestran en la [Figura A.2](#). En esta última figura, es posible destacar lo siguiente para cada una de ellas.

- En la [Figura A.2a](#) se encuentra la potencia total (que representa la suma de la potencia del panel R y S) para determinados valores de voltaje promedio de los calefactores.
- En la [Figura A.2b](#) se aprecia el flujo de calor incidente ($\dot{q}_{inc}''$) y la correspondiente potencia eléctrica requerida para que los paneles radiantes logren irradiar el calor necesario para lograr dichos flujos de calor medidos por el radiómetro. Notar que la curva tiende a una menor pendiente a medida que aumenta el flujo de calor, y por tanto cada vez se requiere más potencia para lograr mayores flujos de calor (lo que se hace más notorio luego de los 6000 W o 35 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$).
- En la [Figura A.2c](#) se puede observar el valor del voltaje porcentual promedio (entre ambos paneles) requeridos para determinado flujo de calor incidente. De esta forma, se aprecia un comportamiento exponencial en los datos. Así, a partir de ésta calibración es posible determinar un valor aproximado para el voltaje promedio (porcentual), de ambos paneles R y S, a partir de un flujo de calor incidente. Es decir, si se busca un valor x de flujo de calor incidente, el voltaje aproximado para cada calefactor ($\overline{V}_{\%}$), se puede calcular como:

$$\overline{V}_{\%} = 6,255 \cdot \exp(0,0258 \cdot \dot{q}_{inc}'')$$

- Finalmente, en la [Figura A.2d](#) se muestra las diferencias de las temperaturas de ambos paneles (medidas con las termocuplas que se encuentran a una distancia aproximada de 7 mm de las resistencias centrales de cada calefactor) y el correspondiente voltaje. Así, para un voltaje porcentual, mayores temperaturas se registraron para el panel derecho (S) que para el izquierdo (R). Sin embargo, notar que para todos los flujos de calor se calculó la diferencia de las temperaturas entre el panel

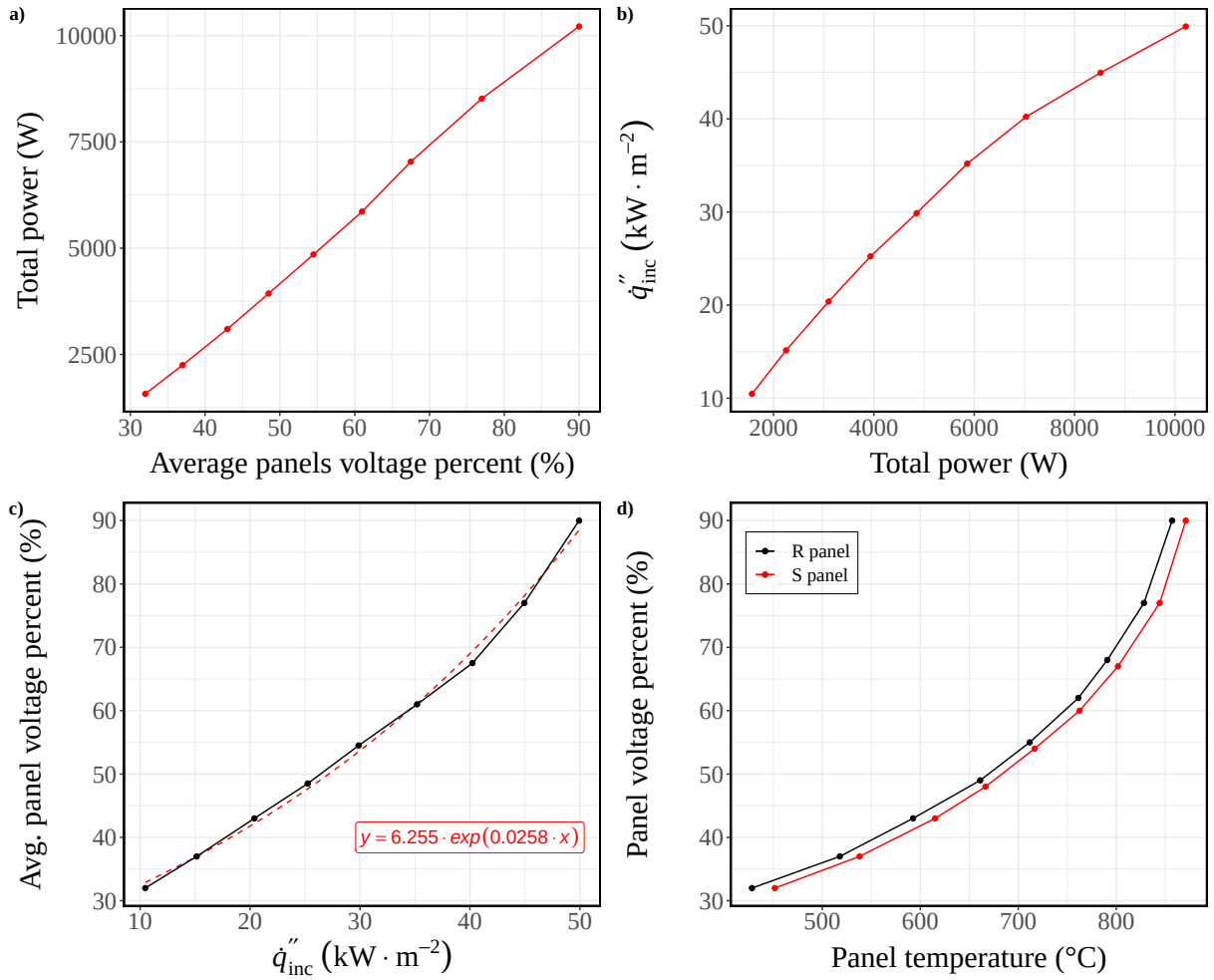


Figura A.2: Resultados de la calibración eléctrica realizada el día 19 de Julio de 2022. (a) Variación de la potencia total a partir del promedio del voltaje porcentual fijado en el controlador de voltaje, (b) relación entre el flujo de calor incidente ($\dot{q}_{inc}''$) y la potencia total, (c) relación entre el flujo de calor incidente y el voltaje porcentual promedio fijado a cada panel con un modelo para explicar ésta última a partir del flujo de calor incidente, y (d) temperaturas de los paneles radiantes para los distintos valores de voltaje porcentual impuesto tanto al panel R como S.

derecho e izquierdo, cuya diferencia fue, en promedio, de $T_{dif} = 13,21 \pm 8,08^{\circ}\text{C}$. La mayor diferencia se encontró a los $45 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, y fue de $16,10^{\circ}\text{C}$. No obstante, notar que en algunos casos, con el objeto de lograr valores de temperaturas más cercanos entre los paneles (y así tratar de obtener una distribución un tanto más homogénea en el flujo de calor que incide sobre la muestra) se subió algunos voltajes porcentuales (en particular para el panel R), ahora bien estas diferencias nunca superaron 2% entre los paneles.

B. Calibración método SER

Existen dos calibraciones, una diaria y otra semanal. Se recomienda que previo a un experimento se calibre la “diaria”. Para calibrar se requiere el uso de un gas cuyas propiedades son conocidas. Sin embargo, en el laboratorio solo se cuenta con gas licuado de petróleo (LPG). Como en Chile no existe una legislación clara de los compuestos presentes en el LPG, se asume un escenario pesimista para la obtención de las propiedades. Este supuesto se basa en que el 70 % del gas corresponde a propano, mientras que el 30 % a butano. El calor de combustión del propano equivale a $\Delta h_{c,prop} = 50.329 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que el del butano equivale a $\Delta h_{c,but} = 49.501 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.¹ La calibración consiste en calcular la constante K_{SER} a partir de flujos conocidos de gas quemándose al interior del calorímetro, donde, al mismo tiempo, se conoce el calor de combustión de la mezcla así como la temperatura medida a la salida del calorímetro. Para controlar el flujo de gas se utiliza un controlador de masa, marca Aalborg modelo GFC-37, que se controla por medio del dispositivo Aalborg TIO-LAA5 (desde el computador). De esta forma, el primer paso consiste en conectar el balón de gas a la línea de control. Además, se debe enchufar el controlador de masa, y conectar vía USB el totalizador TIO-LAA5 al PC. A continuación se explican tanto la calibración diaria como la semanal. Notar que el programa del Totalizador en el PC del laboratorio se llama “TIO Communication Utility”.

B.1. Calibración diaria (SER)

En este procedimiento de calibración no hay un flujo de calor incidente, $\dot{q}_{inc}''$, i.e. los paneles se encuentran **apagados**. Se utilizan tres flujos de gas: alto, bajo y base. El flujo de gas debería variar continuamente desde el valor base por 90 s, aumentar al flujo bajo por 150 s, luego volver al flujo base por 90 s y aumentar al flujo alto por 150. Este procedimiento debiese repetirse hasta que las temperaturas del aparato alcancen el estado estacionario, donde no se aprecien variaciones de temperatura en las termocuplas para cada flujo de gas, i.e. comparar las temperaturas de las termocuplas durante la última y desde la segunda a la última de cada flujo. La diferencia entre el flujo alto y bajo es multiplicado por el calor de combustión neto del gas licuado de petróleo, y así es posible obtener la tasa de liberación de calor para ese gas con esos flujos máscicos. Luego, la constante de calibración diaria ($K_{SER,D}$ en $\text{kW}\cdot\text{°C}^{-1}$) se puede determinar experimentalmente a partir de la siguiente expresión.

$$K_{SER,D} = \frac{(\dot{m}_{high} - \dot{m}_{low})\Delta h_c}{T_{high}^{ss} - T_{low}^{ss}} \quad (18)$$

donde $\dot{m}_{high}$ y $\dot{m}_{low}$ son los flujos máscicos de gas licuado de petróleo alto y bajo ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), respectivamente, Δh_c es el calor de combustión del gas licuado de petróleo

¹ Fuente: https://www.engineeringtoolbox.com/standard-heat-of-combustion-energy-content-d_1987.html

Tabla B.1: Valores para el cálculo de la constante de calibración.

Escenario	% Propano	% Butano	$\Delta h_{c,LPG}$ (kJ·kg ⁻¹)	ρ_{LPG} (kg·m ⁻³)	C.F.
Pesimista	70	30	45.824,6	2,0641	0,3172

(en kJ·kg⁻¹), T_{high}^{ss} y T_{low}^{ss} son las temperaturas en estado estacionario medidas por las termocuplas a la salida del calorímetro (K) del flujo másico alto y base, respectivamente, en °C.

B.1.1. Ejemplo calibración diaria (SER)

Como se calibrará con gas licuado de petróleo (LPG), el primer paso consiste en definir un escenario para cuantificar las cantidades de propano y butano en la mezcla. En este caso se procede a utilizar un escenario pesimista, que se compone de un 70 % de propano y 30 % de butano, como se mencionó anteriormente. Los resultados se pueden apreciar en la [Tabla B.1](#).

En la [Tabla B.1](#), se realizó un promedio ponderado para el calor de combustión (Δh_c) de tanto el propano como el butano con respecto a los porcentajes de cada uno en la mezcla, lo mismo con la densidad (ρ). El término C.F. corresponde al valor del factor de corrección de la cantidad de gas que pasa realmente por el controlador de masa. En este caso se trabajó con el flujómetro Brooks SLA 5850 S1 en base a gas nitrógeno, y según el fabricante el factor de conversión para propano y butano (ponderado en escenario pesimista) es 0,3172. Por ejemplo, si el controlador se ajustó en 1 L·min⁻¹, implica que realmente están pasando $\dot{m}_{LPG} = 1 \cdot 0,3172 = 0,3172$ L·min⁻¹ de LPG por el controlador de masa.

Notar que se requieren **al menos dos personas** (persona 1, P1, y persona 2, P2) para esta calibración. P1 debe estar encargada de observar los valores en el controlador de masa, la presión de la línea de gas, estar atenta para cerrar el paso de gas en caso de que se requiera, y modificar los valores del flujo másico de LPG en el programa del totalizador (TIO Communication Utility). Por otro lado, P2 es la encargada de prender el mechero ubicado dentro del calorímetro, estar pendiente de los tiempos de los flujos másicos de LPG (para dar aviso a P1), y anotar los valores de las temperaturas (para el caso de la calibración diaria).

Experimentalmente, el proceso consiste en lo siguiente.

1. Colocar un flujo másico de 2 L·min⁻¹ en el controlador de masa (en el PC). Asegurarse que el totalizador está marcando dicho valor (P1).
2. Abrir el paso de gas (P1).
3. A penas el controlador de masa esté marcando un flujo másico mayor a 1 L·min⁻¹, P1 debe dar aviso a P2 para que ésta última prenda el mechero dentro del calorímetro.

4. Una vez que el mechero se encienda, bajar el flujo másico a $0,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, que corresponde al flujo másico base para la calibración diaria ($\dot{m}_{base}$).
5. Transcurridos 90 s desde que el mechero se encontraba a $0,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, P2 debe dar aviso a P1 para que suba el valor del controlador de masa a $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ por 150 s, que corresponde al flujo bajo ($\dot{m}_{low}$).
6. Luego de los 150 s, P2 da aviso a P1 para volver al flujo base por 90 s.
7. Transcurridos los 90 s, P2 da aviso a P1 para colocar el flujo alto ($\dot{m}_{high} = 5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) por 150 s.
8. Luego de los 150 s, se vuelve al flujo base y el procedimiento anterior se repite 3 veces. Es decir, flujo base, flujo bajo, flujo base, flujo alto (x3).

En la [Tabla B.2](#) se muestran los resultados de una calibración diaria.

Tabla B.2: Iteración para calibración diaria. Notar que los valores de $\dot{m}$ son los que se colocan directamente al programa del totalizador, y no son los valores *reales* del flujo másico de LPG.

Iteración	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\dot{m} (\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	0,2	1,0	0,2	5,0	0,2	1,0	0,2	5,0	0,2	1,0	0,2	5,0
t (s)	90	150	90	150	90	150	90	150	90	150	90	150
T (°C)		30		74		36.11		88.63		37.9		85.98

Al utilizar la ecuación (18) los flujos másicos son $\dot{m}_{high} = 5,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ y $\dot{m}_{low} = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (notar que el flujo base de $\dot{m}_{base} = 0,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ es un valor que *no* se utiliza en el cálculo de la constante pero que si está presente en la obtención de la misma). Las temperaturas T_{high}^{ss} y T_{low}^{ss} corresponden a las temperaturas del flujo másico alto y bajo, respectivamente, al final de la experiencia de calibración. Es importante destacar que las temperaturas sólo se registran para los flujos másicos altos y bajos, i.e. para las iteraciones 2, 4, 6, 8, 10 y 12 en la [Tabla B.2](#). Cada valor de temperatura en dicho caso se obtiene como un promedio de las temperaturas de los últimos 10 segundos antes de cambiar el flujo másico. Los valores de T_{high}^{ss} y T_{low}^{ss} corresponden a los resultados promedios de temperatura en la iteración 12 y 10, respectivamente, de la [Tabla B.1](#), suponiendo que más allá de esos valores no se aprecian cambios sustanciales en la temperatura al ir variando los flujos (comparando temperaturas al mismo flujo másico en la iteración anterior, e.g. la iteración 12 con la 8, que tienen una diferencia porcentual de 3%). Además, notar que el valor de cada temperatura se obtiene al promediar las temperaturas registradas por las tres termocuplas a la salida (chimenea) del calorímetro.

De esta forma, ya es posible aplicar la ecuación (18) para obtener la constante. No obstante, el resultado de ésta debe ser en $\text{kW}\cdot\text{°C}^{-1}$, y por tanto se debe realizar el siguiente análisis dimensional.

$$K_{SER,D} = \frac{\text{L}\cdot\text{min}^{-1} \cdot \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}}{\text{°C}} \cdot \frac{0,001 \text{ m}^3}{1 \text{ L}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot 2,0614 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 0,3172 = \frac{\text{kW}}{\text{°C}} \quad (19)$$

Donde 0,001 es el valor para convertir litros a metros cúbicos, 2,0614 es la densidad del LPG en el escenario pesimista (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) y 0,3172 es el factor de corrección del flujo másico para pasar de aire a LPG (lo que realmente pasa a través del controlador de masa). Finalmente, si se reemplazan los valores se obtiene que $K_{\text{SER,D}} = 0,0416 \text{ kW}\cdot\text{C}^{-1}$. Luego, se puede analizar el valor experimental (con la constante de calibración) versus el valor teórico (a partir del calor de combustión y flujos másicos de LPG) utilizando las siguientes expresiones.

La forma gráfica de estudiar la constante es a partir de los valores de la tasa de liberación de calor (HRR), donde:

$$\text{HRR}_{\text{SER,D}} = K_{\text{SER,D}}(T_{\text{high}}^{\text{ss}} - T_{\text{low}}^{\text{ss}}) = (\dot{m}_{\text{high}} - \dot{m}_{\text{low}})\Delta h_{\text{c,LPG}} \quad (20)$$

de donde,

$$\text{HRR}_{\text{SER,D-exp}} = K_{\text{SER,D}}(T_{\text{high}}^{\text{ss}} - T_{\text{low}}^{\text{ss}}) \quad (21)$$

$$\text{HRR}_{\text{SER,D-teo}} = \Delta h_{\text{c,LPG}}(\dot{m}_{\text{high}} - \dot{m}_{\text{low}}) \quad (22)$$

Es decir, la HRR se puede determinar a partir de la experimentación ($\text{HRR}_{\text{SER,D-exp}}$) con la constante (y con las diferencias de temperatura antes y durante la combustión), o bien de forma teórica ($\text{HRR}_{\text{SER,D-teo}}$) con los flujos másicos y el calor de combustión (que en este caso es el calor de combustión neto de LPG en el escenario pesimista).

B.2. Calibración semanal (SER)

Al igual que en el caso de la calibración diaria, en la calibración semanal también se utiliza gas licuado de petróleo (LPG) para la calibración. Sin embargo, ahora los paneles radiantes del calorímetro se deben encender y ajustar a un flujo de calor incidente de $\dot{q}_{\text{inc}}'' = 20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Los pasos son los siguientes.

1. Conectar el ventilador al calorímetro, encenderlo y, a su vez, encender el extractor de aire.
2. Colocar el radiómetro dentro del calorímetro. Éste debe quedar dentro al menos 40 minutos para registrar el valor base (en mV), que se debe registrar. Por ejemplo, para la calibración del día 19 de Julio 2022, el valor base fue de -0.408 mV. Notar que el radiómetro debe estar conectado a la toma de agua.
3. Transcurridos los 40 minutos y haber registrado el valor base del radiómetro, prender los paneles en 5 y 5 para R y S. Luego de alcanzar un semi estado estacionario, subirlo a 10-10. Y así sucesivamente hasta lograr el estado estacionario. Para lograr $\dot{q}_{\text{inc}}'' = 20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ se requirió que los paneles R y S estuvieran con un voltaje porcentual de 43/43.

4. Cuando se logre el flujo de calor deseado, sacar el radiómetro y poner la ventana fija. Colocar el mechero en el centro del calorímetro y repetir el procedimiento de encendido del mechero como se estableció en la calibración diaria.
5. La diferencia con la calibración diaria es, entonces, que ahora existirán mayores temperaturas de salida producto de los paneles radiantes y, además, se utilizan distintos flujos máscicos de LPG.
6. En este procedimiento de calibración hay solo un flujo base de $\dot{m}_{base} = 1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ y un $\dot{m}_{high}$ que varía.

El primer paso consiste en encender los paneles (R y S) y esperar hasta que el aparato alcance el estado estacionario en el flujo de calor mencionado anteriormente. Luego se regula el controlador de masa para un flujo máscico de LPG de $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,² y luego se prende el mechero. El valor de $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ corresponde al valor base i.e. $\dot{m}_{base} = 1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Luego, el flujo de LPG se aumenta a mayores valores volviendo, cada 2 minutos, al valor base. La tasa de liberación de calor efectiva es la HRR calculada con el valor base como referencia. Es decir, cada vez que se aumente el flujo máscico de LPG se obtendrá una nueva HRR, a la cual se le resta el HRR base para obtener el valor efectivo. Esto se hace para un total de 5 flujos, donde se puede determinar la constante de calibración semanal por el método SER a partir de la siguiente expresión.

$$\text{HRR}_i = (\dot{m}_{high,i} - \dot{m}_{base}) \Delta h_c = K_{\text{SER},i} (T_{high,i}^{ss} - T_{base,i}^{ss}) \quad i \in \{1,2,3,4,5\} \quad (23)$$

De esta forma, se determina un valor promedio de la constante de calibración a partir de la siguiente expresión.

$$K_{\text{SER},W} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 K_{\text{SER},i} \quad (24)$$

B.2.1. Ejemplo de calibración semanal (SER)

Como se calibrará con gas licuado de petróleo (LPG), se utilizan las mismas configuraciones que al calibrar diariamente i.e. se replican los valores establecidos en la [Tabla B.1](#), es decir, se considera un escenario pesimista. Sin embargo, la diferencia con el método de calibración diaria, es que en éste método se encienden los calefactores del calorímetro al punto que entreguen un flujo de calor incidente igual a $\dot{q}_{inc}'' = 20 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Una vez que se llega a estado estacionario (en el radiómetro) comienza la experiencia.

Experimentalmente, el proceso consiste en lo siguiente. Primero, se prende el mechero (que como se dijo anteriormente se enciende a un valor de $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) a un flujo máscico de LPG de $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (que corresponde al flujo máscico base, $\dot{m}_{low}$). Luego de 120 segundos, el flujo máscico de LPG se aumentó a $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, luego de 120 s se volvió a $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ y luego se aumentó a $8,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ por 120 s. Posteriormente, se bajó el flujo a 1

² Nota: prender el mechero en $2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ primeramente y luego bajarlo a $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.

$\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ por 120 s y se aumentó nuevamente a $8,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ por 120 s. Posteriormente, se volvió a $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ por 120 s para subirlo a $6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ por 120 s. Finalmente, se volvió a $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ por 120 s y se aumentó a $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ por 120 s. Todo el procedimiento anterior corresponde a una experiencia. A modo de ejemplo, los resultados de la calibración semanal llevada a cabo el día 19 de Julio de 2022 se presenta en la [Tabla B.3](#).

Tabla B.3: Resultados experimentales para la primera experiencia de calibración semanal.

Iteración	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\dot{m}_{base} (\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	1		1		1		1		1	
$\dot{m}_{high} (\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$		4		8,5		8,5		6		4
$t \text{ (s)}$	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
$T_{base}^{ss} (^\circ\text{C})$	144,85		149,12		155,61		160,07		160,626	
$T_{high}^{ss} (^\circ\text{C})$		175,28		226,57		231,78		209,01		187,32
$K_{SER,W_i} (\text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	0,0477		0,0487		0,0496		0,0517		0,0551	

Cada valor de temperatura de $T_{base}^{ss} (^\circ\text{C})$ y $T_{high}^{ss} (^\circ\text{C})$ se obtuvo como un promedio de al menos 70 mediciones “centrales” del rango de temperaturas en cada iteración. El software CATMAN entrega valores de temperatura cada 0,5 s, y por tanto en cada iteración hay 240 valores de temperaturas registradas por las termocuplas a la salida del calorímetro. Los valores centrales, e.g. entre 85 y 155 s, se utilizaron para obtener las temperaturas de cada termocupla a la salida del calorímetro, cuyos valores promedios son los presentes en la [Tabla B.3](#). Con estos resultados ya es posible determinar la constante en cada intervalo. Se define un intervalo como dos iteraciones consecutivas, i.e. 1 y 2, 3 y 4, 5 y 6, y así sucesivamente. En cada intervalo se aplica la ecuación (23), donde el valor de $\dot{m}_i$ corresponde a los valores de los flujos másicos altos en cada intervalo, e.g. para el intervalo 1 el valor de $\dot{m}_{high}$ es $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, y el del flujo base es siempre el de $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (notar que en la tabla se presentan los valores en $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, que se deben convertir a $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ y, además, aplicar el factor de corrección para el controlador de masa). En el primer intervalo, $T_{base}^{ss} = 144,85 (^\circ\text{C})$ y $T_{high}^{ss} = 175,28 (^\circ\text{C})$, y, por tanto, el valor de la constante $K_{SER,W} = 0,0477 \text{ kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$, como se muestra en la [Tabla B.3](#). Finalmente, utilizando la expresión (24), se obtiene que la constante de calibración es $K_{SER,W} = 0,0505 \text{ kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$. Notar que la desviación estándar de todas las constantes obtenidas para cada uno de los cinco escenarios fue de 5,8 %, y que nunca debería ser mayor al 10 %.

Los resultados de la HRR se dividen en dos casos: el escenario de la HRR calculada a partir del producto entre la constante de calibración obtenida con anterioridad y la diferencia de temperaturas ($\text{HRR}_{\text{exp}} = K_{SER}\cdot\Delta T$), i.e. la HRR experimental, y el escenario de la HRR teórica a partir del producto entre la variación en el flujo másico y el calor de combustión del gas licuado de petróleo ($\text{HRR}_{\text{teo}} = \Delta\dot{m}\cdot\Delta h_{c,\text{LPG}}$). Así, si se utiliza la ecuación (23), se puede determinar la curva para la HRR teórica y la experimental, que se muestra en la [Figura B.1](#).

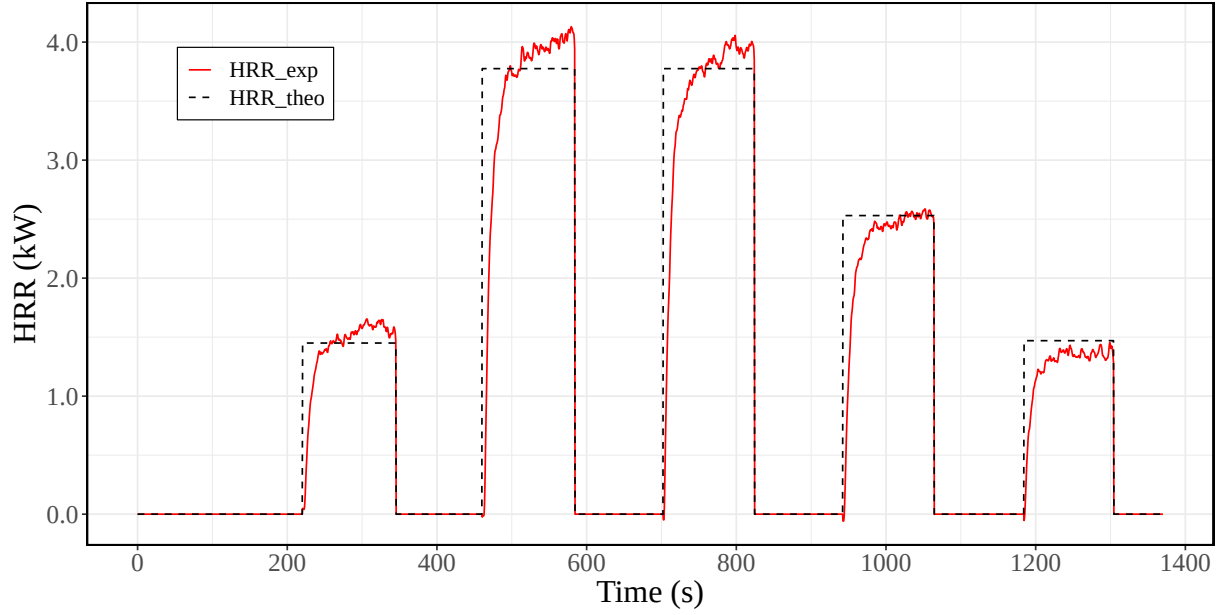


Figura B.1: Resultados de la HRR en la calibración semanal del 19 de Julio de 2022.

C. Calibración por el método OC

La calibración por medio del método del consumo de oxígeno calorimétrico (OC), al igual que en el caso de la calibración por medio del método SER, también es diaria y semanal a partir del empleo de gas licuado de petróleo, cuyo flujo másico se determina con el flujómetro mencionado anteriormente.

C.1. Calibración diaria (OC)

La metodología de calibración diaria es bastante similar a la de la calibración diaria por el método SER. Las concentraciones de oxígeno no debiesen tener variaciones entre los valores mínimos (base) de la HRR. Por medio del método de consumo de oxígeno no hay disminuciones en la concentración de oxígeno a un valor constante de la HRR. El mismo intervalo empleado para la calibración por el método SER debe ser utilizado (ojalá que se hagan simultáneamente). Luego, la constante de calibración por el método OC diaria equivale a:

$$K_{OC,D} = \frac{(\dot{m}_{high} - \dot{m}_{base})\Delta h_c}{C_{high} - C_{base}} \quad (25)$$

donde C_{high} y C_{base} son las concentraciones de oxígeno en porcentaje de los flujos másicos alto y base de LPG, respectivamente. Cabe destacar que la concentración en porcentaje se puede expresar en términos de PPMM a partir de la siguiente expresión.

$$C = X_{PPMM} \cdot 10^{-4} \cdot L^{-1} \quad (26)$$

donde L es el camino óptico que recorre el láser del TDLAS hasta el sensor o fotodiodo que recibe la señal del láser (m), y X_{PPMM} es la concentración de oxígeno en PPMM (tal cual como la entrega el TDLAS en el programa).

C.2. Calibración semanal (OC)

Esta calibración también es similar a la calibración semanal por medio del método SER. Es decir, se ajustan los paneles radiantes a un flujo de calor de $\dot{q}_{inc}'' = 20 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ hasta lograr el estado estacionario. Luego, la constante de calibración por el método OC se determina a partir de la siguiente expresión.

$$(\dot{m}_{high,i} - \dot{m}_{base})\Delta h_c = K_{OC,i}(C_{high,i} - C_{base}) \quad i \in 1,2,3,4,5 \quad (27)$$

$$K_{OC,w} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 K_{OC,i} \quad (28)$$

donde $\dot{m}_{high,i}$ y $C_{high,i}$ corresponden a los flujo máscicos altos y a las concentraciones de oxígeno en cada escenario i .

