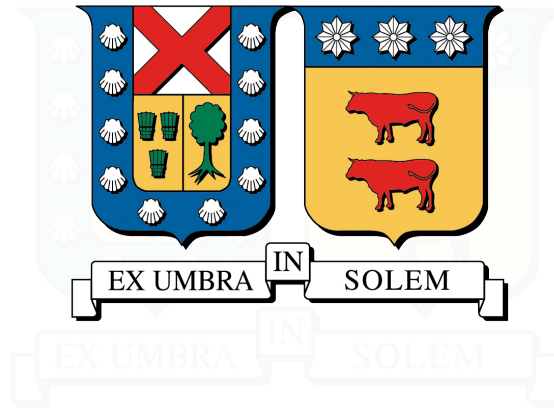


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO - CHILE



Estudio experimental del comportamiento calorimétrico de dos combustibles forestales chilenos: Pinus Radiata y Eucalyptus Globulus.

RAFAEL JESÚS REDONDO GAETE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : DR. JORGE CONTRERAS R.
PROFESOR CORREFERENTE : DR. RODRIGO DEMARCO B.

SEPTIEMBRE 2018



A mi familia y amigos

...

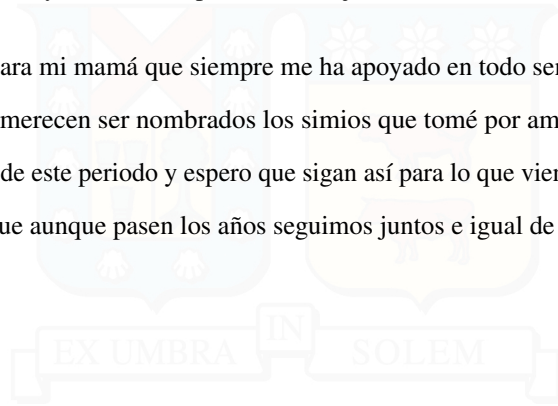
Gracias a todos los que contribuyeron a lo largo
de todo el proceso.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos mis seres cercanos, a aquellos que me han apoyado a lo largo de la carrera y particularmente a quienes me ayudaron en el presente trabajo.

Mención especial para mi mamá que siempre me ha apoyado en todo sentido y en gran medida se lo debo todo a ella. También merecen ser nombrados los simios que tomé por amigos en la universidad y me han acompañado a lo largo de este periodo y espero que sigan así para lo que viene. De igual manera recordar a mis amigos del colegio que aunque pasen los años seguimos juntos e igual de anormales.

Gracias por todo.



RESUMEN EJECUTIVO

A lo largo del presente trabajo se llevará a cabo un estudio experimental que tendrá por objetivo evaluar, utilizando técnicas calorimétricas, el comportamiento de dos combustibles forestales representativos de Chile: Eucalyptus Globulus y el Pinus Radiata, bajo diferentes flujos radiativos y fracciones volumétricas de combustibles con la intención de obtener información pertinente para validar modelos numéricos de propagación de incendios y aprovechamiento energético.

En el desarrollo experimental se hace uso del equipo SCALA construido bajo el financiamiento del Proyecto Fondecyt N° 1130957 "Caracterización de Combustibles de Biomasa Chilenos utilizando Métodos Calorimétricos", único principalmente por su diversidad de técnicas de diagnóstico y medición. El aparato SCALA es un calorímetro que en este trabajo se vale de dos métodos para la medición de las tasas de liberación de calor: diferencia de entalpía sensible (SER) y consumo de oxígeno (OC). Además se cuenta con diversos instrumentos de medición, entre los que destacan: cámara de vídeo, termopares, TDLA, reguladores de voltaje y balanza digital de precisión.

Las muestras estudiadas son: acículas de pino de fracción en volumen de 0,036 equivalente a 15 gramos; hojas de eucalipto de fracciones en volumen de 0,048, 0,032 y 0,016 equivalentes a 15, 10 y 5 gramos; y ramas de eucalipto de diámetros entre 2 y 9 mm. Las acículas y hojas fueron expuestas a flujos de radiación entre 39.5 y 15.9 kW/m^2 , mientras que las ramas fueron expuesta a una única configuración de 50.3 kW/m^2 . De estas mediciones se obtendrán los tiempos de ignición, flujos críticos de radiación, tasas de liberación de calor y tasas máximas de liberación de calor. El trabajo es sobre materia seca (5 % de rehidratación) y bajo el supuesto de combustión completa.

Palabras Clave. SCALA, Pinus Radiata, Eucalyptus Globulus, Tasa de liberación de calor, Tiempo de ignición, Flujo de radiación crítico, Tasa máxima de liberación de calor.

ABSTRACT

Throughout the present work an experimental study will be carried out that will aim to evaluate, using calorimetric techniques, the behavior of two forest fuels representative of Chile: Eucalyptus Globulus and Pinus Radiata, under different radiation fluxes and volumetric fractions of fuels with the intention of obtaining pertinent information to validate numerical models of fire propagation and energy use.

In the experimental development, SCALA equipment is used, which was built under the financing of the Fondecyt Project No. 1130957 "Characterization of Chilean Biomass Fuels using Calorimetric Methods", unique mainly due to its diversity of diagnostic and measurement techniques. The SCALA device is a calorimeter that in this work uses two methods for measuring the rates of heat release: sensitive enthalpy difference (SER) and oxygen consumption (OC). It also has various measuring instruments, among which are: video camera, thermocouples, TDLA, voltage regulators and precision digital balance.

The samples studied are: pine needles of volume fractions of 0,036 equivalent to 15 grams; eucalyptus leaves of volume fractions of 0,048, 0,032 and 0,016 equivalent to 15, 10 and 5 grams; and eucalyptus branches with diameters between 2 and 9 mm. The needles and leaves were exposed to radiation flows between 39.5 and 15.9 kW/m^2 , while the branches were exposed to a single configuration of 50.3 kW/m^2 . From these measurements will be obtained ignition times, critical radiation flows, heat release rates and peaks heat release rate. The work is on dry matter (5 % rehydration) and under the assumption of complete combustion.

Keywords. SCALA, Pinus Radiata, Eucalyptus Globulus, Heat release rate, Ignition time, Critical radiation flow, Peak heat release rate.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.1.1. Energía	3
1.1.2. Incendios Forestales	8
1.1.3. Vegetación	10
1.2. Alcance	11
1.3. Objetivos	11
1.3.1. Objetivo General	11
1.3.2. Objetivos Específicos	12
2. Marco Teórico	13
2.1. Proceso de ignición	13
2.2. Caracterización de la biomasa	13
2.2.1. Densidad de masa	13
2.2.2. Densidad Aparente	14
2.2.3. Packing Ratio y Porosidad	15
2.2.4. Composición química de la biomasa lignocelulósica residual	16
2.2.4.1. Celulosa	16
2.2.4.2. Lignina	17
2.2.4.3. Hemicelulosa	17
2.2.5. Propiedades de la biomasa residual como combustible	17
2.2.5.1. Tipo de biomasa	17
2.2.5.2. Contenido de humedad	17
2.2.5.3. Poder calorífico	18
2.2.5.4. Granulometría y geometría de la biomasa	19
2.2.5.5. Contenido de Cenizas	19
2.2.5.6. Composición Elemental	19
2.2.6. Tasa de liberación de calor	21
2.2.7. Tiempo de ignición	22
2.2.8. Calor de combustión efectivo	22
2.3. Calorimetría	24
2.4. Principios de operación del SCALA	25
2.4.1. Método de diferencia de entalpía sensible (SER)	26
2.4.2. Método de consumo de oxígeno (OC)	28
2.5. Diseño Experimental	29
2.5.1. Principales sistemas operativos del calorímetro	29
2.5.1.1. Sistema de suministro de aire	30
2.5.1.2. Radiant heaters	31
2.5.1.3. Sample holder	34
2.5.2. Sistemas de medición	34
2.5.2.1. Termocuplas	35

2.5.2.2.	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLA)	36
2.5.2.3.	Cámara	37
2.5.2.4.	Balanza	38
2.5.2.5.	Radiómetro	38
3.	Metodología	39
3.1.	Calibración	39
3.1.1.	Diferencia de entalpía sensible	39
3.1.2.	Consumo de oxígeno	41
3.2.	Procedimiento experimental	42
3.2.1.	Descripción general	42
3.2.2.	Preparación de la muestra	44
3.2.3.	Medición	46
3.2.4.	Análisis de datos	47
4.	Resultados	51
4.1.	Resultados experimentales	51
4.1.1.	Caracterización de la biomasa	51
4.1.2.	Tiempo de ignición	51
4.1.3.	Flujo crítico incidente	53
4.1.4.	Tasa de liberación de calor	56
4.1.5.	Tasa máxima de liberación de calor	58
4.1.6.	Calor de combustión efectivo	61
4.1.7.	Error experimental	63
4.2.	Discusión	65
5.	Conclusiones	67
	Bibliografía	71

Índice de Tablas

1.1. Superficie de plantaciones forestales según especies. (Fuente: de Información Territorial (2016)) . . .	10
2.1. Análisis elemental de hojas de pino y eucalipto tratadas.	19
2.2. Composición elemental de la biomasa lignocelulósica. (Fuente: Hartmann y Kaltschmitt (2001)) . . .	20
2.3. Especificaciones Turbo 250.	30
2.4. Configuración de los reguladores de voltaje para distintos flujos de calor.	33
3.1. HRR en función de la variación de flujo de etileno para el procedimiento de calibración. . .	40
4.1. Fracción en volumen de materia combustible α_{fuel}	51

Índice de Figuras

1.1. Balance Nacional de Energía. (Fuente: Nacional (2017))	6
1.2. Generación ERNC SIC en GWh. (Fuente: Nacional (2016))	7
1.3. Reporte histórico de incendios CONAF. (Fuente: contra Incendios Forestales (2017))	9
2.1. Balance de masa.	26
2.2. Turbo 250.	30
2.3. Sección transversal de la tubería con las posiciones donde fue medido el flujo de aire. (Fuente: Volkwein (2016))	31
2.4. Resistencias de carburo de silicio tipo U . (Fuente: Volkwein (2016))	31
2.5. Diseño de los calentadores. (Fuente: Volkwein (2016))	32
2.6. Regulador de voltaje. (Fuente: Volkwein (2016))	32
2.7. Sample Holder.	34
2.8. Catman Easy.	36
2.9. Perfil de absorción y emisión del oxígeno.	36
2.10. TDLA Spectra-1.	37
2.11. TDLA Spectra-1 interfaz.	38
3.1. HRR de calibración para el método SER.	41
3.2. HRR de calibración para el método OC.	42
3.3. Ubicación geográfica de donde fueron recogida las muestras.	43
3.4. SCALA en operación.	43
3.5. Sample holder con una muestra de ramas de eucalipto.	44
3.6. Sample holder con una muestra de hojas de eucalipto.	45
3.7. Sample holder con una muestra de hojas de pino.	45
3.8. Muestra en el SCALA.	47
3.9. Perfil de temperaturas de los gases de escape.	48
3.10. Perfil de PPM de oxígeno.	49
3.11. Perfil HRR por OC.	50
4.1. Medición de tiempos de ignición para diferentes porosidades a $\dot{q}_{inc} = 38.9 \text{ kW/m}^2$	52
4.2. Tiempo de ignición para acículas de pino y hojas de eucalipto.	54
4.3. Tiempo de ignición para distintas especies.	56
4.4. Tiempo de ignición para muestras de ramas de eucalipto en función del diámetro a $\dot{q}_{inc} = 50,3 \text{ kW/m}^2$	57
4.5. Tasa de liberación de calor para acículas de pino y hojas de eucalipto por métodos SER y OC.	57
4.6. Tasas de liberación de calor por método.	59
4.7. Tasa máxima de liberación de calor para muestras de acículas de pino y hojas de eucalipto de 15 gr.	60
4.8. Tasa máxima de liberación de calor para muestras de ramas de eucalipto en función del diámetro a $\dot{q}_{inc} = 50,3 \text{ kW/m}^2$	61

4.9. Calor de combustión efectivo para acículas de pino y hojas de eucalipto en función de la radiación incidente.	62
4.10. Calor de combustión efectivo para ramas de eucalipto en función del diámetro.	62
4.11. Estimación del error experimental del t_{ig}	63
4.12. Estimación del error experimental del t_{ig}	64
4.13. Estimación del error experimental del t_{ig}	65



1 | Introducción

Nada que exista en el arsenal humano explica la existencia de la humanidad mejor que el fuego, desde ser un animal como cualquier otro a ser la especie dominante sobre la tierra, porque se descubrió como robarle al cielo y usar el poder del sol. Fue un truco de magia tan excepcional, tan inexplicable que se le dijo a los hijos que era un regalo de los dioses, lo que luego se convertiría en un mito que sería traspasado durante miles de años. Calor, alimentación, transporte, comunicación, aniquilación, el fuego hizo guerreros, constructores y exploradores. Cada avance se ha pagado con sangre y aun así se continúa y ahora a medida que se rompen los lazos que sujetan a la especie a la Tierra y se consigue escapar de la jaula lo único que se ve al mirar hacia atrás es la luz de la conquista más grande del hombre como una llama que no se puede extinguir. La chispa misma de la humanidad comienza con el fuego.

El fuego no solo cambio el curso de la historia, revolucionó las herramientas y la tecnología, el fuego fundamentalmente cambio por completo la biología humana. Hay un momento origen, un instante en la historia, cuando los humanos se transformaron instantáneamente de presas a cazadores. El fuego dio la oportunidad de un futuro. Los animales cazan, también hacen herramientas, pero solo los humanos dominan el fuego y este fue el primer gran avance que permitió que los humanos se separaran de los otros simios. Una vez que se logró dominar el fuego la humanidad comenzó a dejar atrás al reino animal. Este se convirtió en la idea dominante en el pensamiento humano, su poder hechiza, cautiva y atrae como una luz atrae a las polillas.

Con el correr del tiempo se comenzó a experimentar con el fuego para darle otros usos más allá del calor y protección. Los orígenes de cocinar dieron al homosapiens un futuro totalmente nuevo en la Tierra. Cocinar dio energía, tiempo libre, intestinos pequeños y cerebros grandes. El fuego transformó a los humanos de una manera tan fundamental, al disponer de mayor energía en un lapso de tiempo menor y sin mayor esfuerzo, que el cerebro que comenzó a crecer, el ser humano así desarrolló sus lóbulos frontales.

En cada época a lo largo de la historia el hombre estuvo obsesionados con el fuego, cocinar reveló su poder transformador, así que se recurrió al mundo natural para volver a preguntar que más puede transformar. El comienzo fue utilizarlo para endurecer las lanzas de madera, pero el mayor avance llegó hace 7.000 años cuando se descubrió que los minerales se podían derretir y moldear, y así dar paso a una nueva era. Mezclar estaño y cobre dio el bronce, un material más potente que cualquiera que se haya conocido antes. Este fue el inicio de una nueva etapa, la edad de los metales, de pronto dos millones de años de edad de piedra quedaron obsoletos. De las llamas surgieron materiales nuevos, más fuertes y más livianos. De cobre a bronce, a hierro, a acero, el metal abrió un nuevo mundo de tecnologías, que se usó para alzar imperios, para construir industrias, transformó armas, herramientas, transporte y al final la civilización misma.

Para los ancestros el fuego era una fuerza misteriosa, no había nada igual. A cada nueva generación se le enseñó que era un obsequio de los dioses porque tenía un poder que no se podía explicar. Desde entonces y hasta la fecha se ha dado esta relación obsesiva entre el fuego y la humanidad. Una interminable búsqueda de lograr entender y dominar su poder y naturaleza. Es así que bajo la perspectiva del presente trabajo se buscará estudiar de manera experimental el comportamiento de diferentes tipos de biomasa durante su combustión mediante calorimetría. La posibilidad que ofrece el aparato SCALA construido bajo el financiamiento del Proyecto Fondecyt N° 1130957 Caracterización de Combustibles de Biomasa Chilenos utilizando Métodos Calorimétricos.^{es} único principalmente por su diversidad de técnicas de diagnóstico y medición.

Este trabajo trata de hacer una caracterización de la biomasa que puede ser utilizada tanto para la producción de energía como en el estudio de propagación de incendios forestales. Cuya caracterización dará parámetros que pueden ser considerados en futuros análisis afines a los casos señalados. Estudios basados en conocer los parámetros estudiados como el tipo de biomasa, tamaño, masa y radiación sobre las muestras.

El objetivo final que este trabajo tiene es contribuir a la caracterización de combustibles forestales típicamente encontrados en nuestro país a través de técnicas calorimétricas de manera de obtener parámetros que permitan conocer el comportamiento de estos combustibles cuando se enfrentan a flujos de calor radiativos similares a los encontrados en situaciones de incendios forestales. Estos parámetros son: tasa de liberación de calor (kW), tasa máxima de liberación de calor (kW), tiempos de ignición (s), flujo crítico de radiación (kW/m^2) y calor de combustión efectivo (EHC).

El calorímetro se llama Aparato de Calorimetría de Calor Sensible (SCALA). La razón principal para usar un calorímetro en lugar de otro instrumento, es que el calorímetro permite condiciones de prueba más realistas. Las condiciones de prueba son un factor importante cuando se trata de combustibles de composición

variable y tamaño de partícula.

Un calorímetro se define como un aparato utilizado para medir la velocidad de liberación de calor, y la medición de la velocidad de liberación de calor se llama calorimetría (Janssens, 2016). Los calorímetros aplican diferentes técnicas para medir la velocidad de liberación de calor de una muestra en combustión. Dependiendo del tipo de calorímetro, también se pueden medir otros parámetros (por ejemplo, tasas de pérdida de masa, concentraciones de especies en los gases del producto y desarrollo de humo visible de materiales (ASTM E1354-11b, 2011)). Con los calorímetros, el comportamiento de los combustibles se puede estudiar en diferentes condiciones experimentales (por ejemplo, diferentes tasas de flujo de aire, flujos de calor incidentes, atmósferas, etc.).

El principal diagnóstico óptico que se utilizará es un sistema TDLAS (Tunable diode laser absorption spectroscopy) para realizar espectrometría de gas de una manera simple y no intrusiva. SCALA permite detectar O_2 y CO_2 mediante este equipo. El segundo método de diagnóstico a utilizar es la medición de las temperaturas dentro de la cámara de combustión gracias a termopares instalados en diferentes zonas del SCALA. Esto es importante porque permitirá evaluar y calibrar los mecanismos cinéticos de la reacción. SCALA funciona como un horno, para investigar los parámetros cinéticos de muestras grandes (que funcionan como un TGA (análisis termogravimétrico) a gran escala) que, junto con atmósferas inertes, permitirán probar la cinética de pirólisis y los modelos de oxidación de carbón.

Estos resultados experimentales no solo proporcionarán información pertinente relacionada con las interacciones entre la zona de reacción y las propiedades del hollín en la perspectiva de comprender mejor la estructura de la llama de biomasa, la tasa de liberación de calor y el impacto ambiental, sino también la posibilidad de evaluar y calibrar una herramienta numérica integral para predecir los mecanismos de producción de hollín y la transferencia de calor radiativo con diferentes niveles de precisión.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Energía

Al usar el fuego para liberar la energía atrapada en los combustibles como el petróleo y el carbón el ser humano tenía la forma de calentar las casas y crear las máquinas más poderosas. De repente era capaz de crear industrias, economías, modernidad, pero como todo regalo del fuego esa magia tiene su precio. El

carbón puede quemarse durante mucho tiempo a temperaturas altas y esto encendió la imaginación y el ingenio, dando paso a la creación de máquinas asombrosas. El motor a vapor abrió paso a la revolución industrial y llevó a la invención de la locomotora.

Es una hazaña tomar el poder más destructivo sobre la tierra y convertirlo en una herramienta para llevar al ser humano a los cielos, pero eso es exactamente lo que se ha hecho en el transcurso de la historia humana. El motor a vapor, la turbina, motor de combustión interna, son muestras de que siempre se ha usado el fuego para presionar sobre las fronteras de la limitación humana para ir más rápido, más alto y más lejos.

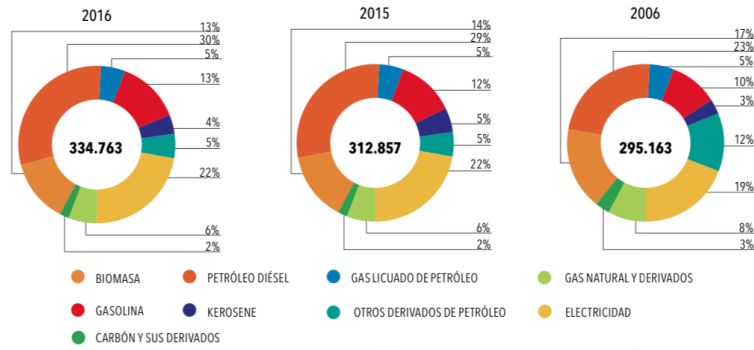
La humanidad se ha segado en su ambición por el progreso a cual sea su costo y ahora ya es posible percibir en su gravedad las repercusiones de sus errores. El cambio climático es el mayor de los desafíos de estos tiempo y supone una presión adicional para la sociedad y el medio ambiente. Desde pautas meteorológicas cambiantes, que amenazan la producción de alimentos, hasta el aumento del nivel del mar, que incrementa el riesgo de inundaciones catastróficas, los efectos del cambio climático son de alcance mundial y de una escala sin precedentes.

Chile es un país altamente vulnerable al cambio climático, cumpliendo con la mayoría de los nueve criterios de vulnerabilidad enunciadas por la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático), a saber: posee áreas costeras de baja altura; zonas áridas y semiáridas; zonas de bosques; territorio susceptible a desastres naturales; áreas propensas a sequía y desertificación; zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica; y ecosistemas montañosos. Los principales impactos proyectados dicen relación con la disponibilidad y temporalidad de los caudales en cuencas con generación hidroeléctrica. Considerando el escenario A2 de emisiones de GEI (gases de efecto invernadero), el potencial de generación hidroeléctrica del Sistema Interconectado Central (SIC) presentará disminuciones que irán de un 11 % (período 2011-2040) a un 22 % (período 2071-2099); para el escenario B2, las disminuciones de este potencial serían del orden de 10 % y 16 % para los mismos períodos. Esta menor capacidad proyectada de generación de hidroelectricidad, junto al aumento en la demanda energética tanto por las industrias como por el nivel residencial (mayor uso de sistemas de aire acondicionado), abre perspectivas para el desarrollo de las energías renovables no convencionales (ERNC) ([Gobierno de Chile, 2016](#)).

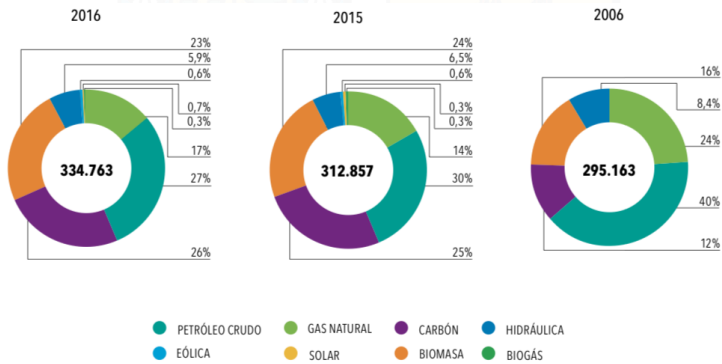
La respuesta al calentamiento global según acuerdo de los países desarrollados, emergentes y en vías de desarrollo, es a través del cumplimiento de las normativas internacionales, reduciendo los gases de efecto invernadero y aplicando medidas de adaptación y mitigación. En este contexto, uno de los tantos ejes relacionados con el cambio climático es la energía y su uso eficiente. El modelo económico y productivo

dominante está asociado a un consumo energético creciente. Actualmente, alrededor del 80 % de la energía que se utiliza a nivel mundial proviene de combustibles fósiles, cuya combustión produce grandes cantidades de contaminantes (CO_2 , NO_x , SO_2 , material particulado, metales pesados, entre otros), generando una amenaza de carácter ambiental: cambio climático, adelgazamiento de la capa de ozono, deterioro de la calidad de aire urbano, lluvia ácida, smog fotoquímico y otros. Por esto, los esfuerzos se focalizan en estudiar e impulsar las energías renovables y aumentar la inversión en tecnología (De La Maza y Cerda, 2014).

La matriz energética de Chile presenta una gran dependencia de las fuentes de energía extranjeras como petróleo y gas natural, las que representan un 40 % y 24 % respectivamente del total, ambas obtenidas principalmente de otros países cuya demanda satisfacen en un 98 % y un 90 %, es decir, más de dos tercios de la energía primaria se importa (Bustos et al., 2016a). Por lo tanto, el país es muy dependiente de los suministros extranjeros y está sujeto a las fluctuaciones del precio del petróleo, lo que compromete su desarrollo (Bustos et al., 2016b). En Chile a 2016, el 13 % del consumo total de energía correspondía a la energía producida a partir de biomasa 1.1a, la que a su vez representa el 23 % de la oferta total de energía primaria en Chile 1.1b (Nacional, 2017). Es así que el encarecimiento de la matriz energética chilena y su vulnerabilidad impacta negativamente en varios aspectos de interés nacional como lo reflejan las proyecciones hechas por el Centro de Estudios Públicos (Corbo y Hurtado, 2014), donde aseveran que el retraso de inversiones en proyectos eléctricos podría implicar una disminución acumulada de 18 % de la inversión, de 9 % en el consumo, de 8 % en el empleo y de 6 % en el producto interno bruto en relación a una expansión óptima en la inversión en generación para el periodo 2012-2019. Es por eso que para 2035 se ha planteado como meta que la generación eléctrica por fuentes de energías renovables alcance el 60 % del total y un 70 % para 2050 cuando los niveles actuales llegan al 41 % (de Prospectiva y Política Energética, 2017).



(a) Total del consumo final por energético en Chile en TCal.



(b) Total de la oferta de energía primaria en Chile en TCal.

Figura 1.1: Balance Nacional de Energía.

(Fuente: Nacional (2017))

En este contexto, la combustión de biomasa se destaca como una tecnología promisoría para enfrentar los desafíos en la producción de energía limpia llegando a representar un 23.4 % de la generación de energía en 2016 a partir de fuentes renovables, lo que equivale a 1675,8 GWh 1.3 (Nacional, 2016). Más aún, se ha establecido como meta para 2035 que el 50 % del consumo de los combustibles sea de aquellos denominados como de baja emisión, dentro de los cuales esta el gas licuado de petróleo (GLP), gas natural, biomasa y biogás, y para 2050 este porcentaje alcance el 65 % siendo que los niveles actuales a 2016 serían de el 36 % (de Prospectiva y Política Energética, 2017). La biomasa representa una fuente renovable y en gran parte sin explotar de material de alimentación en bruto para la conversión en biocombustibles, productos termoquímicos y otros productos finales relacionados con la energía (Sanderson et al., 1996). La forma más común de capturar energía de biocombustibles sólidos es quemarlos produciendo calor. La biomasa es materia orgánica que puede proceder de animales (zoomasa) y plantas (fitomasa). La biomasa ha sido utilizada por la humanidad para producir energía durante miles de años. Hoy en día hay plantas de energía que usan biomasa para producir energía. En este estudio, el término biomasa se aplicará para referirse a la fitomasa.

Las plantas convierten la energía del sol en energía química a través de la fotosíntesis y la almacenan.

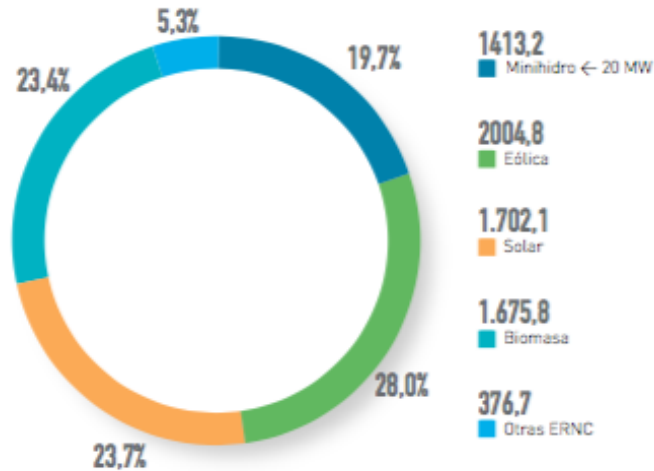


Figura 1.2: Generación ERNC SIC en GWh.

(Fuente: Nacional (2016))

La biomasa se compone de cantidades variables de celulosa, hemicelulosa, lignina, pequeñas cantidades de otros compuestos orgánicos e inorgánicos (Abbasi y Abbasi, 2010). El uso sostenible de la biomasa para la producción de energía no aumenta el dióxido de carbono presente en la atmósfera. La Agencia de Protección Ambiental de EEUU afirmó que el dióxido de carbono emitido a partir de combustibles basados en biomasa no aumenta las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, suponiendo que el dióxido de carbono emitido se equilibra por la absorción de dióxido de carbono resultado del crecimiento de nueva biomasa (., 2009, EPA).

La biomasa es en una fuente de energía interesante, debido a su naturaleza renovable. El clima en Chile promueve el crecimiento de árboles y plantas. A través de un uso sostenible, estos recursos pueden convertirse en una fuente importante para la generación de energía. Existe una potencia factible a partir de residuos de biomasa en el rango de 310 MW y 470 MW que pueden instalarse en Chile (Bertran y Morales, 2008). Sin embargo, un problema en la generación de energía basada en la combustión de biomasa a gran escala es la calidad de la materia prima de biomasa. La biomasa generalmente viene con un contenido de humedad alto y variable. Existen comúnmente varios tipos de biomasa mezclados en diferentes proporciones, que dan comportamientos variados en las calderas, cada tipo de biomasa tiene propiedades particulares y el tamaño de las partículas de biomasa es diferente para cada tipo. Estas variables tienen una influencia en la eficiencia de la combustión en la caldera.

1.1.2. Incendios Forestales

El fuego ofreció una manera nueva de reconstruir el cerebro humano y encender la imaginación. Con ese poder se comenzó a aprovechar el potencial destructivo del fuego, los hombres se volvieron unos contra otros, pero es peligroso creer que se puede dominar uno de los cuatro elementos de la naturaleza. Como se sabe el fuego puede ser letal, pero de su destrucción el renacer puede aparecer. Mientras la vida evolucionaba durante eones, las plantas comenzaron a colonizar la tierra, llenando de oxígeno la atmósfera, el último ingrediente en la receta del fuego, pronto la superficie del planeta se había convertido en un mechero esperando encenderse dando inicio a la era del fuego. durante 350 millones de años el fuego se extendió sobre el planeta y la vida en la Tierra se vio obligada a lidiar con el monstruo que creó, pero para una criatura era la clave para la dominación mundial. Para domarlo, para esclavizarlo el hombre se sacrificaría una tras otra vez solo para crear el mundo moderno de las cenizas del pasado.

Algunas de las grandes ciudades y sociedades más modernas de su época: Roma, Constantinopla, Munich, Moscu, todas fueron arrasadas por el fuego, pero el que en verdad cambió la manera en como vive la humanidad incluso hoy en día fue el gran incendio de Londres de 1666. Este es el incendio que cambió al mundo. El gran incendio de Londres consumió casi el 80 % de la ciudad y dejó a más de cien mil personas sin hogar.

Si bien los incendios siempre han sido parte de la historia del planeta desde que existe vegetación, es el accionar del hombre el que ha roto este balance natural, ya sea deliberada o accidentalmente, de forma directa o indirecta. Rusia, Malasia y Australia tuvieron los incendios más devastadores en cuanto a superficie afectada de los que se tiene registro, el primero de ellos arrasó con 14.4 millones de hectáreas al este de Rusia y Siberia. En Sudamérica Argentina lidera la lista con un millón de hectáreas afectadas, seguido por Chile con el gran incendio del verano austral de 2017, afectando alrededor de 600 mil ha. Frecuentes son los incendios en países mediterráneos como España, Portugal, Grecia y sur de Italia y Francia, a los que se les suma Indonesia, Australia, Malasia, Singapur, Alemania, Estados Unidos, Brasil, Chile y muchos más (Weston, 2017).

La historia de Chile no ha quedado exenta a la tónica de los incendios y dadas sus características tanto geográficas como climatológicas se encuentra altamente propenso a esta clase de siniestros. Esto es posible de observar en los registros históricos de la Corporación Nacional Forestal (Conaf), donde se señala que desde 1963 a 2017 han ocurrido un total de 234.702 incendios en el país, lo que promedia 4.346 por año, sin embargo lo más dramático es que solo en los últimos 5 años el promedio de incendios se eleva hasta 6.465

marcando una clara tendencia. Por otro lado, si bien la ocurrencia de siniestros ha aumentado, también lo ha hecho el daño que estos han provocado ya que desde 1963 a 2017 se promedian alrededor de 58053 ha quemadas por año y el promedio en los últimos cinco años asciende a 76.826 1.3 (contra Incendios Forestales, 2017).

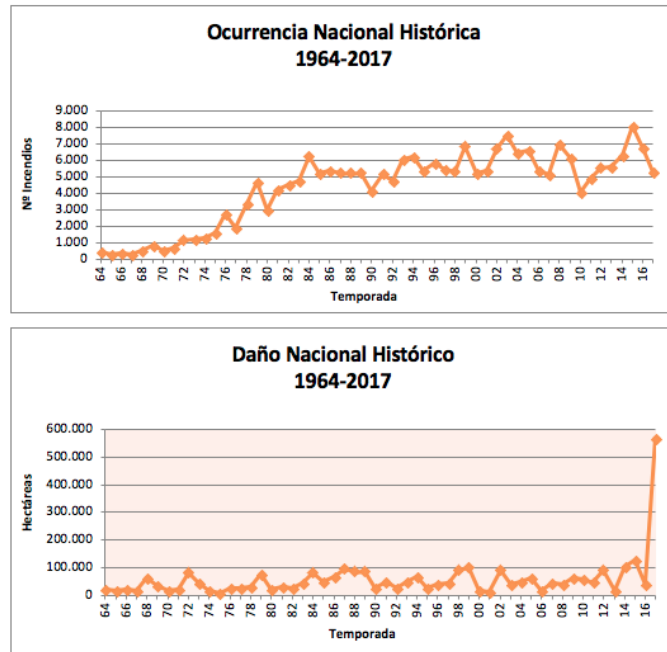


Figura 1.3: Reporte histórico de incendios CONAF.

(Fuente: [contra Incendios Forestales \(2017\)](#))

Los incendios de biomasa son alimentados por la mezcla gaseosa emitida por la descomposición térmica de los combustibles sólidos. Para mantener la descomposición térmica, la superficie de combustible debe recibir una alta tasa de energía. Esta cantidad de energía proviene de la combustión de gases provenientes de la descomposición térmica creando un bucle autosostenido.

La combustión flamígera de combustibles lignocelulósicos ocurre cuando los gases liberados por la degradación térmica se encienden en el aire circundante. Luego, el calor de la combustión provoca la descomposición térmica del combustible virgen adyacente. Para mantener la llama, este combustible virgen debe recibir suficiente calor para romper los enlaces hacia abajo. Este calor es sostenido por la energía liberada de las reacciones de combustión en fase gaseosa (Perez-Ramirez et al., 2012). La combustión de la mayoría de los combustibles sólidos implica dos pasos principales: (i) la descomposición térmica (pirólisis, desvolatilización) que ocurre durante el calentamiento inicial, acompañada de cambios físicos y químicos drásticos que generalmente implican que la partícula se vuelve plástica y luego se endurece, y (ii) combustión de los productos de pirólisis gaseosos emitidos por descomposición térmica.

Se han llevado a cabo una cantidad considerable de estudios para explicar la propagación del fuego en incendios forestales. Durante las últimas décadas, se han propuesto varios enfoques físicos para resolver el problema de la propagación de un frente de fuego a través de un combustible poroso homogéneo que representa una capa de vegetación (Weber, 1991) y se han propuesto enfoques físicos completos para estudiar la propagación de un fuego de superficie a través de capas de agujas de pino (Morvan y Dupuy, 2004).

1.1.3. Vegetación

En general, los combustibles basados en madera y biomasa están compuestos de aproximadamente 50 % - 60 % de celulosa en masa y, como tal, muchas de las características cinéticas de la pirólisis de la celulosa son comunes a todos los combustibles de tipo biomasa y madera (Antal y Varhegyi, 1995). Sin embargo, de forma particular en el trabajo realizado se estudian solo dos de las especies que más podrían caracterizar la realidad del país. Estos dos tipos son el *Pinus Radiata* y el *Eucalyptus Globulus*.

Al año 2017 en Chile se encuentran plantadas 1023504 ha de *Eucalyptus Globulus* y 1886107 ha de *Pinus Radiata* que equivalen a más del 94 % de la superficie forestal y siendo las plantaciones forestales más del 17 % del total de la superficie de bosques del país (de Información Territorial, 2017). Por otro lado, entre forestación (204.653,29 ha) y reforestación (330.218,93 ha) se han plantado 534.872,22 ha desde 1998 a 2006 de *Eucalyptus Globulus*. En cuanto a *Pinus Radiata*, la cantidad plantada entre forestación (244.906,81 ha) y reforestación (796.672,12 ha) alcanza el 1.041.578,93 ha (de Información Territorial, 2016).

Tabla 1.1: Superficie de plantaciones forestales según especies.
(Fuente: de Información Territorial (2016))

Región	Acacia sp.	Eucalyptus sp.	Pinus radiata	Otras especies	Total
Arica y Parinacota	0,0	20,8	0,0	0,0	20,8
Tarapacá	0,0	0,0	0,0	26.974,9	26.974,9
Antofagasta	0,0	0,0	0,0	3.411,2	3.411,2
Atacama	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coquimbo	8.570,5	2.987,5	0,2	726,9	12.285,1
Valparaíso	1.119,5	54.537,8	13.057,1	43,5	68.757,9
Metropolitana	0,0	9.023,9	0,0	157,2	9.181,0
O'Higgins	1.029,1	49.695,8	77.771,3	2.040,2	130.536,4
Maule	5.747,0	53.153,0	540.107,8	8.586,0	607.593,8
Biobio	40.537,9	424.204,4	780.112,8	11.035,0	1.255.890,0
La Araucanía	5.445,8	274.654,6	336.041,3	16.147,3	632.289,0
Los Ríos	498,1	85.492,4	116.419,8	6.364,9	208.775,2
Los Lagos	99,9	69.731,2	22.596,7	4.171,0	96.598,8
Aysén	0,0	2,8	0,0	32.014,5	32.017,3
Magallanes y La Antártida	0,0	0,0	0,0	22,8	22,8

Dichas plantaciones se encuentran presentes en casi todo el país excepto en las regiones con climas desérticos o semiáridos como Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama. Y se concentran principalmente en las regiones de el Maule, Biobio y La Araucanía donde está cerca del 82 % de estos recursos (de [Información Territorial, 2017](#)).

1.2. Alcance

En el presente estudio sólo serán tratadas las especies vegetales antes mencionadas, *Eucalyptus Globulus* y *Pinus Radiata*, por ser aquellos de mayor presencia en el país. Muestras obtenidas únicamente de un sector en específico de la región de Valparaíso, Laguna de la Luz en Curauma. No será tomado en consideración la edad de los árboles de los cuales fueron obtenidas las muestras de combustible, ni sus características físicas como grosor y altura. De estas especies son utilizadas sus hojas y particularmente en el caso del eucalipto ramas de diámetro pequeño. Queda fuera del estudio la cantidad de humedad de las muestras.

El trabajo se centra en el desarrollo experimental del equipo SCALA y en su uso para obtener datos relevantes en la caracterización de combustibles vegetales típicos del país. De este modo no es parte de su desarrollo la validación del equipo y sus métodos o caracterización de sus componentes. Son considerados los supuestos de operación como combustión completa de las muestras y la inercia térmica del equipo.

Es sujeto de estudio la ignición espontánea del estrato vegetal por lo tanto en el trabajo no hay ignición pilotada. La biomasa llega al punto de ignición gracias a la radiación recibida por los heaters los cuales se considera que suministran una radiación constante y homogénea sobre el estrato. También son estudiadas las tasas de liberación de calor por los métodos de consumo de oxígeno (OC) y diferencia de entalpía sensible (SER) medidas por los sistemas TDLA y termopares dispuestos en los gases de escape de la cámara de combustión.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar, utilizando técnicas calorimétricas, el comportamiento de dos combustibles forestales representativos de Chile: *Eucalyptus Globulus* y el *Pinus Radiata*, bajo diferentes flujos de radiación y fracciones

volumétricas de combustibles con la intención de obtener información pertinente para validar modelos numéricos de propagación de incendios y aprovechamiento energético.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la influencia de la exposición a diferentes radiaciones, cantidad de masa de la muestra, porosidad del estrato, tipo y especie de biomasa en los tiempos de ignición de las muestras combustibles es.
- Estudiar relación entre las tasas de liberación de calor y su exposición a diferentes radiaciones, cantidad de masa de la muestra, porosidad del estrato, tipo y especie de biomasa.
- Estimar la sensibilidad del equipo para muestras pequeñas.
- Generar una base de datos pública útil para la validación de modelos numéricos de combustión en el uso contra incendios y aprovechamiento energético.
- Diseñar una metodología experimental que permita disminuir la variabilidad en los resultados de las mediciones y sea posible replicar.
- Sentar la metodología como una alternativa válida para futuros estudios por calorimetría con el equipo SCALA.
- Generar perspectivas, soluciones y debate sobre el uso de biocombustibles y sobre sus proyecciones energéticas en el país.
- Entregar información relevante para la obtención de parámetros en la propagación de incendios.
- Generar debate y discusión sobre el uso del equipo SCALA para la obtención de datos fidedignos.
- Determinar niveles críticos de radiación incidente para los distintos tipos de muestras.

2 | Marco Teórico

2.1. Proceso de ignición

Cuando un material sólido, inicialmente a temperatura ambiente es sometido a una fuente externa de energía, la temperatura de la superficie externa expuesta comienza a aumentar. Este momento es definido como el comienzo del proceso de ignición, $t = 0$. Una serie de fenómenos físicos y químicos son iniciados cuando la energía alcanza la superficie del material. En el presente trabajo, el proceso de ignición puede ser descrito con un marco de referencia unidimensional usando una única coordenada de referencia, x . Así, solo una superficie del material será calentada

2.2. Caracterización de la biomasa

2.2.1. Densidad de masa

Por densidad se entenderá la densidad de masa del combustible vegetal, la cual se calcula a partir de la cantidad de masa del combustible en ausencia de humedad partido por unidad de volumen.

$$\rho_{fuel} = \frac{m_{fuel}}{V_{fuel}} \quad (2.1)$$

La metodología para el cálculo experimental de la densidad de las hojas de pino y eucalipto es adoptada según describe Muñoz-Feucht et al. (2014) pesando una cantidad de masa de combustible m_{fuel} la que se introduce en un tubo graduado. Al tubo graduado se le agregan 3 ml de etanol V_{etanol} y se registra el

nuevo volumen final V_{final} . Luego la densidad, mediante este método se calcula usando la ecuación 2.2. El proceso es repetido 15 veces.

$$\rho_{fuel} = \frac{m_{fuel}}{V_{total} - V_{etanol}} \quad (2.2)$$

En el caso de las ramas de eucalipto el calculo es mediante una aproximación gracias a la geometría regular de las muestras. Se pesan al menos 30 gramos de cada tipo de talla y se cuenta la cantidad de trozos que fueron necesarios, obteniendo un promedio de la masa de cada uno en cada categoría 2.3. El volumen se calcula a partir de la geometría de un tubo 2.4.

$$\bar{m}_{fuel} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} \quad (2.3)$$

$$V_{fuel} = \pi \cdot r^2 \cdot l \quad (2.4)$$

Donde r es el radio de las ramas de eucalipto, l el largo de 10 cm y n la cantidad de ramas. Finalmente empleando la formula 2.1 se obtiene la densidad de masa.

2.2.2. Densidad Aparente

La densidad aparente, ρ_{fuel} , se define como la masa de material combustible dividida por el volumen del espacio en el cual reside (Keane, 2015). La densidad aparente se diferencia de la densidad de masa puesto que el volumen que es considerado incluye los espacios entre las partículas que componen el estrato. Se calcula a partir de la formula 2.5.

$$\rho_b = \frac{m_{fuel}}{V_{basquet}} \quad (2.5)$$

Este parámetro del estrato es comúnmente utilizado para representar el arreglo espacial del estrato vegetal. Tiene una variedad de usos en temas relacionados con incendios. Es un parámetro de entrada para modelar la canopia de los árboles y por otro lado es de interés al estudiar estratos vegetales para simular incendios de superficie.

2.2.3. Packing Ratio y Porosidad

El packing ratio, β , es un índice utilizado para representar la compactación del estrato vegetal (Keane, 2015). El calculo del β se obtiene a partir de la ecuación 2.6 donde ρ_b es la densidad aparente y ρ_{fuel} es la densidad de masa.

$$\beta_{fuel} = \frac{\rho_b}{\rho_{fuel}} \quad (2.6)$$

Al analizar la transferencia de calor resulta ser un parámetro interesante ya que en estrados con bajos packing ratio (gran cantidad de espacios de aire) se ha observado una mayor pérdida de calor que en estratos con packing ratio altos (baja cantidad de espacios en el estrato) donde se observa menor propagación e intensidad de fuego.

Otro indicador a considerar en la caracterización del estrato vegetal es el nivel de compactación. La porosidad es el nivel de compactación, ϵ 2.7, y se define como el ratio entre el volumen del espacio ocupado por el aire respecto al volumen total del estrato (Keane, 2015).

$$\epsilon = \frac{V_{aire}}{V_{basquet}} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_{fuel}} \quad (2.7)$$

Por último, otro parámetro empleado con el mismo fin es la fracción en volumen del combustible, α_{fuel} , el que se define, en forma parecida a la porosidad, como el ratio entre el volumen de material combustible respecto del total de volumen del estrato (Keane, 2015) 2.8.

$$\alpha_{fuel} = \frac{V_{fuel}}{V_{basquet}} \quad (2.8)$$

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

2.2.4. Composición química de la biomasa lignocelulósica residual

La composición química de la biomasa es un aspecto muy importante a la hora de estudiar el desarrollo de biocombustibles y sus posibles aplicaciones energéticas. Esta información puede ayudar al mejoramiento de procesos y métodos que sean más eficientes. Desde el punto de vista de la composición, en la biomasa leñosa se reconocen dos grupos de componentes químicos: estructurales y no estructurales.

Dentro del grupo de los componentes no estructurales es posible diferenciar dos tipos: los orgánicos e inorgánicos. Los componentes orgánicos contribuyen a las propiedades de la madera así como el color, olor, sabor, resistencia a la pudrición, densidad, propiedades higroscópicas e inflamabilidad, entre otras y pueden ser sustancias como taninos, polifenoles, material colorante, aceites esenciales, grasas, resinas, ceras, gomas y metabolitos intermedios los que pueden constituir entre 5 % de la sustancia madera, dependiendo de factores como la especie, las condiciones de crecimiento, el tipo de madera y la época en que la biomasa se cosecha (Carmona y Urzúa, 2013).

Los componentes inorgánicos, comúnmente llamados cenizas, constituyen entre el 0,2 % al 1 % de la masa seca de la madera crecida en climas templados. Los componentes minerales son principalmente sales de calcio, potasio y magnesio, así como muchos otros elementos presentes a nivel de trazas (<100 ppm) como fósforo, sodio, hierro, sílice, cobre, zinc y otros (Carmona y Urzúa, 2013). Esta fracción determina en gran medida las características de las cenizas residuales en procesos de combustión.

Los componentes estructurales forman entre el 90 % y 95 % de la biomasa leñosa. Grupo constituido por tres tipos de polímeros: celulosa, lignina y hemicelulosa.

2.2.4.1. Celulosa

Polisacárido cuya fórmula genérica es $(C_6H_{10}O_5)_n$ y un peso molecular promedio entre 500.000 y 2.500.000 *gr/mol*. Es insoluble en agua y constituye aproximadamente el 50 % de la madera en peso. Durante el crecimiento del árbol las moléculas de celulosa se enlazan mediante puentes de hidrógeno formando cadenas ordenadas denominadas fibrillas, las que a su vez organizan elementos estructurales mayores que forman las fibras de la madera, donde la mayor parte se encuentra en forma cristalina (Carmona y Urzúa, 2013).

2.2.4.2. Lignina

La lignina es un polímero en red formado por unidades tridimensionales de fenilpropano (Sjostrom, 2013), el que se encuentra unido a la hemicelulosa de la pared. Sus principales funciones son conferir resistencia e impermeabilidad a la matriz lignocelulósica y proteger la celulosa de ataques microbianos. La lignina constituye del 23 % al 33 % de la biomasa leñosa en las coníferas y de 16 % a 25 % en las latifoliadas (Carmona y Urzúa, 2013). También es llamada como el cemento que une las células entre ellas, sin embargo, su estructura y distribución en la madera no es aún del todo comprendida.

2.2.4.3. Hemicelulosa

Son polisacáridos complejos que se asocian con la celulosa en la pared celular. Corresponden a polímeros ramificados de bajo peso molecular compuestos de varias clases de monómeros. Muchas tienen la fórmula genérica $(C_5H_8O_4)_n$ formadas por pentosanos.

2.2.5. Propiedades de la biomasa residual como combustible

2.2.5.1. Tipo de biomasa

La biomasa se puede presentar bajo diferentes variantes como: sección del árbol (hoja, rama, tronco, corteza, etc); lugar de donde es obtenida, variable bajo la cual tendrá influencia las características de los suelos y el clima de donde creció el árbol; y especie entre otras.

2.2.5.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad es una característica determinante en términos energéticos ya que en procesos de combustión el agua se llevará parte de la energía liberada. Cuando la biomasa reduce su contenido de humedad también reduce su peso, su volumen y la actividad biológica de agentes externos.

El contenido de humedad se calcula usando como referencia el peso seco y el peso total de la muestra. En el cálculo se emplean las ecuaciones 2.9 y 2.10 respectivamente. Para propósitos de estudio es una buena opción utilizar la primera ecuación, sin embargo, en la industria es más práctico utilizar la segunda por su

facilidad al medirla.

$$MC \%_{OB} = \frac{m_{H_2O}}{m_{dry}} \quad (2.9)$$

$$MC \%_{GB} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{dry}} \quad (2.10)$$

Donde m_{H_2O} es la masa de agua presente en la muestra y m_{dry} es la masa de combustible seco.

El método de secado en horno especifica una temperatura constante de $103\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ (ASTM D4442-07, 2007). Sin embargo, a esa temperatura se percibió cierta descomposición térmica por lo que la temperatura se ajustó a 60 °C durante 12 horas para las hojas de pino y eucalipto (Fuentes y Consalvi, 2014). Las ramas de eucalipto se dejaron a la misma temperatura, pero por un tiempo de exposición diferente. Para determinar el tiempo de secado de las ramas se espera a que el peso de la muestra no cambie por 4 horas, lo cual se alcanzó a las 18 horas. Después de estos tiempos no se observaron cambios de masa por lo que se concluye que se encuentran secas, sin embargo, producto del contacto con la intemperie previo a las pruebas se considera entre un 1 % y 3 % de humedad producto de la rehidratación (Santoni et al., 2015).

2.2.5.3. Poder calorífico

El poder calorífico mide el contenido energético de una sustancia combustible y se define como la cantidad de energía liberada por unidad de masa o por unidad de volumen de combustible, cuando este es completamente quemado (ASABE, 2011). Se reconocen dos poderes caloríficos, el superior, cuando el calor latente de vaporización del agua formado en la combustión es recuperado; y el inferior, cuando este calor escapa en los gases de combustión, el que varía dependiendo de la cantidad de agua que presenta el combustible (Carmona y Urzúa, 2013). En el caso de la madera este se modela por la ecuación:

$$PCI = \frac{PCI_0(100 - \%CH) - 2,44 \cdot \%CH}{100} \quad (2.11)$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior a una humedad dada MJ/kg , PCI_0 es el PCI con el material anhidro y $CH\%$ es el contenido de humedad base verde.

2.2.5.4. Granulometría y geometría de la biomasa

La granulometría y geometría de la biomasa puede ser muy variable e influirá determinantemente en los procesos de conversión en los que se utilizará. El tamaño y geometría, en conjunto con la humedad, están estrechamente relacionados con la capacidad de almacenamiento, transporte y valor. Dependiendo de estas condiciones el valor de la biomasa varía por lo que resulta interesante determinar su influencia en el aprovechamiento energético.

2.2.5.5. Contenido de Cenizas

Tanto la ceniza volátil como la depositada, son elementos importantes a considerar en las unidades de conversión termoquímicas (Oberberger et al., 2006). Los combustibles sólidos con menor cantidad de cenizas son la mejor opción, ya que la deposición en procesos de combustión es menor; se ha observado que la formación y composición de las cenizas depende de numerosos factores: la especie, la parte de la planta quemada (madera, corteza, hojas), recolección y almacenaje, mezclas de biomasa y condiciones de la combustión entre otros (Oberberger et al., 2006).

La corteza tiene mayor cantidad de cenizas, al igual que las ramas y las ramillas, respecto de la madera. Las hojas a veces son parte del residuo, y generan un gran cantidad de cenizas debido a su alto contenido de sales como oxalatos, fosfatos y silicatos, entre otros (Sjostrom, 2013). Por otro lado los puntos bajos de fusión de la ceniza provocan problemas de suciedad, la humedad alta y el contenido de cenizas pueden causar ignición y problemas de combustión (Demirbas, 2004).

2.2.5.6. Composición Elemental

La mayoría de las biomásas están compuestas por 50 % de carbono, 43 % de oxígeno, 6 % de hidrógeno y menos del 1 % de otros elementos (Carmona y Urzúa, 2013). Para el caso de las hojas de pino y eucalipto se determinó, mediante un análisis elemental, que están compuestas como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Análisis elemental de hojas de pino y eucalipto tratadas.

Especie	C %	H %	O %	N %
Pino Radiata	49,4	7,4	30,1	0,96
Eucaliptus Globulus	51,1	7,3	35	1,56

En el caso de la composición elemental de biomasa lignocelulósica en general la mayoría está compuesta en las proporciones presentadas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Composición elemental de la biomasa lignocelulósica.
(Fuente: [Hartmann y Kaltschmitt \(2001\)](#))

Elemento	% de la materia seca
Carbono	40 - 47
Hidrógeno	6
Oxígeno	40 - 44
Nitrógeno	1 - 5
Fósforo	0,05 - 0,8
Potasio	0,3 - 5
Sodio	0,02 - 0,5
Azufre	0,05 - 0,8
Calcio	0,3 - 5
Silicio	0,05 - 3
Magnesio	0,5 - 1
Boro	0,005 - 0,01
Cloro	0,02 - 1
Cobre	0,0002 - 0,002
Hierro	0,005 - 0,1
Manganeso	0,002 - 0,03
Zinc	0,001 - 0,01

El carbono es el componente principal de la biomasa leñosa, el que mediante su oxidación libera energía, al igual que el hidrógeno. En cambio, el oxígeno se encuentra oxidado de forma parcial a los otros dos elementos, contribuyendo a este proceso durante la transformación termoquímica. El contenido de carbono e hidrógeno contribuyen positivamente en el poder calorífico, mientras que el contenido de oxígeno lo hace de modo negativo ([Oberberger et al., 2006](#)).

El nitrógeno es un componente esencial en las plantas y forma parte de las proteínas, de los ácidos nucleicos, de las bases orgánicas, del pigmento de la clorofila, entre otras estructuras. En las biomasa lignocelulósica se encuentra en mayor concentración en la corteza; por el contrario, la madera es la biomasa con menor concentración de nitrógeno ([Oberberger et al., 2006](#)). Durante la combustión, el N orgánico se oxida a NO_x (óxidos de nitrógeno); donde solo una parte mínima se incorpora en las cenizas.

El azufre es un elemento esencial para la formación de proteínas en la célula y su relevancia en la biomasa radica en que en la combustión directa es un potencial formador de los gases contaminantes de óxidos de azufre (SO_x), precursores de la lluvia ácida, y a su vez es un contaminante del biogás, pues participa en la formación de ácido sulfhídrico (H_2S). Sin embargo, su mayor importancia está en el papel que juega en los procesos de corrosión en la superficie de los tubos de los intercambiadores de calor en las unidades de

conversión como las calderas. La incorporación del S a las cenizas es muy variable (de 40 a 90 %), y esta depende de la concentración de metales alcalinos (Ca) en la biomasa (Oberberger et al., 2006).

2.2.6. Tasa de liberación de calor

La tasa de liberación de calor corresponde a la energía liberada (kW) por unidad de tiempo (s). La tasa de liberación de calor o HRR (heat release rate) será calculada mediante dos métodos, diferencia de entalpía sensible SER y consumo de oxígeno OC. La tasa de liberación de calor (HRR) es un parámetro crítico para la evaluación en el comportamiento del crecimiento del fuego que se incorpora a una amplia gama de herramientas. Las formulaciones analíticas, las correlaciones empíricas, los modelos de Zona y Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) usan el HRR como un parámetro de entrada para determinar casi cualquier otra variable cuantificable con respecto al fuego (Biteau et al., 2008).

Se han desarrollado una serie de metodologías para medir el HRR de diferentes materiales y objetos. Estas metodologías pueden usar medidas del aumento de temperatura, pérdida de masa, consumo de oxígeno o producción de ciertas especies (Biteau et al., 2008). Las mediciones también pueden ser realizadas a escalas pequeñas, medianas o realista. La metodología más común para determinar el HRR es la de calorimetría por consumo de oxígeno (OC), y se basa en que existe una relación entre los niveles de oxígeno durante la combustión y la tasa de liberación de calor del combustible. La aplicabilidad del método OC se ha extendido tanto a materiales sólidos como líquidos y eventualmente a combustibles orgánicos sólidos llegando a encontrar un valor promedio constante de energía de $13,1 \pm 0,68 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ por partícula de O_2 consumida para la mayoría de las sustancias orgánicas (Huggett, 1980). La ventaja de estas metodologías es que permiten estimar el HRR directamente a partir de mediciones, sin el conocimiento de la composición química del material o la química de la combustión.

Las metodologías se han desarrollado para abordar las incertidumbres en los datos experimentales y, a su vez, para estimar la propagación de la incertidumbre en lo que se refiere a las variables artificiales y otros cálculos que utilizan datos medidos. Varios estudios han demostrado que la mayoría de los errores experimentales pueden cuantificarse adecuadamente y, en general, no afectan la aplicabilidad de la HRR como un insumo para los cálculos de seguridad contra incendios (Enright y Fleischmann, 1999). Actualmente, no existe una forma sistemática de establecer cómo la naturaleza del material probado puede afectar la validez de los supuestos y, en consecuencia, la cantidad de detalles necesarios para obtener una estimación del HRR que sea consistente con la complejidad y precisión requerida en el análisis de la seguridad contra incendios

(Biteau et al., 2008).

2.2.7. Tiempo de ignición

El tiempo de ignición corresponde al tiempo transcurrido desde que la muestra es expuesta al flujo radiativo hasta que esta prende de forma espontánea. Para que se produzca la ignición espontánea se requiere incrementar su temperatura hasta que la reacción de combustión ocurra, alcanzando la temperatura $T_{ig,sp}$.

Es común asociar un tiempo de pirólisis y uno de inducción. El primero es el tiempo que se requirió desde el inicio del calentamiento del sólido hasta la producción de una mezcla inflamable. El segundo, es el tiempo requerido por la mezcla inflamable en alcanzar la temperatura de ignición. En un proceso de ignición espontánea no existe un piloto que sirva de punto de inicio para la reacción, por lo que la mezcla inflamable debe absorber suficiente energía para alcanzar la ignición (Torero, 2016).

La cantidad requerida de energía puede ser asociada al número de Damköhler, el cual es el ratio entre el tiempo de residencia y el tiempo requerido por la reacción química. La tasa a la que se produce una reacción química como la combustión puede ser expresada por medio de una ecuación de Arrhenius similar a la de pirólisis, y el tiempo de reacción puede ser obtenido como el inverso de ella. Considerando esto, el tiempo de reacción química se ve afectado por la temperatura, de forma que a mayor temperatura la tasa de combustión es mayor y el tiempo de reacción química es menor. Por otro lado, el tiempo de residencia tiene directa relación con la rapidez de los gases, a mayor velocidad el tiempo de residencia es menor. Si el tiempo requerido por la reacción química es menor al tiempo de residencia la reacción tiene suficiente tiempo para proceder y la llama puede existir, por lo tanto existe un número de Damköhler crítico que es necesario alcanzar antes de que la ignición pueda ocurrir (Hernández et al., 2018).

2.2.8. Calor de combustión efectivo

El calor de combustión Δh_c es una propiedad termodinámica medida con un calorímetro de bomba de oxígeno. También puede ser calculado a partir de las concentraciones de los elementos combustibles (García et al., 2014). El calor de combustión es obtenido mediante la combustión completa del combustible siendo consumida toda su masa. El calorímetro de bomba de oxígeno proporciona el calor de combustión total, lo que significa que toda el agua en los productos de combustión está en estado líquido (Rivera et al., 2012). Este es el

caso ideal, sin embargo, al restar el calor que se consume al evaporar el agua se llama calor neto de combustión. Para calcularlo hay relaciones en la literatura ya que no puede determinarse experimentalmente. El calor neto de combustión también considera que el combustible se consume por completo y existe combustión completa. Este no es el caso en la realidad de los procesos de combustión.

Un parámetro más adaptado a la realidad es el calor de combustión efectivo (EHC). [Van Dyken et al. \(2010\)](#) define el calor de combustión efectivo como el calor neto de la combustión que resta la energía de evaporar el contenido de humedad de la biomasa. El Calorímetro de cono estándar define el EHC como la cantidad de calor generado por unidad de masa perdida por un material, cuando se expone a condiciones específicas de prueba de fuego.

En resumen el EHC no es una propiedad termodinámica, depende de las condiciones experimentales, no es necesario considerar la combustión completa, no toda la masa debe consumirse en la reacción de combustión y no debe ser constante. Para el presente estudio se calculó el calor efectivo de combustión experimentalmente con el SCALA.

La eficiencia de la combustión es la relación entre el calor de combustión efectivo y el calor neto de combustión. El calor neto de combustión comúnmente se calcula a partir de las composiciones de elementos de combustión basadas en el calor de combustión total. Esto conduce a obtener el calor neto de combustión dependiente del método utilizado para el cálculo. Para evitar esta dependencia, se utilizó el calor de combustión para calcular la eficiencia de la combustión ([Volkwein, 2016](#)). Entonces la ecuación 2.12 se usa para calcular la eficiencia de combustión.

$$\eta = \frac{EHC}{\Delta h_c} \quad (2.12)$$

El EHC se calcula con la tasa de liberación de calor obtenida a partir del método SER y la tasa de pérdida de masa. La tasa de liberación de calor se divide por la tasa de pérdida de masa y se traza en función del tiempo. Entonces el EHC se calcula con la siguiente ecuación 2.13.

$$EHC = \frac{\dot{Q}_{SER}(t)}{\dot{m}(t)} \quad (2.13)$$

En este caso, al no contar con las mediciones de masa en función del tiempo, se mide esta al comienzo y al final de la medición determinando así la cantidad de combustible consumido. Por otro lado, el calor

liberado debe ser integrado a lo largo del proceso de combustión.

2.3. Calorimetría

Existe una amplia información en la literatura acerca de calorímetros desarrollados a lo largo del tiempo. Estos calorímetros emplean diferentes técnicas para determinar las tasas de liberación de calor de los combustibles. Cada técnica tiene sus virtudes y debilidades y se adecuan en función del estudio que desea ser realizado. Esta es una buena razón para utilizar varios métodos.

Los calorímetros se usan para determinar el comportamiento del fuego y diferentes parámetros relacionados con la combustión de materiales y también se usan comúnmente para evaluar la inflamabilidad de los materiales ([ASTM E2058-03, 2003](#)). Los parámetros típicos determinados con calorímetros de fuego son ([ASTM E1354-11b, 2011](#)); ([ASTM E2058-03, 2003](#)); ([ASTM E906 / E906M-10, 2010](#)):

- Tasa de liberación de calor
- Tiempo de ignición
- Tiempo de llama
- Tasa de pérdida de masa previo y posterior a la ignición
- Máximos de liberación de calor
- Energía total liberada
- Calor de combustión efectivo
- Altura de llama
- Estimación de propiedades de los materiales

El calculo de estos parámetros dependerá de las capacidades del equipo. En la siguiente sección serán detallados los métodos utilizados para medir la tasa de liberación de calor en el SCALA.

2.4. Principios de operación del SCALA

Existen diferentes métodos para medir la tasa de liberación de calor de los materiales quemados. Los métodos más comunes disponibles en la literatura basados en la selección realizada por Babrauskas (1986) y Janssens (1995) son los siguientes:

- Método de la diferencia de entalpía sensible SER.

Este método se basa en la medición de las temperaturas de los gases de combustión en el ducto de escape a un flujo de aire constante. El aumento de entalpía determina la tasa de liberación de calor de la muestra en combustión (Babrauskas, 1986); (Janssens, 1995).

Para la utilización de este método se mantiene constante la temperatura de los gases de escape, logrando un estado estacionario en el equipo. Luego, al ingresar el combustible, un aumento en la temperatura de los gases, es decir, un cambio en el estado estacionario, será ocasionado por la liberación de calor a partir de la combustión de la muestra.

- Método de consumo de oxígeno.

Existe una relación entre el consumo de oxígeno en una reacción de combustión y la tasa de liberación de calor del combustible. Es necesario determinar la cantidad de oxígeno eliminado de la corriente de combustión (Babrauskas, 1986); (Janssens, 1995).

- Método de la evolución del dióxido de carbono y monóxido de carbono.

Es similar al método de consumo de oxígeno. En este caso, se controla la producción de CO_2 y CO . Existe una relación en la producción de estos gases y la tasa de liberación de calor del combustible (Babrauskas, 1986).

- Método de altura de llamas de incendios de combustión libre.

Este método estima la velocidad de liberación de calor y otras propiedades de la muestra en base a las alturas de la llama. Se usa en fuegos de combustión libre (Babrauskas, 1986).

- Método de la tasa de pérdida de masa.

La velocidad de liberación de calor se determina conociendo el calor de la 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 (Volkwein, 2016).

En el presente trabajo serán desarrollados dos de los cinco métodos presentados: diferencia de entalpía (SER) y consumo de oxígeno (OC), los cuales serán explicados más en detalle en las secciones siguientes.

2.4.1. Método de diferencia de entalpía sensible (SER)

Este método se basa en el aumento de la temperatura de una corriente de aire continuo que pasa a través de la cámara de combustión. El aumento de entalpía y el índice de flujo de masa de aire determinan la tasa de liberación de calor de la materia en combustión. Suponiendo un volumen de control como se describe en la figura 2.1.

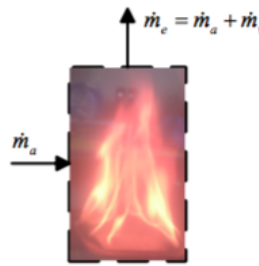


Figura 2.1: Balance de masa.

El flujo de masa \dot{m}_a es el aire que entra al sistema. El combustible se vaporiza a una velocidad \dot{m}_v . Parte del flujo de masa que entra al sistema está involucrado en la reacción de combustión. Por lo tanto, los gases de salida \dot{m}_e es la suma del flujo de aire de entrada y los vapores generados (Volkwein, 2016). Janssens (1995) define la velocidad de liberación de calor de una reacción de combustión en un volumen de control con la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} - \dot{Q}_{loss} = C_p \dot{m}_e (T_e - T_0) - C_p \dot{m}_a (T_a - T_0) - C_p \dot{m}_v (T_v - T_0) \quad (2.14)$$

Donde el término \dot{Q} es la tasa de liberación de calor (kW) de la reacción de combustión. C_p es el calor específico ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), T_e es la temperatura de los productos de la 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), T_0 es la temperatura de referencia (K). La pérdida de calor al entorno \dot{Q}_{loss} es la componente radiativa 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 lleva a que la ecuación anterior quede de la siguiente forma:

$$\dot{Q} - \dot{Q}_{loss} = C_p \dot{m}_a (T_e - T_a) \quad (2.15)$$

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

$$\chi_r = \frac{\dot{Q}_{loss}}{\dot{Q}} \quad (2.16)$$

El término χ_r es la proporción de las pérdidas de calor (o fracción de radiación) de la tasa total de liberación de calor de la llama. Reemplazando la ecuación 2.16 en la ecuación 2.15 se obtiene:

$$\dot{Q} = \frac{C_p \dot{m}_a}{1 - \chi_r} (T_e - T_a) \quad (2.17)$$

$$\dot{Q} = K(T_e - T_a) \quad (2.18)$$

Donde K es el factor de calibración que puede ser determinado experimentalmente. Si hay un calentador en la cámara de combustión la ecuación 2.18 sigue siendo válida, y T_a se reemplaza con una temperatura de referencia (Volkwein, 2016). La temperatura de referencia es la temperatura de estado estacionario de los gases de escape mientras están encendidos los calentadores. Si χ_r se establece en cero, entonces la ecuación 2.17 se convierte en la ecuación 2.19:

$$\dot{Q}_{conv} = C_p \dot{m}_a (T_e - T_a) \quad (2.19)$$

Donde \dot{Q}_{conv} ahora solo representa la componente convectiva del calor liberado por la llama. Si se usa la ecuación 2.19, entonces la tasa de liberación de calor será subestimada. Incluir el término χ_r en la ecuación lleva a considerar las pérdidas de calor al entorno, pero χ_r se supone constante e igual para el combustible de calibración y para todos los combustibles (Volkwein, 2016).

2.4.2. Método de consumo de oxígeno (OC)

En esta sección se explicará el método para conocer la tasa de liberación de calor a partir del consumo de oxígeno y el flujo de aire involucrado. Se basa en el concepto de que hay una cantidad de energía constante liberada por unidad de masa de oxígeno consumida en combustión. Esta relación fue encontrada por Thornton (1917) para una lista de materiales orgánicos. La constante de energía es $13.1 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ para el 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 2.20:

Si se conoce el calor de combustión del combustible en combustión y su relación estequiométrica de oxígeno a masa de combustible, entonces el calor producido por unidad de masa de oxígeno consumido, viene dado por la relación entre dichas variables (Parker, 1984). Así el cálculo de la tasa total de liberación de calor por consumo de oxígeno adquiere una forma particularmente simple:

$$\dot{Q}_{OC} = (X_{oi}V_i - X_{oj}V_j)E \quad (2.20)$$

Si se cumplen las siguientes condiciones:

1. El flujo de aire que entra al sistema, así como el que sale son posibles de medir.
2. La concentración de oxígeno en el conducto pueda ser medida por el analizador.
3. La concentración de CO y otras especies parcialmente oxidadas en el conducto de escape puede despreciarse.

Otra forma de ver esta ecuación de forma más práctica es la siguiente:

$$\dot{Q}_{OC} = E\Delta\dot{m}_{O_2} \quad (2.21)$$

Donde E es la constante de energía, \dot{m}_{O_2} es la tasa de oxígeno consumida en la combustión y \dot{Q}_{OC} es la tasa de liberación de calor. En la combustión incompleta algunas moléculas de O_2 reaccionan con el carbono y forman monóxido de carbono. Por lo tanto, en la combustión incompleta es necesario considerar la cantidad de energía necesaria para oxidar el monóxido de carbono en dióxido de carbono. Esta cantidad de energía debe ser restada a la ecuación original (Biteau et al., 2008). Tener en cuenta la cantidad de CO producida

durante la combustión permite obtener resultados más certeros. [Parker \(1984\)](#) propuso varias ecuaciones para determinar la tasa de liberación de calor en diferentes escenarios. Estas ecuaciones incluyen parámetros como la presencia de nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y vapor de agua en el aire. [Chow y Han \(2011\)](#) hicieron una compilación de ecuaciones para diferentes mediciones de especies y también incluyen la producción de hollín en las ecuaciones.

En el presente trabajo el cálculo será según el utilizado por [Filipczak et al. \(2005\)](#) mediante una constante de calibración obtenida experimentalmente. Este se basa en el procedimiento de calibración del OSU para la configuración A ([ASTM E906 / E906M-10, 2010](#)). Con este método, las constantes se agrupan en una constante que se determina experimentalmente durante el proceso de calibración. Así con la constante de calibración y las concentraciones de oxígeno se puede calcular la tasa de liberación de calor:

$$\dot{Q}_{OC} = K_{OC}(C_{O_2}^A - C_{O_2}^0) \quad (2.22)$$

Las concentraciones de oxígeno $C_{O_2}^A$ y $C_{O_2}^0$ son expresadas en porcentaje, donde el primer termino es la concentración de oxígeno en el analizador durante la prueba y el segundo es la concentración del estado estacionario previo a la ignición de la muestra. Ya que el equipo de medición TDLA proporciona los datos de concentración en fracción molar (PPMM) es necesario hacer el cambio de $C_{O_2}^A$ y $C_{O_2}^0$ por las variables $X_{PPMM}^A \cdot 10^{-4} \cdot L^{-1}$ y $X_{PPMM}^0 \cdot 10^{-4} \cdot L^{-1}$ respectivamente obteniendo la ecuación:

$$\dot{Q}_{OC} = K_{OC} \frac{X_{PPMM}^A - X_{PPMM}^0}{10^4 L} \quad (2.23)$$

2.5. Diseño Experimental

2.5.1. Principales sistemas operativos del calorímetro

Los principales sistemas operativos del SCALA son el suministro de aire y el suministro de calor por medio de los radiadores. Estos sistemas proporcionan al calorímetro la posibilidad de realizar diferentes escenarios experimentales. El sistema de suministro de aire ofrece la posibilidad de diferentes flujos de aire y los calentadores radiantes difieren en los flujos de calor incidente.

2.5.1.1. Sistema de suministro de aire

El sistema de suministro de aire consiste en una turbina de aire conectada por la parte inferior de la cámara de combustión y por la parte superior (ducto de escape) se encuentra conectado a un extractor de aire. El sistema se encarga de proporcionar el suministro total del aire en el aparato. El ventilador es un Turbo 250 fabricado por Blauberg de las siguientes especificaciones:

Tabla 2.3: Especificaciones Turbo 250.

Velocidad	Potencia, W	Capacidad, $m^3 \cdot h^{-1}$	r.p.m.
máximo	188	1350	2690
mínimo	140	1160	2360

El ventilador tiene dos velocidades según la configuración de fábrica, pero ha sido equipado con un regulador de voltaje. El suministro de aire se puede regular cambiando el voltaje de entrada. La tubería que conecta el ventilador con el aparato tiene un diámetro externo de 300. Se ha utilizado una sección de reducción para conectar el ventilador con la tubería. La elección del ventilador se determinó principalmente por el flujo de operación, además de otras variables (Volkwein, 2016). El que fue calculado para lograr un flujo de $0,048 m^3 \cdot s^{-1}$.



Figura 2.2: Turbo 250.

Las mediciones de flujo fueron realizadas por Volkwein (2016) con un tubo de Pitot. Las mediciones fueron realizadas en la sección final de la tubería, permitiendo que el flujo desarrolle su perfil de velocidad a lo largo de la tubería. La sección transversal se divide en 7 puntos a lo largo del eje z. El tubo de Pitot se coloca en la posición de cada punto, según aparece en la figura 2.3, y se registra la velocidad durante 10 segundos. Las velocidades registradas son promediadas en el tiempo y luego multiplicadas por el área correspondiente. La suma de los flujos da el flujo total.

El flujo promedio de aire es $0,051 m^3 \cdot s^{-1}$, con una desviación estándar relativa de 1,63 % y fue calculado por Volkwein (2016) a lo largo de 3 meses utilizando la metodología descrita.

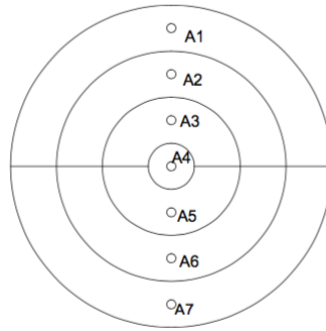


Figura 2.3: Sección transversal de la tubería con las posiciones donde fue medido el flujo de aire.
(Fuente: Volkwein (2016))

El flujo de aire puede variar debido a las caídas de presión generadas debido principalmente a las pérdidas de aire hacia el entorno. Todos los experimentos realizados en este trabajo fueron a flujo máximo.

2.5.1.2. Radiant heaters

El SCALA cuenta con una fuente de calor radiante capaz de proporcionar un flujo constante sobre la muestra de hasta $50,3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Se cuenta con dos paneles de calentadores, lo que a su vez cuentan con 2 resistencias tipo *U* de carburo de silicio (*SiC*) cada uno. Dichas resistencias fueron fabricadas por Zhengzhou LEPE Refractory Materials Co., LTD. y se muestran en la figura 2.4 cada una con una resistencia nominal de $4,1 \Omega$. Esto se calcula midiendo el voltaje y la corriente de los elementos cuando alcanzan una temperatura superficial de $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Volkwein (2016) muestran los cálculos realizados para determinar la resistencia nominal de los elementos de calentamiento. Un termopar de tipo K se conecta a la superficie de los elementos de calentamiento para controlar la temperatura de la superficie.



Figura 2.4: Resistencias de carburo de silicio tipo *U*.
(Fuente: Volkwein (2016))

La figura 2.5 muestra el diseño de los calentadores en el SCALA. El diseño procura mantener los elementos de calentamiento sin aplicarles mucha presión y dirigir el calor en una sola dirección. Esto se logró

utilizando manta de fibra de cerámica refractaria y tablas de fibra cerámica. Ambos tipos de fibra cerámica tienen un grosor de 25 mm. La manta de fibra cerámica es Kaowool HP 1260. Tiene una densidad de $96 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ y una conductividad térmica de $0,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (CarboChile, 015b). El tablero es fabricado por Morgan Thermal Ceramics, modelo Ceraboard 100 con una densidad de $310 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ y una conductividad térmica a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ de $0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Ambos tipos permiten una temperatura máxima de $1260 \text{ }^\circ\text{C}$.

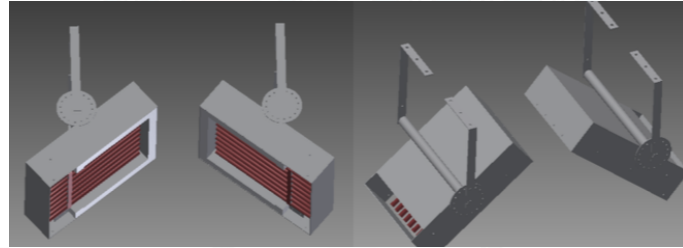


Figura 2.5: Diseño de los calentadores.

(Fuente: Volkwein (2016))

La conexión eléctrica de los elementos de calentamiento se realiza con materiales de alta resistencia a la temperatura. La conexión con los elementos de calentamiento $S;C$ se realiza con trenzas de conexión especialmente hechas para ellos. Estas trenzas de conexión soportan altas temperaturas y no se oxidan ni deterioran a lo largo del tiempo.

La temperatura de la superficie de la resistencia se controla regulando la potencia suministrada a los calentadores. Esto se hace usando un regulador de voltaje. Cada par de resistencias está en conexión en serie y está conectado a un regulador de voltaje, figura 2.6, y luego conectado a la fuente de alimentación de 9,59 kW (Volkwein, 2016). Los reguladores operan en una escala de 0 a 100 donde el valor mínimo equivale a 0 V y el máximo a 220 V, sin embargo, la escala presente en los reguladores no es lineal y debe ser medida experimentalmente.

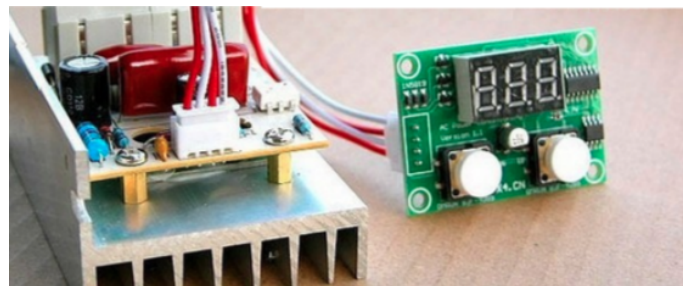


Figura 2.6: Regulador de voltaje.

(Fuente: Volkwein (2016))

La relación entre el suministro de la intensidad de corriente total de los calentadores (A) y el flujo de calor incidente en la muestra tiene una relación lineal entre ambas variables en el rango de 35 A y 68

A con un coeficiente de determinación de 99,38 %. También existe una relación lineal entre la potencia suministrada a los calentadores y el flujo de calor incidente sobre las muestras en un rango entre 1,9 kW y 9,6 kW con un $R^2 = 99,09\%$ según Volkwein (2016). Estas relaciones es posible observarlas en las siguientes ecuaciones:

$$I_{suministrada} = 0,97\dot{q}_{inc} + 20,1 \quad (2.24)$$

$$P_{suministrada} = 0,21\dot{q}_{inc} - 1,36 \quad (2.25)$$

Dado que el valor de resistencia nominal tiene una variabilidad debido a errores de fabricación, los valores de la pantalla del regulador de voltaje no son los mismos para todos los pares de elementos de calentamiento de S_iC para producir la misma potencia. Por lo tanto, los valores del regulador de voltaje y el flujo de calor externo incidente se determinaron experimentalmente y fueron tabulados por Volkwein (2016), tabla 2.4, de modo que todos los elementos de S_iC combinen la potencia lo más similar posible entre ellos.

Tabla 2.4: Configuración de los reguladores de voltaje para distintos flujos de calor.

Regulador, %	Potencia, kW	Corriente, A	Radiación incidente, $kW \cdot m^{-2}$
(63,57,62,58)	9,59	68,1	50,3
(57,53,55,53)	7,45	60,4	42,3
(56,52,54,52)	7,26	59,5	39,5
(53,50,52,50)	6,59	57,2	38,9
(52,49,51,49)	6,29	55,9	37,0
(52,48,50,48)	6,15	55,8	36,6
(46,43,44,43)	4,82	50,3	30,6
(40,37,40,39)	4,06	47,2	26,1
(36,33,35,33)	2,84	39,8	20,8
(32,30,32,31)	2,12	34,8	15,9

Donde la nomenclatura del regulador sigue la configuración (x, y, w, z) y cada una corresponde a:

- x: regulador de voltaje del par de resistencias ubicado en la parte frontal del aparato, calentador izquierdo.
- y: regulador de voltaje del par de resistencias ubicado en la parte posterior del aparato, calentador izquierdo.

- w: regulador de voltaje del par de resistencias ubicado en la parte frontal del aparato, calentador derecho.
- z: regulador de voltaje del par de resistencias ubicado en la parte posterior del aparato, calentador derecho.

2.5.1.3. Sample holder

El recipiente sobre el que son ingresadas las muestras de combustible al equipo fue fabricado a partir de malla de harnero galvanizada con una cubierta de aluminio. Las dimensiones del basquet fueron teniendo en consideración los volúmenes de las muestras con las cuales se iba a experimentar y procurando no interrumpir en la flujo de calor incidente, así se determino que fuera de 12x12x2 según se muestra en la figura 2.7.

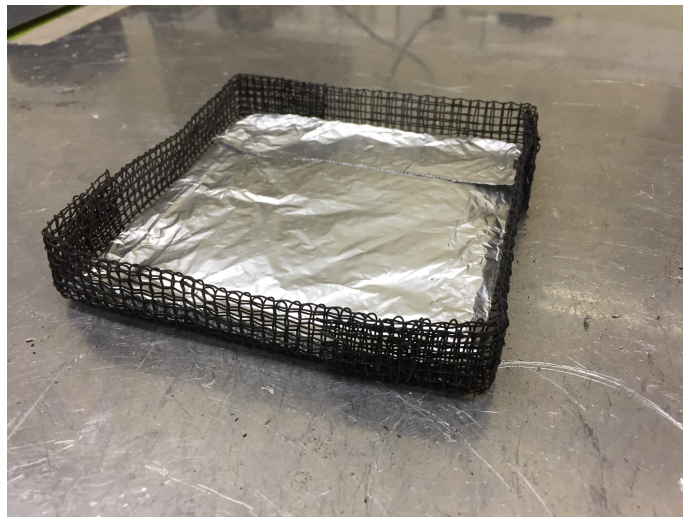


Figura 2.7: Sample Holder.

2.5.2. Sistemas de medición

Los sistemas de medición son aquellos sistemas de los cuales se extrae la información necesaria para su posterior análisis. Durante el desarrollo experimental del presente trabajo fueron utilizados diferentes sistemas como termopares para el registro de las temperaturas, TDLA para medir concentración de oxígeno, videocámara para obtener un registro audiovisual de los experimentos, balanza de precisión y radiómetro para medir los niveles de radiación sobre las muestras.

2.5.2.1. Termocuplas

Se utilizan termopares tipo K de 0,5 mm de diámetro que son adheridos a zonas específicas del SCALA. Tres termopares son posicionados en la parte superior del conducto de escape, dos en los costados y uno en el centro, para medir la temperatura de los gases de escape. Los tres perfiles obtenidos por los termopares son promediados para obtener un perfil homogéneo de las temperaturas de los gases provenientes de la cámara de combustión. Los datos obtenidos por estos tres medidores son los utilizados por el método SER para el cálculo de las tasas de liberación de calor.

Un termopar más se encuentra sujeto a la pared metálica externa del conducto de extracción de los gases, a la misma altura que el TDLA en la parte superior del equipo por dos razones:

- Para conocer la influencia de la temperatura del metal en los gases de escape y los 3 termopares en la parte superior. Si la temperatura del conducto metálico es más alta que la temperatura de los gases de escape y, por lo tanto, la temperatura de los 3 termopares, la temperatura de los gases y de los termopares aumentará. En otras palabras, si se está ejecutando un experimento y la pared de metal se calienta a altas temperaturas y luego la velocidad de liberación de calor de la muestra disminuye, entonces las lecturas del termopar del conducto disminuirán más lentamente que la disminución de la HRR. Esto se debe a la inercia térmica de las paredes de metal y conduce a cálculos de HRR incorrectos (Volkwein, 2016).
- Para saber la temperatura cerca de los sensores del TDLAS, para asegurarse de que estén dentro del rango de funcionamiento.

También hay termopares ubicados en las camisas de aire de los termopaneles en los costados de la cámara de combustión, en la entrada del suministro de aire y en la superficie de los calentadores. Estos últimos aislados con fibra de vidrio para soportar altas temperaturas y con un diámetro de 1 mm.

Los termopares se conectan a los DAQ. Existen dos DAQ, uno para los termopares y otro universal. Los DAQ son módulos QuantumX fabricados por HBM. La interfaz utilizada para ver y registrar estos datos en tiempo real es el software Catman Easy, el que es capaz de graficar un valor cada 0,5 segundos. En la figura 2.8 se muestra la interfaz del software desde donde luego son exportados los datos en formato .xlsx para su posterior análisis en Microsoft Excel.

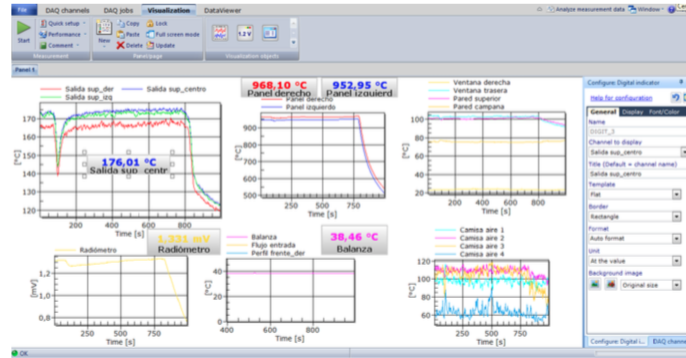


Figura 2.8: Catman Easy.

2.5.2.2. Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLA)

La espectrometría de absorción de láser de diodo sintonizable (TDLA) es una técnica para medir la concentración de ciertos gases en una mezcla gaseosa utilizando la atenuación de un láser a cierta longitud de onda. Se basa en la medición de la extinción de un haz de luz por ciertas especies gaseosas. En esta técnica se mide la intensidad del haz antes y después de la interacción con una muestra. Este fenómeno es posible gracias a los perfiles de absorción y de emisión singulares de cada especie, en este caso el del oxígeno (figura 2.9).

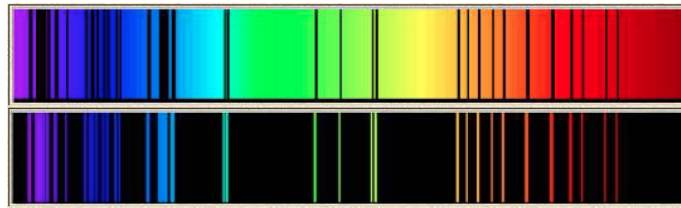


Figura 2.9: Perfil de absorción y emisión del oxígeno.

El enfoque aquí es en una sola línea de absorción en el espectro de absorción de una especie particular de interés. Para comenzar con la longitud de onda de un diodo láser se sintoniza una determinada línea de absorción de interés y se mide la intensidad de la radiación transmitida. La intensidad transmitida puede estar relacionada con la concentración de las especies presentes en la ley Beer-Lambert. Así la técnica TDLA se basa en la ley Beer-Lambert (Howell et al., 2010) presentada en la ecuación 2.26.

$$I_{\lambda}(L) = I_{\lambda}(0) \exp^{-\kappa(\lambda)L} \quad (2.26)$$

Donde λ es la longitud de onda de la fuente de luz, $I_{\lambda}(0)$ es la intensidad inicial de la radiación, $I_{\lambda}(L)$

es la intensidad de la radiación después de la distancia L y κ_λ es el coeficiente de absorción del medio.

En el empleo de este método se utiliza el aparato Spectra-1 fabricado por PKL Technologies Inc. El TDLA consiste en el DAQ y dos módulos más, uno el que genera el rayo láser y otro el receptor del rayo. Estos dos se encuentran montados en el mismo camino óptico. Siendo precisos el rayo se genera en el DAQ y es transmitido por una fibra óptica especializada para la longitud de onda al módulo emisor (figura 2.10).



Figura 2.10: TDLA Spectra-1.

El software del Spectra-1 se utiliza para ver y registrar los datos en tiempo real que luego son exportados en formato .txt para ser analizados en Microsoft Excel. La intensidad de la señal del equipo debe estar entre el 30 % y 80 % según las especificaciones del equipo (Inc., 2015). También existe la posibilidad de registrar los datos en ppm o ppmm, cuya relación esta dada por la ecuación 2.27.

$$PPM = \frac{PPMM}{L} \quad (2.27)$$

Donde L se calcula experimentalmente dejando que el Spectra-1 grave por un determinado tiempo en diferentes ocasiones. Luego los valores son promediados y divididos por el PPM del oxígeno. El valor calculado es 0,322 con una desviación estándar de 0,87 % (Volkwein, 2016).

2.5.2.3. Cámara

Las mediciones fueron todas grabadas con una cámara Sony Action Cam HDR-AS50 compacta capaz de grabar a una resolución de 1920x1080 60p/50p, con lente tipo ZEISS Tessar, velocidad de obturación 1/30-1/10.000 (30 fps) y sensor Exmor R CMOS retroiluminado de tipo 1/2,3 (7,77 mm). Velocidad de grabación:



Figura 2.11: TDLA Spectra-1 interfaz.

mp4 PS: Aprox. 28 Mbps/HQ; Aprox.16 Mbps/STD; Aprox. 6 Mbps/HS120 (HS100); Aprox. 28 Mbps, XAVC S 60p/30p/24p, aprox. 50 Mbps; 50p/25p, aprox. 50 Mbps.

2.5.2.4. Balanza

Para realizar las mediciones de masa de las muestras se utilizó una balanza electrónica Shimadzu UW620HV capaz de soportar un máximo de 620 g de peso con una precisión de 0,001 g, temperatura de operación entre 5 y 40 °C y humedad de funcionamiento entre 30 % y 85 % de humedad ambiente.

2.5.2.5. Radiómetro

Fue utilizado un radiómetro Medtherm Schmidt-Boelter modelo GIW-10-32-485A enfriado por agua para determinar el flujo de calor incidente sobre el área de la muestra, el cual es capaz de medir de 0 a 100 kW/m^2 .

Las configuraciones de radiación fueron registradas previamente como se muestran en la tabla 2.4 dada las distintas regulaciones de voltaje de los radiadores. El radiómetro se dispone en el centro del lugar donde va la muestra. Luego el software Catman registra los datos del radiómetro en mV por lo que es necesario un factor de conversión propio del equipo empleado. Para este caso según las especificaciones del producto el factor es $4,926 kW/m^2mV$.

3 | Metodología

3.1. Calibración

Dada las ecuaciones utilizadas para determinar las tasas de liberación de calor durante el presente trabajo, ya sea por diferencia de entalpía sensible o por consumo de oxígeno, es necesario determinar una constante de calibración, la que debe ser obtenida experimentalmente en el SCALA. Dichas constantes de calibración englobarán aquellas pérdidas de calor propias de los equipos empleados y niveles de oxígeno en las cuales son tomadas las mediciones.

El procedimiento para el cálculo de dichas constantes de calibración son descritas por separado en las siguientes secciones.

3.1.1. Diferencia de entalpía sensible

La constante de calibración empleada en el calculo de las tasas de liberación de calor (HRR) por el método SER se basa en el procedimiento descrito para el calorímetro OSU (Volkwein, 2016). En el cálculo de la constante se utilizará un quemador y gas de etileno dispuesto en el lugar donde irán las muestras. Se utiliza etileno ya que puede ser regulado el flujo del suministro y además sus propiedades ya son conocidas, con un calor de combustión de $47,2 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ y densidad $1,19 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (ToolBox, 2016). Los calentadores se prenden y se dejan en una configuración en la cual emitan $20 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ de flujo radiativo incidente sobre el quemador. Esto para acercar las condiciones a las cuales va a operar el SCALA, pero que a la vez no produzca daños en el quemador.

Para comenzar se pone en marcha el extractor de aire que retirará los gases por la parte superior del SCALA y la turbina de aire que inyectará un flujo constante de aire al equipo por la parte inferior. Luego

se enciende el software que registra los datos de los termopares y se programan los reguladores de voltaje de la parte posterior del SCALA para que los radiadores queden a una radiación incidente de $20 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ sobre el lugar donde iría la muestra. Con los radiadores encendidos se espera hasta que la temperatura dentro del equipo llegue a un estado estacionario, es decir, que las pérdidas de calor se equilibren con la radiación producida por los calentadores y la temperatura de los gases que abandonan el equipo no varíe. Cuando esto ocurre se introduce el quemador de etileno el cual está conectado a un flujómetro que regulará el paso de cierto caudal de combustible. La temperatura del equipo en estado estacionario, una vez encendido el quemador a $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, fija la línea base para el cálculo de las tasas de liberación de calor ya que cualquier cambio en las temperaturas registradas de los gases de escape será ocasionada por la energía proporcionada por la combustión de la diferencia de etileno inyectada al sistema por unidad de tiempo.

Con la disposición del equipo lista y funcionando se procede a la toma de datos para determinar la constante de calibración para este método. Se establece el flujo de etileno en $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ y se enciende. Es necesario esperar hasta que la temperatura interna llegue a su estado estacionario para luego proceder a variar los niveles de etileno subiendo y bajando su caudal. Así se hará 5 veces procurando que cada configuración tenga una duración de 2 minutos como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: HRR en función de la variación de flujo de etileno para el procedimiento de calibración.

Tiempo, min	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Flujo, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	1	3	1	4	1	5	1	4	1	3	1
HRR, kW	0,94	2,81	0,94	3,74	0,94	4,68	0,94	3,74	0,94	2,81	0,94
Effective HRR, kW	0	1,87	0	2,81	0	3,74	0	2,81	0	1,87	0

De esta forma se obtienen los HRR respectivos y el HRR efectivo el cual es calculado a partir del valor referencial de $0,94 \text{ kW}$ ($1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$). La temperatura utilizada por nivel de caudal será un promedio de los últimos 10 segundos registrados por los termopares de los gases en el conducto de escape. Luego se calcularán las constantes de calibración K_i para los 5 cambios de flujo realizados según la ecuación:

$$(\dot{m}_i - \dot{m}_{base})\Delta h_c = K_{SER,i}(T_i - T_{base}) \quad i \in (3, 4, 5, 4, 3) \quad (3.1)$$

Finalmente, se procede a promediar las 5 constantes previamente calculadas lo que se convertirá en la constante de calibración K_{SER} :

$$K_{SER,W} = \frac{\sum_{i=1}^5 K_{SER,i}}{5} \quad (3.2)$$

De acuerdo con en el estándar OSU, la desviación estándar relativa de las 5 constantes debe ser inferior al 5 % (Volkwein, 2016). A continuación se encuentra una gráfica de cómo debe ser el comportamiento de dichas curvas:

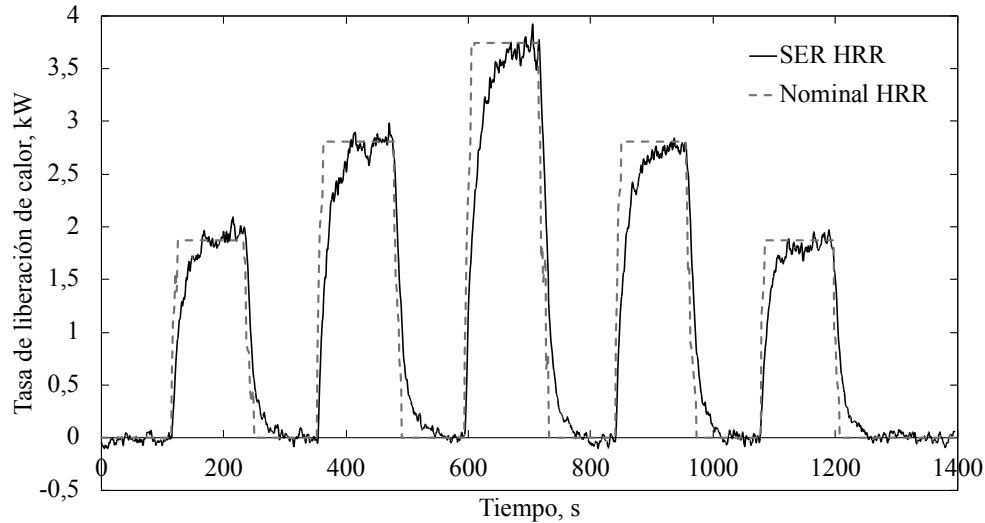


Figura 3.1: HRR de calibración para el método SER.

3.1.2. Consumo de oxígeno

La constante de calibración para el método de consumo de oxígeno se calcula de la misma forma. La única diferencia es que se emplean los datos obtenidos a partir del software Spectra el cuál registra la concentración de oxígeno en el conducto de escape del SCALA mediante un TDLA. En este caso el estado estacionario corresponderá a cuando los niveles de oxígeno en los gases de salida se estabilicen. Las ecuaciones para el cálculo de la constante de calibración son las siguientes:

$$(\dot{m}_i - \dot{m}_{base})\Delta h_c = K_{OC,i}(C_i - C_{base}) \quad i \in (3, 4, 5, 4, 3) \quad (3.3)$$

$$K_{OC,w} = \frac{\sum_{i=1}^5 K_{OC,i}}{5} \quad (3.4)$$

En el gráfico a continuación se muestra como debería ser el comportamiento de la tasa de liberación de calor a partir del consumo de oxígeno durante la calibración:

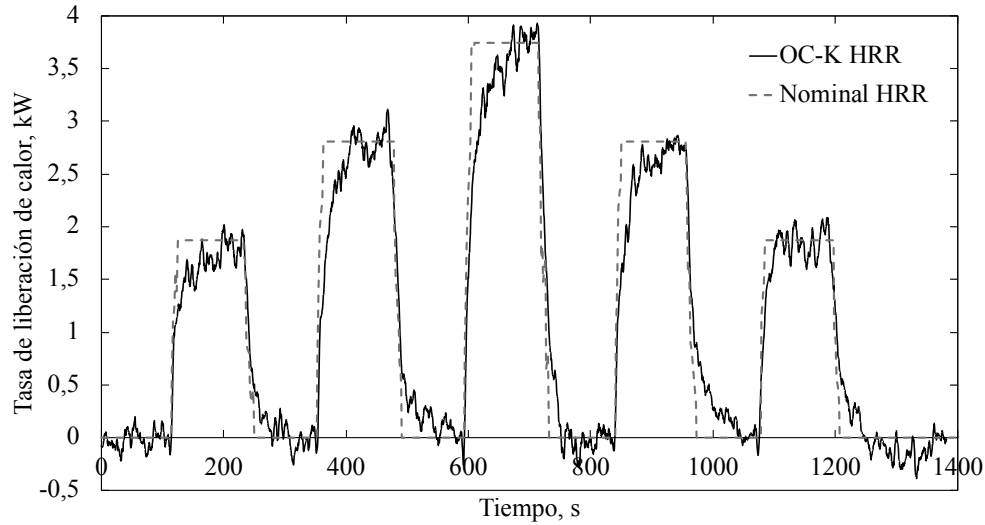


Figura 3.2: HRR de calibración para el método OC.

3.2. Procedimiento experimental

En el desarrollo experimental del presente trabajo se llevaron a cabo más de 110 experimentos con el fin de medir los tiempos de ignición, tasas de liberación de calor por los métodos OC y SER, calor real liberado en la combustión de las muestras, máximas tasas de liberación de calor, tiempo de llama y cantidad de cenizas.

3.2.1. Descripción general

Durante las campañas experimentales realizadas el material empleado fue tomado siempre del mismo lugar, que para el caso fue el Embalse de la Luz en Curauma, Chile. Las agujas de pino fueron tomadas directamente del lecho del bosque, mientras que las hojas de eucalipto y las ramas utilizadas fueron retiradas del mismo árbol. Todo el material biomásico fue previamente tratado y caracterizado como se describirá en las secciones siguientes.

Una vez la materia combustible se encuentra preparada para las mediciones se continúa con el procedimiento experimental en el aparato SCALA. Para utilizar el SCALA primero es necesario instalar ciertos componentes que son retirados al final de cada jornada experimental como la turbina de aire y la cámara de vídeo. Luego se pone en marcha el sistema de enfriamiento, extracción de aire, calentadores y los software de monitoreo y registro de los datos. Ya cuando el sistema ha alcanzado su estado estacionario se

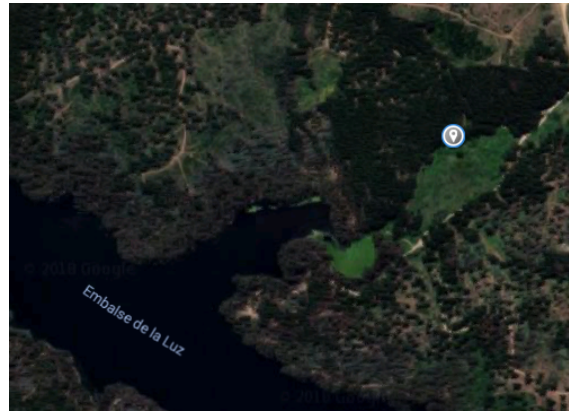


Figura 3.3: Ubicación geográfica de donde fueron recogida las muestras.

puede seguir con la toma de mediciones.

Para tomar las mediciones se prepara la muestra colocando la biomasa en un canastillo metálico (sample holder), fabricado en el mismo laboratorio, que es pesado y luego introducido por la parte posterior del calorímetro. Los calentadores, gracias a la radiación incidente sobre la muestra, encenderán el combustible hasta que sea consumido en su totalidad. Ya concluido el proceso de combustión se detiene la toma de datos y se retira la muestra para registrar el estado final de la muestra.

Ya finalizada el registro de las mediciones los datos de cada uno de las repeticiones deben ser procesados en Excel para su posterior análisis.



Figura 3.4: SCALA en operación.

3.2.2. Preparación de la muestra

Cuando el combustible es obtenido desde la zona de extracción se transporta en bolsas plásticas hasta el laboratorio donde será tratado según el tipo. En el caso de las hojas de pino y de eucalipto estas deben ser arrancadas de las ramas procurando mantener su estructura, es decir, sin romperlas. Sólo son separadas y guardadas las hojas de dichas especies.

En el caso de las ramas de eucalipto estas son cortadas cada una en largos de 10 cm. procurando cuidar que las secciones mantengas una forma regular y lo más recta posible. Los cortes son efectuados con cierras manuales y tijeras de podar, con el fin de mantener la materia fuera del contacto con algún tipo de aceite o lubricante. Luego, mediante un pie de metro son medidos los diámetros de cada uno de los trozos y clasificados según d_i ($i = 2, \dots, 9$).



Figura 3.5: Sample holder con una muestra de ramas de eucalipto.

Cuando se cuenta con las materias primas ya seleccionadas pasan a un horno de convección Memmert UM 30 donde, en el caso de las hojas de pino se mantuvieron a 333 K durante 12 horas (Muñoz-Feucht et al., 2014) y para las hojas de eucalipto se llevo el mismo procedimiento luego de comprobar previamente que la pérdida de masa durante más horas de secado era despreciable. Por último, para las ramas de eucalipto se llevo el mismo proceso iterativo que para las hojas de eucalipto, donde se midió el peso de las muestras al cabo de cada hora de secado extra a partir de las 12 horas base, hasta alcanzar el punto donde la pérdida de masa por cada hora extra de secado fuera despreciable.

Para las ramas de eucalipto se tuvo especial cuidado con el diámetro de estas y se consideraron muestras de diferentes espesores, lo que obtuvo un tiempo de secado óptimo de 18 horas a 333 K para extraer todo el contenido de humedad del combustible. Sin embargo, se considera que al estar en contacto con la

intemperie la biomasa sufre un proceso de rehidratación que elevará el contenido de agua hasta niveles entre 1 % - 6 % de humedad (Santoni et al., 2015). Las muestras de pino y eucalipto una vez secas y clasificadas son guardadas en bolsas plásticas selladas herméticamente y mantenidas en compartimientos con ausencia de luz a la espera de su uso en el calorímetro.



Figura 3.6: Sample holder con una muestra de hojas de eucalipto.

El combustible previo al ingreso en el equipo es dispuesto en el sample holder donde es registrado el peso del recipiente y de la materia orgánica. Las hojas de pino y eucalipto son colocadas cuidadosamente para que estén enteras dentro del recipiente, no sobresalga ninguna de sus partes y cubran la totalidad de la superficie en la cual son contenidas. En caso que el tamaño de las hojas supere las dimensiones del sample holder estas son cortas con tijeras. Los trozos de ramas son ubicados ordenadamente en forma vertical y cubriendo la totalidad de la superficie del recipiente según se muestra en las figuras 3.5 3.6 3.7.



Figura 3.7: Sample holder con una muestra de hojas de pino.

3.2.3. Medición

Para comenzar con las mediciones en el SCALA, se parte instalando la cámara de vídeo y la turbina de aire en la parte inferior del aparato, luego se enciende el extractor de aire a su máxima potencia, y por último se encienden los radiadores configurándolos para que emitan $50,3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ de radiación sobre donde irían las muestras. Entonces el equipo se deja por aproximadamente 1 hora en estas condiciones, esto se hace para que el equipo aumente de temperatura rápidamente y alcance su estado estacionario en menor tiempo. Al cabo de la hora se configura el voltaje de los radiadores de acuerdo a la radiación requerida para el experimento a realizar y se espera hasta que la temperatura interna sea constante.

Cuando las temperaturas se estabilizan y el SCALA alcanza su estado estacionario, el equipo se encuentra listo para comenzar con la recolección de datos. Mediante dos software será posible extraer la información de las temperaturas y concentración de oxígeno de los gases de escape. Con el SCALA preparado y la muestra dispuesta para su ingreso al equipo, según se explicó en la sección anterior, se hacen correr los software Catman (termopares) y Spectra (TDLA), luego se comienza a grabar y con el uso de guantes térmicos se toma con pinzas metálicas la muestra que es introducida al equipo por la parte posterior, abriendo rápidamente la puerta, depositando dicha muestra en el centro de los flujos radiativos incidentes. El proceso de ingreso de la muestra al SCALA debe ser lo más breve posible para evitar que por culpa de la abertura de la puerta se pierda mucho calor y entre oxígeno extra lo cual puede ocasionar una distorsión en los resultados obtenidos.

Con la muestra depositada bajo los radiadores solo queda esperar a que producto de la radiación incidente se produzca la ignición de manera espontánea lo cual será registrado como un alza de la temperatura por los termopares y un descenso de la concentración de aire por el TDLA. En paralelo la grabación del suceso proporcionará información de los tiempos de ignición y el tiempo de llama de la muestra. Para finalizar la toma de datos se debe esperar a que la biomasa deje de flamear por completo y entonces se detienen la grabación y los softwares.

Cuando la muestra ya ha cesado de flamear y los equipos de medición han sido detenidos, mediante guantes térmicos y pinzas metálicas se procede a retirar el sample por la parte de atrás del equipo, el cual es depositado en un lugar separado hasta que termine de consumirse y se estabilice, lo que será apreciado cuando no exista una pérdida de masa evidente del combustible. Es entonces que en una balanza de precisión se pesa el sample y luego es limpiado desechando las cenizas obtenidas del experimento.



Figura 3.8: Muestra en el SCALA.

Este procedimiento es repetido desde la configuración de radiación mas alta desde la cual se desea hacer el análisis hasta la configuración en la que la biomasa no se produzca ignición espontánea en ninguna de las repeticiones. Para cada configuración se realizaron 3 pruebas, en el caso de los experimentos realizados con hojas de pino y eucalipto, y dos pruebas para los hechos con ramas de eucalipto.

3.2.4. Análisis de datos

El proceso de análisis de los datos requiere una depuración de lo obtenido en las mediciones hechas en el laboratorio. Para ello, se parte calculando los tiempos de ignición y de llama en cada uno de los experimentos lo cual puede ser determinado a partir del comportamiento de los registros entregados por los termopares o del TDLA, sin embargo, se privilegia la observación directa utilizando un cronómetro tal como [Babrauskas \(2002\)](#) recomienda. La obtención de estos tiempos es a partir de la observación de los vídeos.

Luego se sigue con la información entregada por el software Catman (termopares) el cuál entrega la temperatura de los gases de escape. El software genera un archivo por cada medición que se realiza el que es abierto en Excel y del cual se copian los datos de temperatura de los tres termopares situados en el ducto de escape, dos laterales y una central. Los datos de todos estos archivos generados por el Catman son condensados en un solo documento Excel, en el cual son ordenados según la medición a la que corresponden. Luego son promediadas las 3 temperaturas obtenidas por cada muestra resultando un único perfil de temperaturas que representa el comportamiento de ese experimento.

Ya con los perfiles de las temperaturas desarrollados, mediante una observación del gráfico de los

datos, se determina el punto de apertura del equipo y así poder sacar el promedio de la temperatura por experimento previo a esto. Esto es fácilmente apreciable debido a que al momento de ser abierta la puerta ocurre una disminución repentina en la temperatura interna, entonces se promedian todos los registros previos al punto de inflexión en el gráfico.

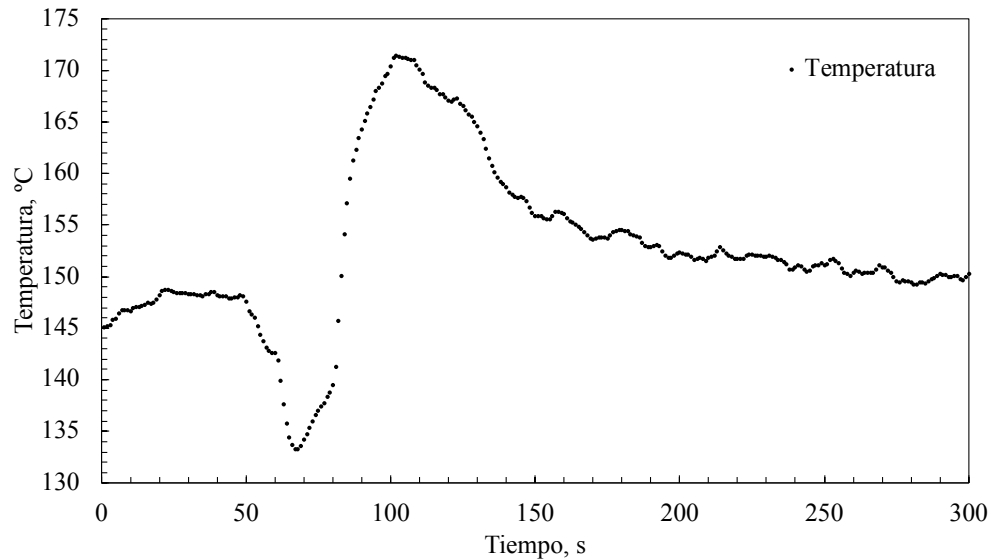


Figura 3.9: Perfil de temperaturas de los gases de escape.

Este promedio de temperaturas será considerado como la temperatura en estado estacionario de la medición. Es así que para el cálculo de la tasa de liberación de calor según la ecuación 3.2 se restan las temperaturas del registro con la de su estado estacionario y el resultado es multiplicado por la constante de calibración del método calculada anteriormente. Ya desarrollados los perfiles de las tasas de liberación de calor (HRR) calculados para cada una de las mediciones, se extraen los máximos de liberación de calor y el calor total producido. Los máximos son fácilmente obtenidos mediante una función de Excel, sin embargo, el calor total producido requiere un poco más de trabajo. Gracias al gráfico del HRR de la muestra es posible observar el dato en el cual se comienzan a registrar tasas positivas producto de la combustión de la biomasa posterior al decrecimiento producido por la apertura de la puerta. A partir de este punto se suman una cantidad de datos igual al tiempo de llama medido para esa muestra multiplicado por dos, ya que el equipo proporciona un registro de temperatura cada 0,5 segundos. Este procedimiento es repetido para todos los experimentos realizados.

En el caso de los datos proporcionados por el software Spectra, este entrega la concentración en PPMM por lo que es necesario hacer la conversión a PPM dividiendo por el lardo entre los terminales del TDLA en el ducto de escape. Una vez obtenida la concentración de oxígeno de cada uno de los experimentos

en PPM, al igual que en el caso del método SER, se observa gráficamente del perfil de concentraciones el punto en el cual se abre la puerta para el ingreso de la muestra como un aumento en la concentración y así mediante un promedio de los datos previos al punto de inflexión es posible obtener lo que será considerado como la concentración de oxígeno en estado estacionario del experimento 3.11.

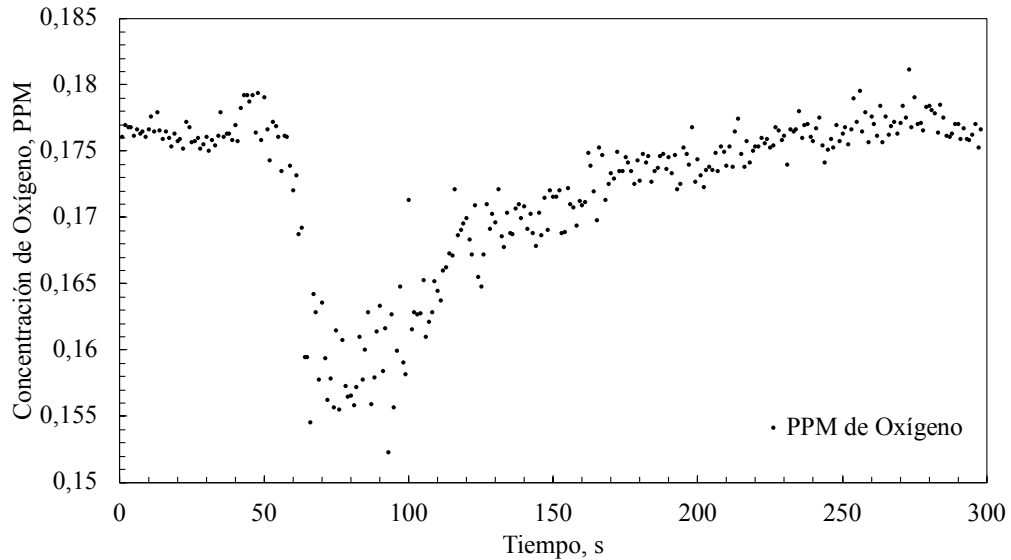


Figura 3.10: Perfil de PPM de oxígeno.

Luego, ya con el perfil de niveles de oxígeno de cada muestra obtenido, para el cálculo de la tasa de liberación de calor según la ecuación 2.23 se restan todos los datos obtenidos por el programa en dicho experimento con su concentración en estado estacionario y se multiplica por la constante de calibración del método calculada anteriormente. Ya desarrollados los perfiles de las tasas de liberación de calor para cada una de las mediciones por el método de consumo de oxígeno se sigue con el mismo procedimiento que con el método SER para la obtención de los máximos HRR y el calor total liberado por el combustible.

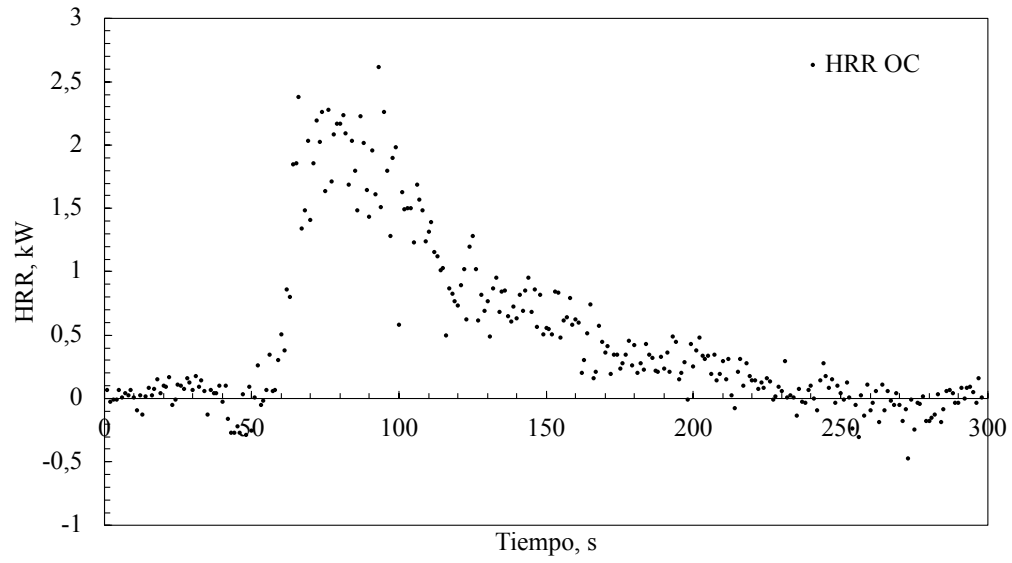


Figura 3.11: Perfil HRR por OC.

4 | Resultados

4.1. Resultados experimentales

4.1.1. Caracterización de la biomasa

El basket anteriormente descrito utilizado en el trabajo experimental fue llenado con masas iniciales de 15 gr, 10 gr y 5 gr de hojas de eucalipto y acículas de pino. En la tabla 4.1 se presenta un resumen con las características de la biomasa y los correspondientes valores para las fracciones de material combustible α_{fuel} calculados para los estratos vegetales que serán usados en el análisis. En el calculo fue utilizada la densidad del combustible ρ_{fuel} medida experimentalmente para las hojas de eucalipto y las acículas de pino según el procedimiento descrito por (Muñoz-Feucht et al., 2014) cuyos valores obtenidos fueron $\rho_{euc} = 970kg/m^3$ y $\rho_{pino} = 720kg/m^3$.

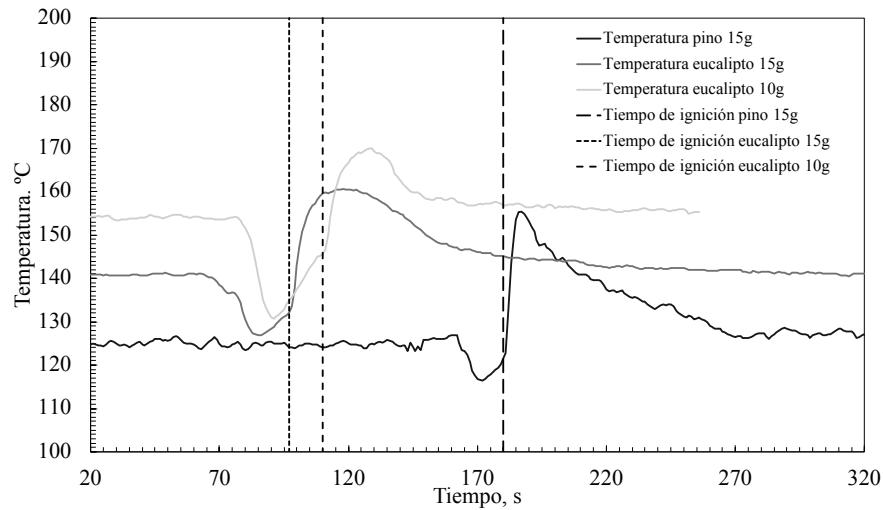
Tabla 4.1: Fracción en volumen de materia combustible α_{fuel} .

$m_{fuel}(g)$	$\rho_b(kg/m^3)$	$\alpha_{euc}(-)$	$\alpha_{pino}(-)$
15	34.72	0.048	0.036
10	23.15	0.032	0.024
5	11.57	0.016	0.012

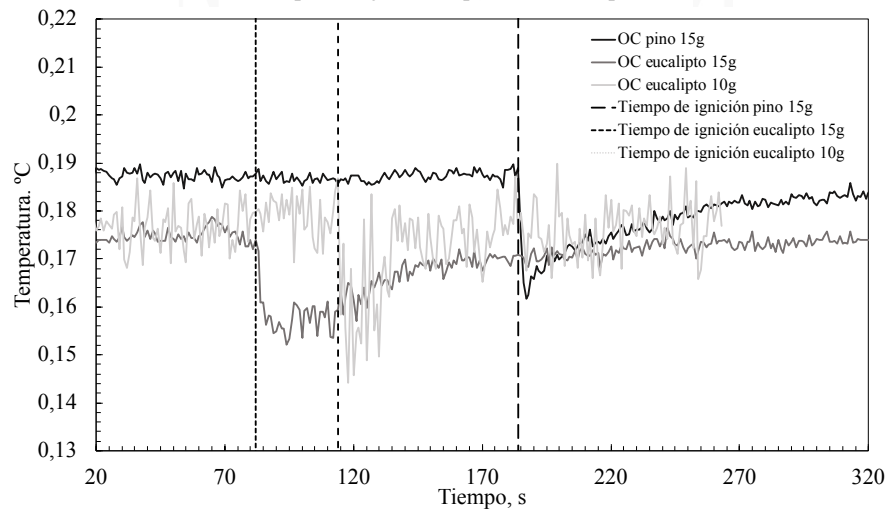
4.1.2. Tiempo de ignición

Los tiempos de ignición t_{ig} medidos para distintos niveles de radiación incidente y porosidad del estrato vegetal se obtuvieron siguiendo la metodología antes descrita. A lo largo del estudio el tiempo de ignición fue determinado con ayuda de las grabaciones efectuadas a cada uno de los experimentos y con un cronómetro. El tiempo es calculado mediante reconocimiento visual de la aparición sostenida de la

llama.



(a) Tiempos de ignición a partir de la temperatura.



(b) Tiempos de ignición a partir del consumo de oxígeno.

Figura 4.1: Medición de tiempos de ignición para diferentes porosidades a $q_{inc} = 38.9 \text{ kW/m}^2$.

A pesar de que la detección de la ignición por reconocimiento visual es simple y fácil de emplear, existen otras formas de establecer el momento en que comienza la combustión del lecho. Una opción es mediante la pérdida de masa normalizada, ya que cuando la ignición tiene lugar existe un cambio drástico en la pendiente de la pérdida de masa debido a que la ignición provoca un decrecimiento de la masa sustancialmente más rápido que el de la simple pirólisis, por lo tanto, es posible determinar el t_{ig} estudiando la pendiente del perfil de pérdida de masa para el estrato a lo largo del tiempo.

Otra manera de medir los tiempos de ignición es de forma similar al método de reconocimiento de pérdida de masa, pero esta vez se desprende de los datos de temperatura, donde nuevamente existe un cambio

brusco en la pendiente de temperatura que refleja la ocurrencia de la llama sostenida. Sin embargo, en el empleo de este método se recomienda que la toma de los datos de temperatura sea lo mas cercano posible al estrato para evitar un desfase en la medición, debido, entre otras causas, a la inercia térmica. También existe la posibilidad de medir el tiempo de ignición gracias a los datos de concentración de oxígeno, donde nuevamente existe un cambio brusco en la pendiente de la cantidad de partículas de oxígeno ocasionado por ocurrencia de la llama sostenida. Procedimiento para el cual también se recomienda que la medición de los datos sea cercana a la muestra para evitar un desfase producido, entre otras causas, por la demora en la ascensión de las partículas al punto de medición. Sin embargo, ninguno de estos dos métodos es fiable dadas las condiciones presentadas por el calorímetro SCALA, debido a la imposibilidad de reconocer el punto exacto en el que la muestra fue depositada bajo los radiadores, también, que la irrupción que genera la apertura de la puerta como se muestra en la figura 4.1, para depositar la muestra vegetal, genera ruido en los datos que hace imposible detectar el momento en que la pendiente cambia bruscamente debido a la ignición sostenida del estrato ya que se produce una fuga de calor del sistema. Además los datos de temperatura y concentración de oxígeno son tomados en el ducto de los gases de escape por lo que cuentan con un desfase.

Por otro lado, el método de la pérdida de masa normalizada no puede ser utilizado ya que el aparato SCALA con contaba con la balanza de precisión para realizar esta medición.

4.1.3. Flujo crítico incidente

Las pruebas para determinar el flujo de radiación crítico incidente sobre la muestra fueron tomadas según los niveles de radiación descritos en la tabla 2.4. La campaña experimental da inicio en $39.5 \text{ kw}/\text{m}^2$ decreciendo según los valores presentados hasta alcanzar el flujo crítico de radiación $\dot{q}_{inc,cri}$. Básicamente el flujo crítico, para el presente trabajo, se define como el flujo mínimo de radiación sobre la muestra para que se genere la ignición espontánea. Valor que se encuentra entre el mínimo flujo para el cual se detectó la ignición y el máximo flujo de radiación para la que no tuvo lugar la ignición.

A lo largo del desarrollo experimental el flujo crítico fue identificado tras exponer la muestra a determinado flujo de radiación y no observar la ignición tras 15 minutos, periodo en el cual la muestra generalmente era consumida. En total se tomaron tres mediciones por cada combinación, es decir, por cada nivel de porosidad del estrato y nivel de flujo radiativo incidente, sin embargo, resulta ser una buena idea aumentar el número de experimentos al acercarse el punto de no ignición de las muestras para así disminuir la creciente variabilidad intrínseca a bajos niveles de radiación. A pesar de que dicho efecto no fue posible

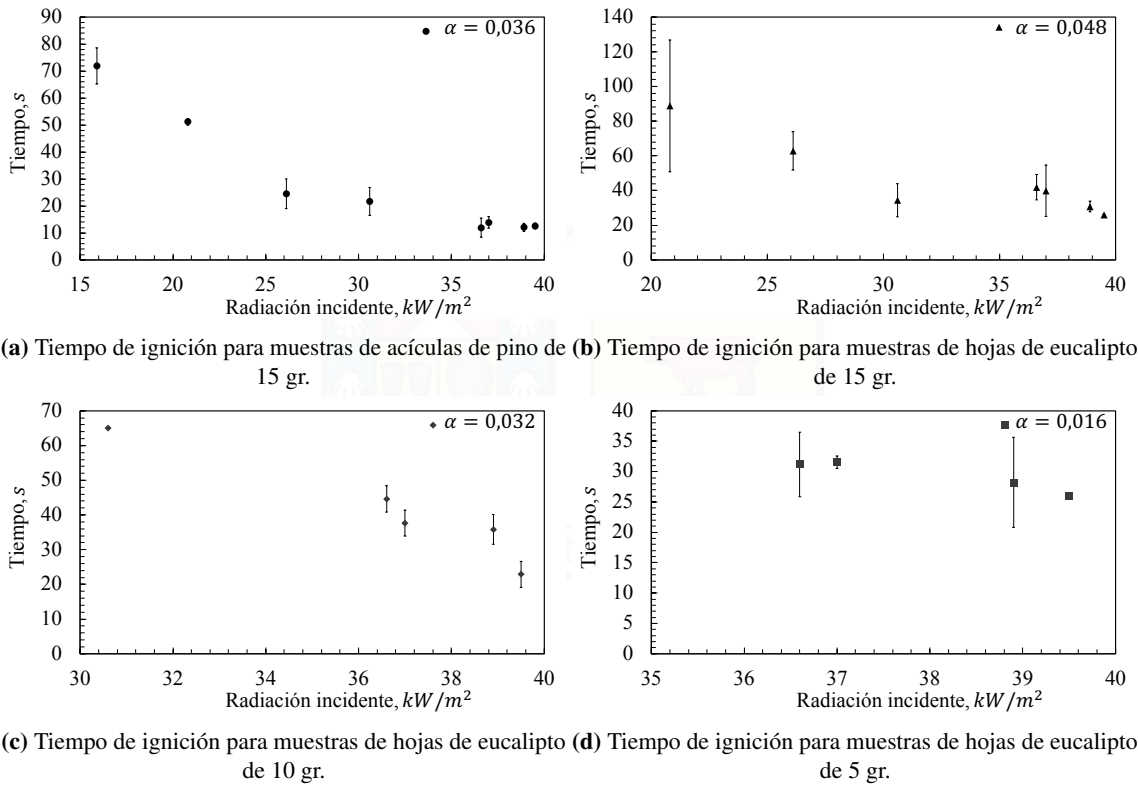


Figura 4.2: Tiempo de ignición para acículas de pino y hojas de eucalipto.

de apreciar en los datos obtenidos presumiblemente por la baja cantidad de repeticiones lo que ocasiona que se recaben pocos datos en estas mediciones. Para algunos casos sucedió que para flujos de radiación bajos la muestra prendía en pocas oportunidades provocando que la desviación de esa muestra fuera en casos mínima y por consiguiente su error, es por esto, que para niveles bajos de radiación, cercanos al flujo crítico, el número de repeticiones debiese ser mayor para tener una cantidad de mediciones que haga posible la comparación con las demás configuraciones probadas. La desviación estándar de la muestra tuvo variaciones de valores entre 0.26 y 38.02 para los experimentos realizados en acículas de pino y hojas de eucalipto. En los casos relacionados a las ramas de eucalipto las desviaciones estándar de las muestras se encontraron entre 2.45 y 18.15.

Los resultados obtenidos para los tiempos de ignición espontánea se muestran en las figuras 4.3 donde es posible apreciar ciertos patrones en el comportamiento de los datos. Se muestra que para muestras de un mismo tipo, como lo fueron las hojas de eucalipto, se presentan tiempos de ignición más bajos a medida que aumenta la masa del estrato y viceversa al disminuir la cantidad de hojas los tiempos para la ignición espontánea aumentan. A su vez las muestras con mayor cantidad de masa de hojas presentaron ignición a flujos de radiación más bajos donde muestras con menos cantidad de combustible no prendieron. Este

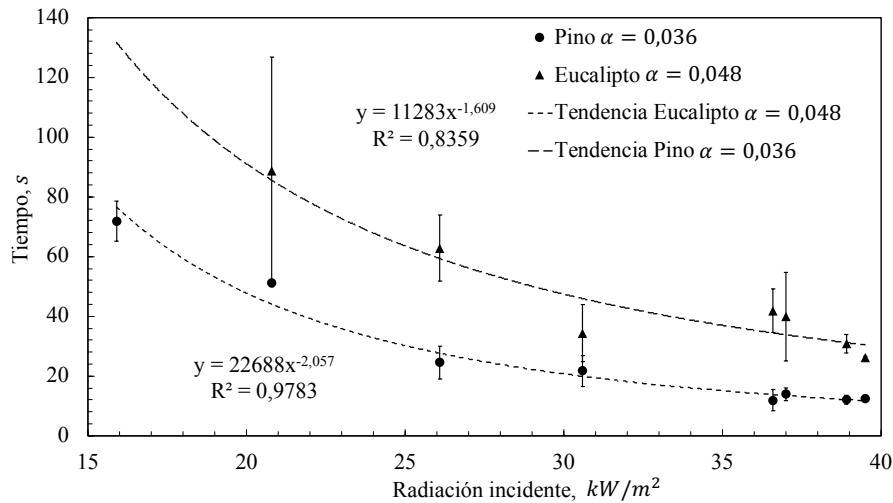
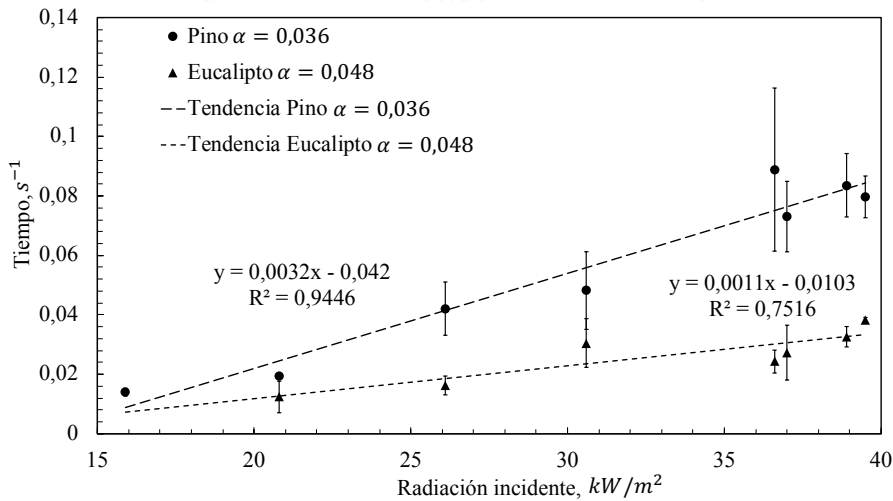
comportamiento sería explicado debido a que a mayor cantidad de combustible y/o mayor radiación sobre la muestra se generan mayor cantidad de gases de pirólisis, lo que a su vez induce naturalmente menores tiempos de ignición y que muestras más grande prendan al ser expuestas a flujos de radiación incidente donde muestras más pequeñas no lo harían.

Por otro lado, al comparar muestras con la misma cantidad de masa, pero de distinta especie, como fue el caso observado en la figura 4.3a, las muestras de 15 gramos para acículas pino y hojas de eucalipto, se aprecia que aquellas de pino presentan tiempos mucho menores que las de eucalipto e incluso encuentran la ignición espontánea al ser expuestas a flujos de radiación incidentes menores donde las muestras de hojas de eucalipto no prendieron. Este comportamiento puede deberse a factores como por ejemplo la composición de los combustibles, la menor densidad de las hojas de pino en comparación con las eucalipto y/o su forma. Sin embargo, en cierta forma a medida que la radiación sobre las muestras aumenta todas estas, independiente del tipo y cantidad, tienden a presentar una diferencia menor.

Otro resultado importante a destacar es el presentado en la figura 4.3b al graficar el inverso del tiempo de ignición versus el flujo de radiación donde se puede apreciar un comportamiento cuasi-lineal para los dos tipos de muestra con igual masa y de diferente tipo, lo cual muestra una alta correlación en los resultados.

En el caso de las pruebas efectuadas a las ramas de eucalipto, que se hicieron a radiación constante (50.9 kW/m^2) y variando el diámetro entre los 2 mm y los 9 mm, dada la complejidad del combustible (debido a su disponibilidad y forma) se efectuaron dos mediciones por configuración y todas las mediciones no pudieron contar con la misma cantidad de masa encontrándose entre los 30.9 gr y 55.4 gr. Por otro lado si se mantuvo una misma área expuesta al flujo de calor radiante ya que se intentó cubrir la totalidad del contenedor con la biomasa. Producto de lo anterior y tratar de no contar con variaciones demasiado drásticas la disposición de las ramas varió para cada diámetro, obteniendo diferentes niveles de capas. Todas estas variaciones ocasionadas por la complejidad del combustible hacen que sea difícil la comparación.

Como se muestra en la figura 4.4 para ramas de diámetro 2 mm el tiempo de ignición es marcadamente bajo en comparación a todas las demás mediciones, las cuales, revelan cierta cercanía en sus resultados. El tiempo de encendido aumenta fuertemente desde los 2 mm de diámetro a los 3 mm. Después de los 3 mm el tiempo de ignición tiende a estabilizarse en torno a 69.6 s.

(a) Tiempo de ignición para muestras de pino y eucalipto en función de \dot{q}_{inc} .(b) Inverso del tiempo de ignición para muestras de pino y eucalipto en función de \dot{q}_{inc} .**Figura 4.3:** Tiempo de ignición para distintas especies.

4.1.4. Tasa de liberación de calor

Del análisis efectuado a partir de los datos de la tasa de liberación de calor de los combustibles en estudio es posible desprender el comportamiento de los equipos a diferentes condiciones y su pertinencia para este análisis, también se aprecia como son los perfiles de liberación de calor de los distintos estratos, como influye la inercia térmica en las mediciones y como se complementan los distintos métodos.

En el estudio de los datos entregados por el método SER para las tasas de liberación de calor en todos y cada uno de los gráficos se aprecia un declive en el estado estacionario de los datos. Esto es ocasionado a que para ingresar la muestra al SCALA es necesario abrir la puerta del equipo, lo que ocasiona una gran fuga

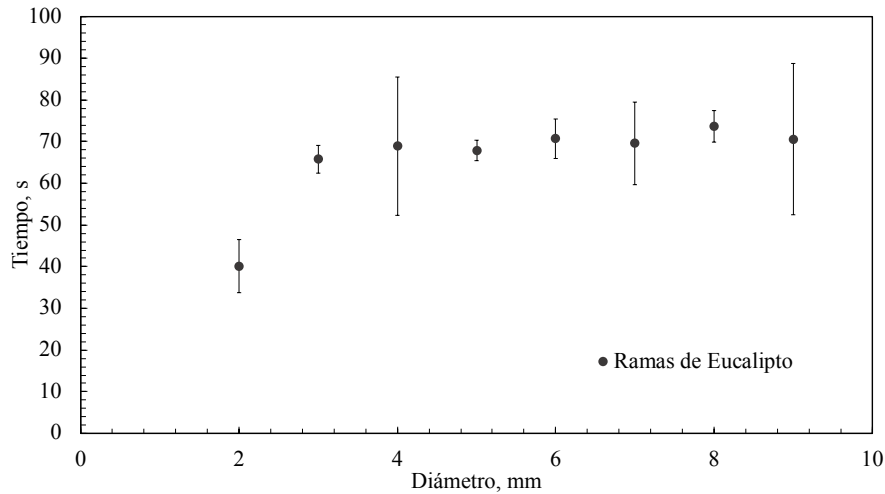


Figura 4.4: Tiempo de ignición para muestras de ramitas de eucalipto en función del diámetro a $\dot{q}_{inc} = 50,3kW/m^2$.

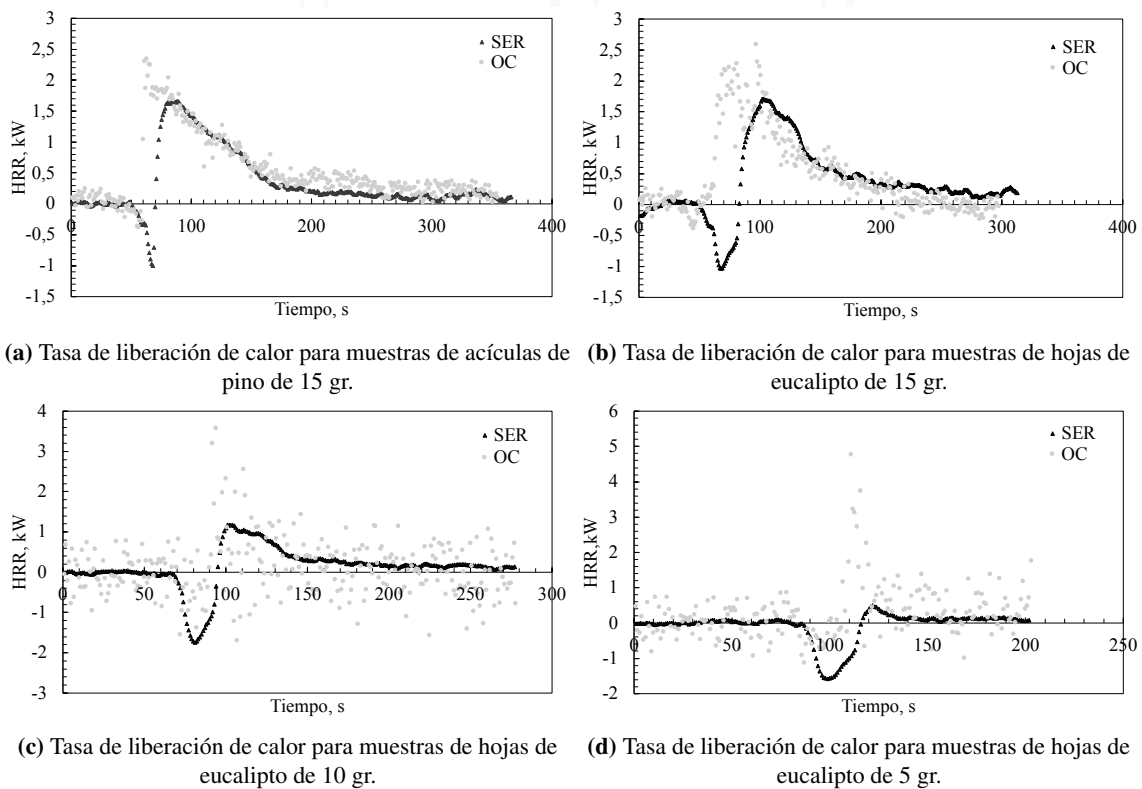


Figura 4.5: Tasa de liberación de calor para acículas de pino y hojas de eucalipto por métodos SER y OC.

de calor. Luego al ingreso de la muestra, al cerrar la puerta, el sistema intenta volver a su estado estacionario, pero ya con la muestra adentro antes de que se alcance dicho estado esta entra en ignición lo que hace que sea difícil de identificar el momento en que se prende la muestra y los datos que proporciona tienden a estar subestimados. Esto último se puede ver al comparar con los datos del mismo experimento entregados por el método OC, los cuales no se ven influenciados por los efectos de la inercia térmica en las figuras 4.5.

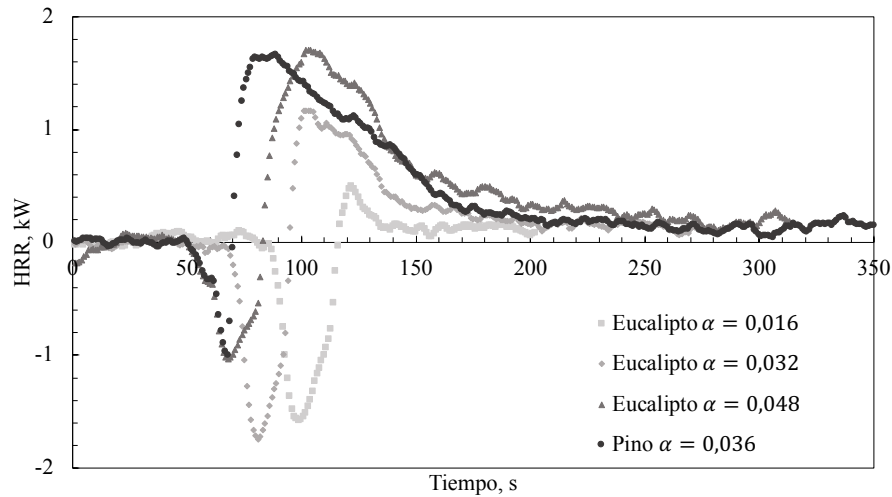
Sin embargo, los datos proporcionados por el método de diferencia de entalpía sensible no presentan gran dispersión y son consistentes a lo largo del tiempo, situación de la cual no puede hacer gala el método de consumo de oxígeno, ya que al disminuir la cantidad de combustible de las muestras y/o el flujo de radiación incidente trae como consecuencia una menor liberación de energía que deja en evidencia la alta volatilidad en las mediciones efectuadas por este método. El trabajar con niveles de radiación relativamente bajos y cantidades de combustible en la misma categoría como se muestra en las figuras 4.5c y 4.5d, no se hace recomendable este método como una herramienta fiable para el análisis, sino más bien, una complementaria que puede ayudar a dimensionar la gravedad de los efectos que puede tener la inercia térmica en el método SER.

El comportamiento de las muestras de combustible es similar en cada uno de los experimentos variando únicamente la escala como se aprecia por ambos métodos en las figuras 4.6. Luego del declive ocasionado por la apertura del equipo da a lugar un peak en la tasa de liberación de calor que con el tiempo decrece paulatinamente. Esta situación es distinta a la presentada en los resultados descritos por Volkwein (2016) donde se utilizó como combustible mezclas de materiales leñosos como muestra y que posterior a la ignición mantenían durante un tiempo una tasa de liberación de calor constante antes de comenzar con el descenso. Esto puede ser explicado debido a la naturaleza de las muestras, ya que al parecer las hojas presentan altos peaks de liberación de calor que no pueden ser sostenidos durante el tiempo.

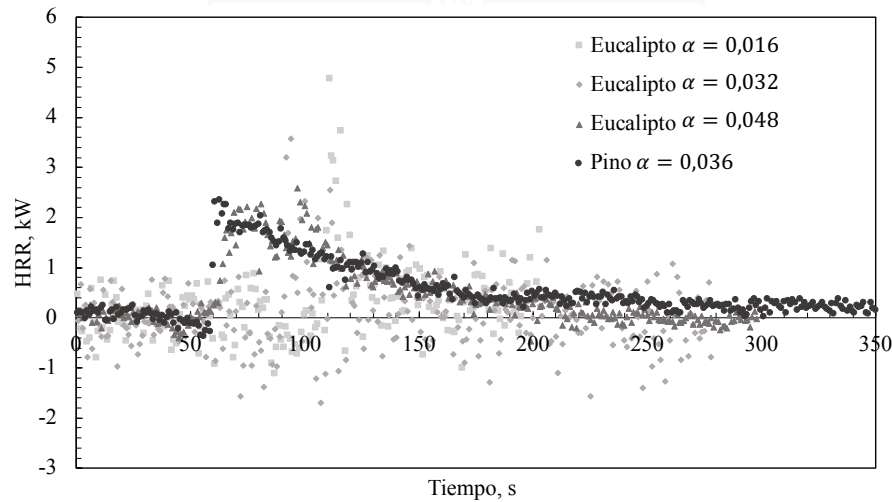
Al llegar las mediciones a niveles bajos de liberación de energía los métodos empleados presentan deficiencias importantes a tener en consideración para la interpretación de los resultados. Donde se puede observar que muestras de 5 gr parecen estar fuera del rango de sensibilidad del equipo, es decir, que al utilizar el SCALA en futuros estudios se recomienda que las muestras vegetales cuenten con un peso mayor a 10 gr.

4.1.5. Tasa máxima de liberación de calor

La tasa máxima de liberación de calor es el valor más alto de energía liberada que haya sido registrado por la muestra a lo largo de una prueba. Los peak de liberación de calor o tasa máxima de liberación de calor son medidos para los distintos tipos de muestras en el estudio a diferentes flujos de radiación mediante los métodos de diferencia de entalpía sensible y consumo de oxígeno. Cabe señalar que al igual que en las secciones anteriores para ciertas configuraciones se cuenta con menos datos que en el resto a causa de que a flujos de radiación bajos la muestra no siempre encontraba la ignición espontánea.



(a) Tasas de liberación de calor por método SER para acículas de pino y hojas de eucalipto a diferente masa.

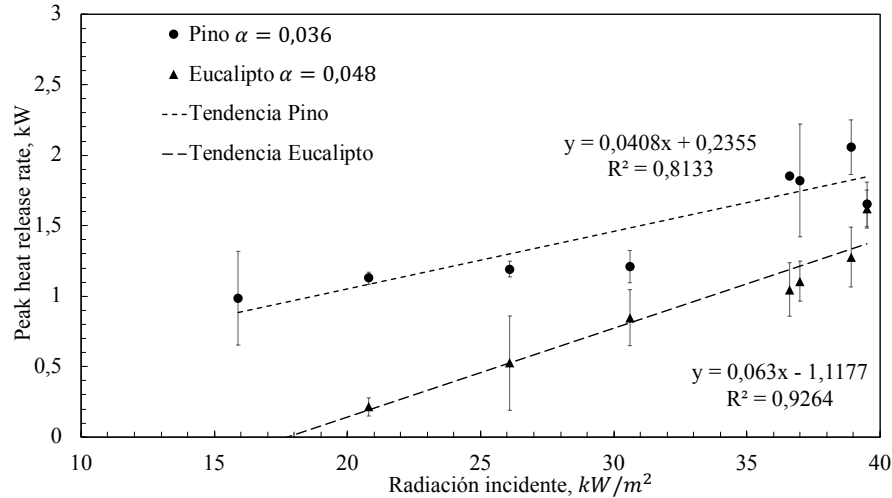


(b) Tasas de liberación de calor por método OC para acículas de pino y hojas de eucalipto a diferente masa.

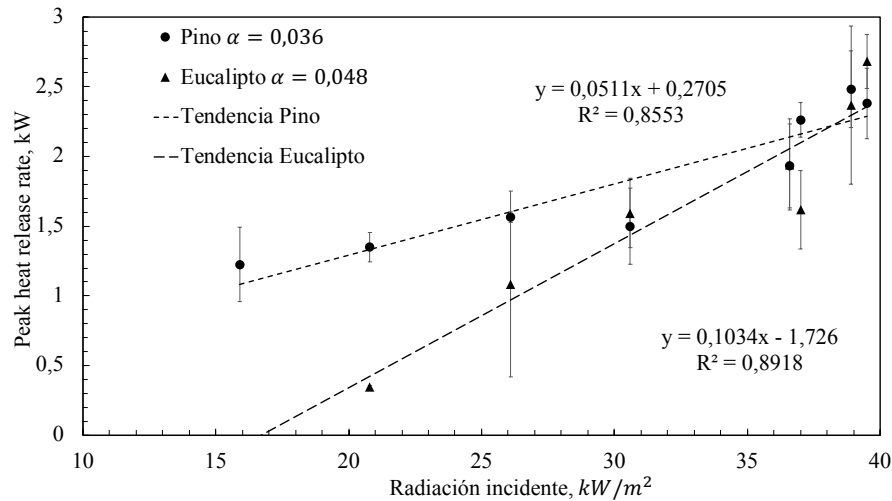
Figura 4.6: Tasas de liberación de calor por método.

Para los datos obtenidos por el método SER se puede apreciar claramente en la figura 4.7a que indistintamente del tipo de combustible que se use o la cantidad de este los peak van en aumento en la medida que la radiación aumenta siguiendo un comportamiento cuasi-lineal. A su vez, las acículas de pino presentan mayores peak que las muestras de la misma cantidad de combustible pero de hojas de eucalipto. Del mismo modo, el peak de liberación de calor aumentan a medida que la cantidad combustible es mayor.

En el caso de los resultados registrados por el consumo de oxígeno en la figura 4.7b se puede corroborar la tendencia de una muestra a aumentar sus peak a medida que aumenta la radiación sobre ella. No obstante, al aumentar los flujos las diferencias entre muestras no son tan notorias como en el caso de lo visto con el método anterior, es más, los máximos de liberación de calor tienen a juntarse para luego cruzarse unas



(a) Tasas máxima de liberación de calor por método SER para acículas de pino y hojas de eucalipto.



(b) Tasas máxima de liberación de calor por método OC para acículas de pino y hojas de eucalipto.

Figura 4.7: Tasa máxima de liberación de calor para muestras de acículas de pino y hojas de eucalipto de 15 gr.

con otros. Por un lado, en ambos casos las pendientes de las curvas de los máximos es positiva, pero para el método OC existe una mayor pendiente para muestras de menor peso.

Al analizar los resultados para las ramas de eucalipto el comportamiento entre ambos métodos es idéntico como se muestra en la figura 4.8, con un leve desfase en la magnitud de los datos que puede ser ocasionado por la subestimación del método SER y/o por la alta variabilidad del método OC. También, al igual que en los datos de la sección de flujo crítico, existe una marcada diferencia en los resultados para las muestras de 2 mm de diámetro respecto al resto que sigue un leve tendencia. Para poder comparar los peak de las ramas, debido a que cada una de las muestras presentaba distinta cantidad de masa fue necesario comparar las razones entre los máximos de energía liberados por unidad de masa.

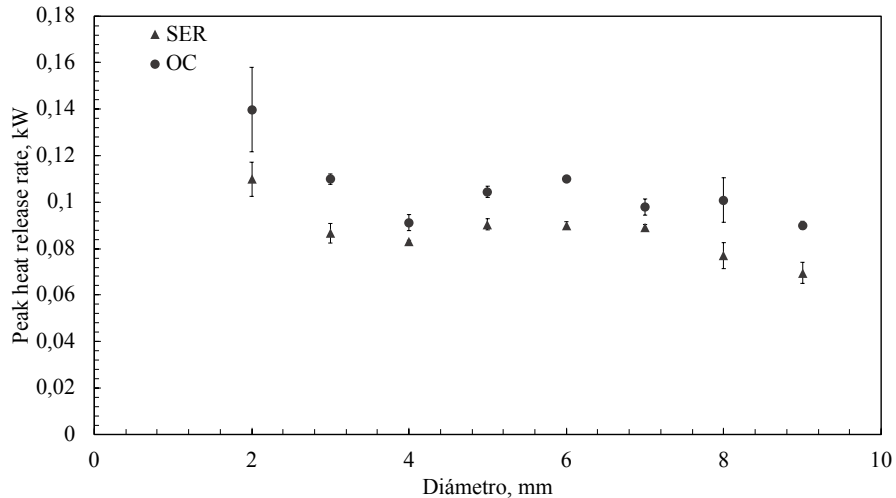


Figura 4.8: Tasa máxima de liberación de calor para muestras de ramas de eucalipto en función del diámetro a $\dot{q}_{inc} = 50,3 \text{ kW/m}^2$.

4.1.6. Calor de combustión efectivo

El calor de combustión es una propiedad termodinámica de los combustibles medida con un calorímetro de bomba de oxígeno o también se puede calcular a partir de las concentraciones de los elementos combustibles. Parámetro obtenido bajo combustión completa y el consumo total del combustible en el proceso. Dichas condiciones hacen que este sea un parámetro lejano a las condiciones reales. Un parámetro más adaptado a la realidad es el EHC o calor efectivo de combustión el que no es una condición termodinámica y depende de las condiciones experimentales. Dado que el EHC para este estudio será obtenido a partir del total de energía liberada y el total de masa consumida el método más adecuado para hacer este análisis es el de diferencia de entalpía sensible ya que presentar menor variabilidad.

De forma similar que en las secciones anteriores, se aprecia en la figura 4.9 que para todos los tipos de muestras a medida que aumenta la radiación sobre los estratos también lo hace su contra parte en el eje de la ordenada, en este caso mejora la eficiencia de combustión. Comportamiento que parece ser cuasi-lineal a excepción de los resultados para muestras pequeñas de 5 gramos que pueden estar afectados por el límite de sensibilidad del equipo, pero que de todas formas denotan una tendencia al alza. Dichos resultados vienen a corroborar los presentados por Volkwein (2016) donde muestra la relación que existe entre los peak de liberación de calor y el EHC.

De igual manera estos resultados se repiten al observar los datos encontrados en los experimentos realizados con ramas de eucalipto, pero esta vez el factor que favorece la eficiencia en la combustión es el

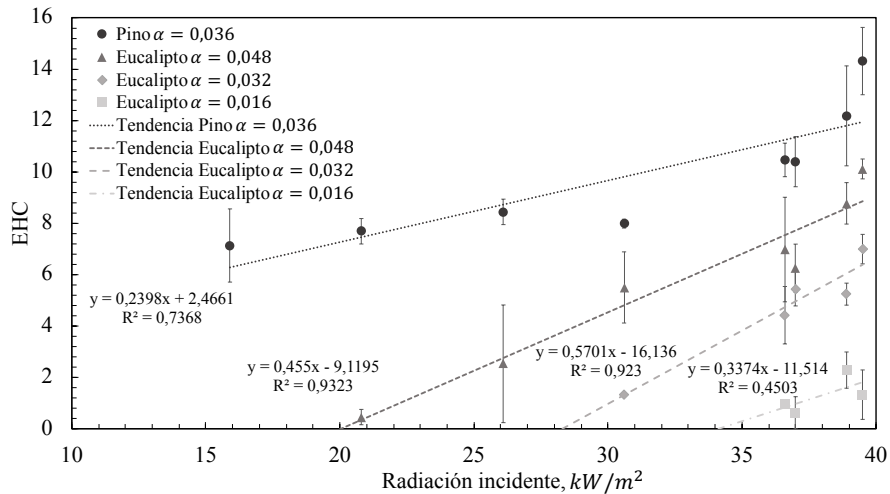


Figura 4.9: Calor de combustión efectivo para acículas de pino y hojas de eucalipto en función de la radiación incidente.

diámetro. Resultado que también se asemejan a un comportamiento cuasi-lineal a medida que el diámetro de las ramas va en aumento.

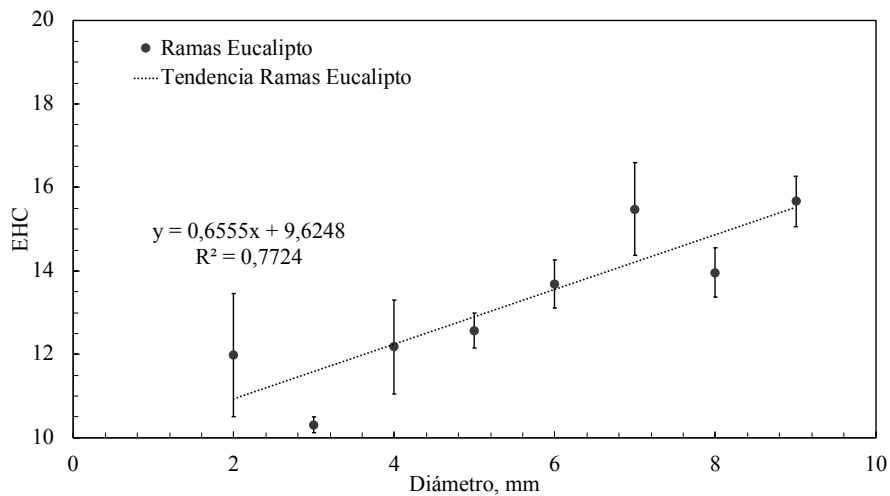


Figura 4.10: Calor de combustión efectivo para ramas de eucalipto en función del diámetro.

No es posible hacer un punto de comparación entre la eficiencia de combustión de ramas y hojas debido a que en los experimentos llevados a cabo con las ramas se empleó un nivel de radiación sobre las muestras que no se usó en las hojas debido que tal nivel ocasionaba tiempos de ignición demasiado bajos que podían ocasionar que la muestra prendiera antes de ser depositada en el equipo. Sin embargo, si se puede compara entre hojas de pino y eucalipto de se ve que las que corresponde a la primera especie se queman de mejor forma que el eucalipto y a su vez, mayores cantidades de combustible presentaran mayores índices de eficiencia de combustión de aquellos que cuentan con menos.

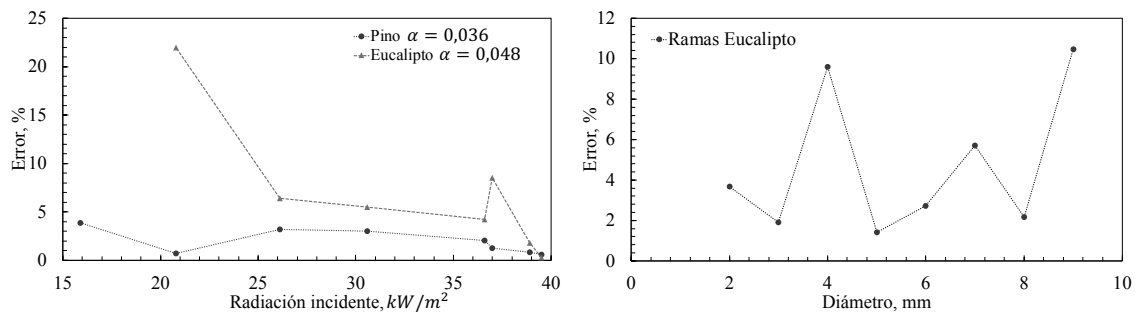
4.1.7. Error experimental

El error experimental es de gran importancia para determinar la relevancia y veracidad de los test realizados dada la aleatoriedad inherente a los combustibles tratados. El error más importante se debe al error estadístico en la repetibilidad de los experimentos, aunque por supuesto existen muchas otras fuentes. Para el cálculo del error fue empleada la ecuación 4.1.

$$u_a = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

Donde σ_x es la desviación estándar de la muestra y n es el número de muestras. A continuación se presentan los errores relacionados a los análisis anteriormente descritos para el flujo crítico, peak de liberación de calor y EHC.

Los resultados para el flujo crítico son los que mayor error presentan. En el caso de las ramas los valores fluctúan entre el 1.42 % y el 10.48 % como se muestra en la figura 4.11, mientras que en las hojas el error varía desde el 0.15 % y el 21.95 %. Esta situación es explicada en parte por dos aspectos, primero la inherente variabilidad de las muestras y en segundo lugar el número de muestras ocupado. El mayor error de todo el trabajo corresponde a 21.95 % al determinar el flujo crítico para 15 gramos de hojas de eucalipto, ya que en la radiación de 20.8 kW/m^2 solo se registraron dos datos. Además está el factor de los saltos en los flujos de radiación sobre las muestras, que como se puede ver en los resultados para hojas de eucalipto entre 10 y 5 gramos, es muy alto y no permite apreciar correctamente el proceso.



(a) Estimación del error experimental del t_{ig} para acículas de pino y hojas de eucalipto. (b) Estimación del error experimental del t_{ig} para ramas de eucalipto.

Figura 4.11: Estimación del error experimental del t_{ig} .

Así la manera de corregir esta imperfección sería determinando el número de muestras óptimo para disminuir el error considerando que el error es aleatorio. Para realizar este cálculo se emplea la ecuación 4.2

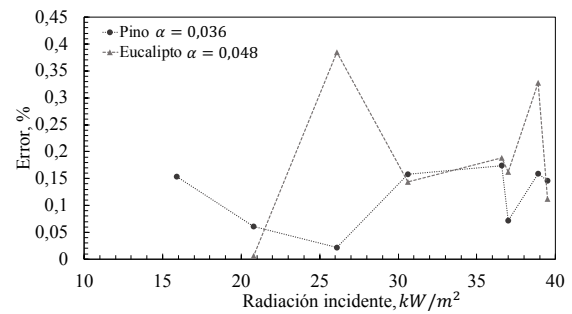
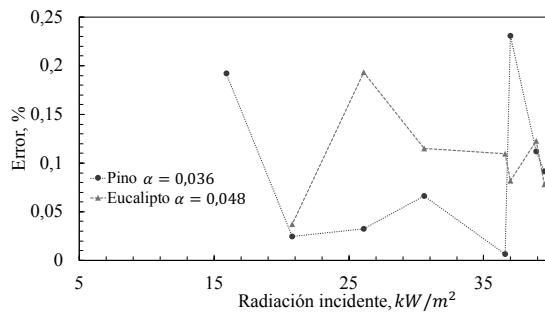
para la que es necesario tener en consideración algunos supuestos:

1. El tamaño de la población (N) es muy grande.
2. La población distribuye cuasi-normal.
3. La desviación estándar de la población es desconocida, pero puede ser estimada por la desviación estándar de la muestra.

Dado estos supuesto el tamaño de la muestra n esta dada por:

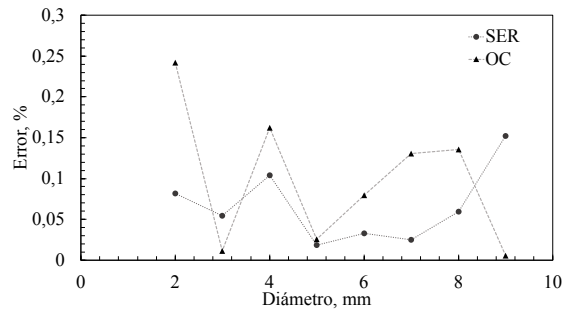
$$n = \left(\frac{t_{n-1, 1-\alpha/2}^s}{e} \right)^2 \quad (4.2)$$

Donde t_{n-1} corresponde a la inversa de la distribución t-Student con $(n-1)$ grados de libertad, $(1 - \alpha)$ 100 % el nivel de confianza, s la desviación estándar de la muestra y e el error máximo que se busca alcanzar. Después de realizado el estudio es posible determinar el valor de s a partir de los datos de flujo crítico el cual es de 6.125.



(a) Estimación del error experimental de la tasa máxima de liberación de calor para acículas de pino y hojas de eucalipto mediante el método SER.

(b) Estimación del error experimental de la tasa máxima de liberación de calor para acículas de pino y hojas de eucalipto mediante el método OC.



(c) Estimación del error experimental de la tasa máxima de liberación de calor para ramas de eucalipto.

Figura 4.12: Estimación del error experimental del t_{ig} .

En cuanto al error de los resultados obtenidos para los máximos de liberación de calor y eficiencia de calor efectivo los valores son bajos. En el caso de los peak de liberación de calor (4.12) el error de las hojas para el método SER va entre el 0.006 % y 0.23 % y para el método OC entre 0.006 % y 0.47 %, de igual forma para las ramas lo valores fluctuaron entre 0.018 % y 0.15 % para el SER y entre 0.006 % y 0.24 % para el OC lo cual son valores bajos. Lo que también ocurre para el error obtenido en el calculo del EHC donde fluctúa entre 0.098 % y 1.32 % (4.13).

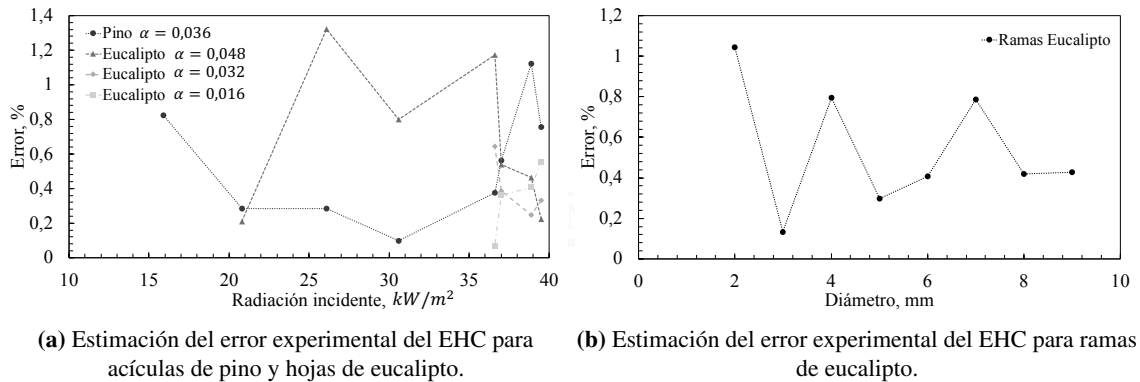


Figura 4.13: Estimación del error experimental del t_{ig} .

4.2. Discusión

Para el calculo de los tiempos de ignición el método de detección visual mediante un cronómetro es la técnica más sencilla y fiable de implementar. En este punto los vídeos realizados a cada una de las muestras fue de vital ayuda para determinar con exactitud los datos y permitir que la tarea sea realizada por una única persona.

Como ya se propuso el número de muestras no fue el más adecuado para disminuir el error en el aspecto con mayor variabilidad, el flujo crítico de ignición. Para esto se propone la desviación estándar de los datos recavados en el análisis y así entregar las bases para un futuro trabajo con más precisión. Además estos parámetros pueden ir siendo refinados a medida que se vaya desarrollando la metodología empleada.

Otro punto a considerar es la tabla de flujos de radiación utilizada la cual emplea saltos muy grandes para determinar con precisión el flujo crítico. Para mejorar este aspecto es necesario con el empleo de un radiómetro generar una nueva tabla de escalas de radiación para el SCALA.

Al momento de evaluar el desempeño de los dos métodos de calculo para la tasa de liberación de calor ambos presentan virtudes y falencias, es por eso que se hace necesario contar un tercer método que ayude a la

robustez de los datos proporcionado por el SCALA. El método indicado es el de pérdida de masa, el cual debido a las condiciones actuales del equipo no puede ser utilizado. No obstante, todos estos métodos trabajan sobre el supuesto de combustión completa, por lo que para obtener datos con mayor precisión y más realistas se hace imperante implementar el detector de concentraciones de monóxido de carbono. Y a su vez, para precisar los reales niveles de humedad de las muestra sería conveniente medir las concentraciones de agua en los gases de escape. Sumar una herramienta de estas características abriría un abanico de posibilidades al brindar la opción de calcular la porción de calor que es pérdida en la evaporación de agua de combustibles vegetales con diferentes grados de humedad.

Un factor a tener en cuenta para mejorar es la irrupción que se genera en el estado estacionario del equipo SCALA para depositar la muestra. Lo que se genera es un fuga de calor que altera los datos registrados. Para subsanar este problema se podría implementar un escudo termico que ingrese junto con la muestra y que evite que esta reciba la radiación que provocaría la ignición espontanea previo a que el sistema alcance el estado estacionario. Una vez el sistema se estabiliza el escudo es retirado mediante algún arreglo mecánico.

El equipo SCALA pierde precisión cuando es llevado a condiciones donde las muestras producen una baja liberación de energía. Es por esta razón que no es recomendable su uso en condiciones donde se presente baja radiación por parte de heaters y/o bajas cantidades de combustible y/o combustibles poco energéticos.

5 | Conclusiones

Fue llevado a cabo un estudio experimental del comportamiento calorimétrico de los combustibles forestales más representativos de Chile: *Pinus Radiata* y *Eucalyptus Globulus*. Objeto del estudio fueron los tiempos de ignición, flujo de radiación crítico, tasa máxima de liberación de calor y el calor de combustión efectivo. Las muestras variaron en su fracción volumétrica y tipo, las que fueron sometidas a diferentes flujos de radiación incidente para acículas y hojas. En el caso de las acículas de pino se empleó una fracción en volumen de 0,036, equivalente a 15 gramos de material. Para las muestras de eucalipto se pueden distinguir dos clases: hojas y ramas. Se utilizaron tres fracciones volumétricas para las hojas de eucalipto correspondientes a 0,048, 0,032 y 0,016 las que equivalen a 15, 10 y 5 gramos de combustible respectivamente. Hojas de eucalipto y acículas de pino fueron expuestas a los flujos de radiación anteriormente presentados en la tabla 2.4. Aparte es el caso de las ramas de eucalipto las que fueron expuesta a una radiación constante de $50,9\text{kw}/\text{m}^2$ y lo que fue variando es el diámetro de las ramas desde los 2 a los 9 mm.

El estudio fue desarrollado con el equipo SCALA siguiendo la metodología descrita en el trabajo. Todas las muestras que fueron analizadas se encontraban secas, con un 5% de humedad atribuido a la rehidratación de la materia vegetal, y fueron expuestas a un flujo de radiación uniforme. El SCALA, durante el trabajo, contó con dos mecanismos de medición para las tasas de liberación de calor: método de la diferencia de entalpía sensible (SER) y el método del consumo de oxígeno (OC). Métodos los cuales utilizaron como supuesto la combustión completa del combustible y emplean constantes de calibración que deben ser ajustadas periódicamente. Para las mediciones por el método SER el equipo se vale de termopares dispuestos estratégicamente en el equipo. Para las obtenidas en el uso del método OC se emplea un TDLA que por absorción de luz detecta las concentraciones de las partículas de oxígeno en los gases de escape. Además se contó con cámara de vídeo y balanza electrónica de precisión como mecanismos de medición.

En lo que respecta a los resultados obtenidos se pueden desprender las siguientes conclusiones:

1. El método de detección visual de la ignición espontánea resulta ser simple y fiable en la obtención de los resultados.
2. Los resultados de los tiempos de ignición dan cuenta que existe una fuerte relación cuasi-lineal entre el inverso del tiempo de ignición (t_{ig}^{-1}) y el flujo de radiación incidente sobre el estrato vegetal para hojas de eucalipto y acículas de pino.
3. El comportamiento de los tiempos de ignición de las ramas de eucalipto a radiación constante $50,3kW/m^2$ presenta valores marcadamente bajos para diámetros de 2 mm en torno a 40.1 s, para después estabilizarse en torno a 69.6 s.
4. A mayor fracción de volumen para muestras de una misma especie los tiempos de ignición disminuyen debido, probablemente, a que la mayor presencia de masa hace que aumenten los gases de pirólisis. De igual forma a mayor flujo de radiación sea expuesta la muestra sus tiempos de ignición serán menores.
5. Para dos muestras de la misma cantidad de masa, pero de diferente tipo: pino y eucalipto, la muestra de pino muestra siempre tiempos de ignición menor a la de eucalipto. Lo que puede ser explicado por la composición de los combustibles o la diferencia en las fracciones de volumen.
6. EL menor tiempo de ignición en promedio fue 11.9 s para acículas de pino de fracción volumétrica 0.036 a una radiación de $36.6 kW/m^2$. Mientras que el mayor tiempo de ignición en promedio fue de 88.8 s para hojas de eucalipto de fracción volumétrica 0.048 a una radiación de $20.8 kW/m^2$.
7. Las muestras de acículas de pino presentaron ignición para todos los flujos expuestos, siendo el límite $15.9 kW/m^2$. Las muestras de hojas de eucalipto de fracciones volumétricas 0.048, 0.032 y 0.016 mostraron ignición para los flujos de radiación $20.8 kW/m^2$, $30.6 kW/m^2$ y $36.6 kW/m^2$ respectivamente, siendo a radiaciones de $15.9 kW/m^2$, $26.1 kW/m^2$ y $30.6 kW/m^2$ donde no prendieron.
8. Los resultados de las tasas de liberación de calor por método SER se ven afectadas por la inercia térmica lo que hace que estén subestimadas y que el análisis para muestras con bajas cantidades de combustible resulte complicado. Mientras que los resultados por el método OC no se ven afectados por la inercia térmica, sin embargo, presentan una alta variabilidad lo que hace muy difícil el análisis para muestras con baja cantidad de combustible. Se establece que para muestras con combustible forestales por debajo de los 10 gramos no resulta recomendable el análisis de la tasa de liberación de calor con estos métodos con estos métodos, especialmente el método OC.
9. Las tasas máximas de liberación de calor tienden al alza a medida que las muestras son expuestas a un

mayor flujo de radiación. De igual forma los valores registrados por el método de consumo de oxígeno son mayores que los del método SER.

10. Mediante el método SER los peak de liberación de calor de las acículas de pino son mayores que los de las hojas de eucalipto en todo momento para fracciones volumétricas de 0.036 y 0.048 respectivamente. El valor máximo en promedio es de 2.06 kW para las acículas a una radiación de 38.9 kW/m^2 , mientras que para las hojas el mayor registro promedio es de 1.62 kW a una radiación de 39.5 kW/m^2 . En tanto que al hacer el análisis con los datos obtenidos por el método OC esta diferencia desaparece para las radiaciones más altas entre 38.9 kW/m^2 y 39.5 kW/m^2 , registrando un máximo promedio de 2.68 kW para las hojas de eucalipto y 2.48 kW para las acículas a radiaciones de 39.5 kW/m^2 y 38.9 kW/m^2 respectivamente.
11. Los peak de liberación de calor para las ramas de eucalipto alcanzan sus máximos para los diámetros de 2 mm y luego son relativamente constante entre 3 y 9 mm. Siento el máximo valor promedio de 0.14 kW por gramo de combustible mediante el método OC y 0.11 kW por gramo de combustible por el método SER.
12. El EHC para acículas de pino y hojas de eucalipto aumenta en función de la radiación incidente sobre la muestra y muestra valores mayores para muestras de pino que para las de eucalipto. A su vez el EHC aumenta proporcional a la cantidad de combustible para muestras de un mismo tipo. El comportamiento tiende a ser aparentemente cuasi-lineal. De la misma manera ocurre con las ramas de eucalipto en función del diámetro.
13. La mayor fuente de error se encuentra en los datos de los tiempos de ignición cuyo valor más alto fue de 21.95 %.

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo se pueden sacar varias conclusiones que sean de utilidad para futuros trabajos y análisis. Entre ellas, para futuros trabajos con el aparato SCALA se recomienda utilizar muestras de combustible forestal por sobre los 10 gramos, agregar un método más de diagnóstico de las tasa de liberación de calor como por ejemplo la pérdida de masa, buscar formas de cambiar la metodología para que no sea necesario abrir el equipamiento para depositar la muestra y romper con el estado estacionario en la medición, y aumentar el número de experimentos por configuración en función de la variabilidad señalada como la mayor para reducir el error en los registros de los tiempos de ignición.

También resulta interesante para futuros trabajos avanzar en la caracterización de diferentes tipos de materia forestal; diferentes niveles de humedad, asemejándose a condiciones más reales; y avanzar en la

medición de otros gases producidos en el proceso de combustión que puede servir para determinar el grado en que se da la combustión completa y la aparición de otros posibles gases contaminantes.



Bibliografía

- Abbasi, Tasneem y Abbasi, SA (2010). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 919–937. 1.1.1
- Antal, Michael Jerry Jr y Varhegyi, Gabor (1995). Cellulose pyrolysis kinetics: the current state of knowledge. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 34(3), 703–717. 1.1.3
- ASABE, Standard (2011). American society for agricultural and biological engineers. 2.2.5.3
- ASTM D4442-07, Standard (2007). Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. 2.2.5.2
- ASTM E1354-11b, Standard (2011). Standard test method for heat and visible smoke release rate for materials and products using an oxygen consumption calorimeter. 1, 2.3
- ASTM E2058-03, Standard (2003). Standard test methods for measurement of material flammability using a fire propagation apparatus (fpa). 2.3
- ASTM E906 / E906M-10, Standard (2010). Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using a thermopile method. 2.3, 2.4.2
- Babrauskas, Vytenis (1986). Comparative Rates of Heat Release from Five Different Types of Test Apparatuses. 4. 2.4
- Babrauskas, Vytenis (2002). Ignition of wood: a review of the state of the art. *Journal of Fire Protection Engineering*, 12. 3.2.4
- Bertran, J y Morales, E (2008). Potencial de generación de energía por residuos del manejo forestal en Chile. *Santiago, Chile. Comisión Nacional de Energía (CNE)/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH*. 1.1.1
- Biteau, Hubert; Steinhaus, Thomas; Simeoni, Albert; Schemel, Christopher; Marlair, Guy; Bal, Nicolas; y Torero, Jose L (2008). Calculation methods for the heat release rate of materials of unknown composition. 2.2.6, 2.4.2, 2.4.2
- Bustos, F; Lazo, C; Contreras, J; y Fuentes, A (2016a). Analysis of a solar and aerothermal plant combined with a conventional system in an esco model in Chile. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1156–1167. 1.1.1
- Bustos, F; Toledo, A; Contreras, J; y Fuentes, A (2016b). Sensitivity analysis of a photovoltaic solar plant in Chile. *Renewable Energy*, 87, 145–153. 1.1.1
- CarboChile (2015b). Kaowool hp 1260 datasheet. 2.5.1.2
- Carmona, R. y Urzúa, Á. (2013). *Caracterización de biomasa leñosa con fines energéticos disponible en Chile*. 2.2.4, 2.2.4.1, 2.2.4.2, 2.2.5.3, 2.2.5.6

- Chow, WK y Han, SS (2011). Heat release rate calculation in oxygen consumption calorimetry. *Applied thermal engineering*, 31. 2.4.2
- contra Incendios Forestales, Gerencia Protección (2017). *Ocurrencia y Daño Histórico Nacional de Incendios Forestales*. Technical report, Conaf. (document), 1.1.2, 1.3
- Corbo, Vittorio y Hurtado, Agustín (2014). *Causas y consecuencias del problema energético en Chile: Una visión desde la macroeconomía*. Technical report, Centro de Estudios Públicos, Gobierno de Chile. 1.1.1
- de Información Territorial, Sistema (2016). *Plantaciones forestales 1970 - 2016*. Technical report, Conaf. (document), 1.1.3, 1.1
- de Información Territorial, Sistema (2017). *Cifras oficiales Catastros Usos de Suelo y Recursos Vegetacionales*. Technical report, Conaf. 1.1.3, 1.1.3
- De La Maza, C. y Cerda, C. (2014). *Evaluación de impactos sociales y ambientales originados por la extracción de biomasa forestal*. 1.1.1
- de Prospectiva y Política Energética, División (2017). *Informe de Seguimiento 2017, Energía 2050 Política Energética de Chile*. Technical report, Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. 1.1.1, 1.1.1
- Demirbas, Ayhan (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in energy and combustion science*, 30(2). 2.2.5.5
- Enright, Patrick A y Fleischmann, Charles M (1999). Uncertainty of heat release rate calculation of the iso5660–1 cone calorimeter standard test method. *Fire Technology*, 35(2), 153–169. 2.2.6
- (EPA)., Environmental Protection Agency (2009). *Regulation of Fuels and Fuel Additives: Changes to Renewable Fuel Standard Program*. Technical report, Federal Register, United States Government. 1.1.1
- Filipcak, Robert; Crowley, Sean; y Lyon, Richard E (2005). Heat release rate measurements of thin samples in the osu apparatus and the cone calorimeter. *Fire safety journal*, 40. 2.4.2
- Fuentes, A. y Consalvi, J. L. (2014). Experimental study of the burning rate of small-scale forest fuel layers. *International Journal of Thermal Sciences*. 2.2.5.2
- García, Roberto; Pizarro, Consuelo; Lavín, Antonio G; y Bueno, Julio L (2014). Spanish biofuels heating value estimation. part i: Ultimate analysis data. *Fuel*, 117. 2.2.8
- Gobierno de Chile, Ministerio de Medio Ambiente (2016). Plan de acción nacional de cambio climático 2017 - 2022. 1.1.1
- Hartmann, Hans y Kaltschmitt, M (2001). *Energie aus biomasse–grundlagen. Techniken und Verfahren*. (document), 2.2
- Hernández, N; Fuentes, A; Consalvi, JL; y Elicer-Cortés, JC (2018). Spontaneous ignition of wildland fuel by idealized firebrands. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 95, 88–95. 2.2.7
- Howell, John R; Menguc, M Pinar; y Siegel, Robert (2010). *Thermal radiation heat transfer*. CRC press. 2.5.2.2
- Huggett, Clayton (1980). Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. *Fire and Materials*, 4. 2.2.6, 2.4.2
- Inc., PKL Technology (2015). *Spectra-1 duct monitor user manual*. 2.5.2.2
- Janssens, ML (1995). Methods and equations of fire calorimetry. In *Proceedings of the Fire Calorimetry Conference*. 2.4, 2.4.1, 2.4.1, 2.4.2
- Janssens, Marc (2016). Calorimetry. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 905–951). Springer. 1

- Keane, Robert E (2015). *Wildland fuel fundamentals and applications*. Springer. 2.2.2, 2.2.3, 2.2.3, 2.2.3
- Morvan, D y Dupuy, JL (2004). Modeling the propagation of a wildfire through a mediterranean shrub using a multiphase formulation. *Combustion and flame*, 138(3), 199–210. 1.1.2
- Muñoz-Feucht, K.; Fuentes, A.; y Consalvi, J. L. (2014). Soot volume fraction measurements in a forest fuel layer. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2.2.1, 3.2.2, 4.1.1
- Nacional, Coordinador Eléctrico (2016). *Reporte Anual 2016*. Technical report, Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. (document), 1.1.1, 1.2
- Nacional, Coordinador Eléctrico (2017). *Anuario Estadístico de Energía 2017*. Technical report, Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. (document), 1.1.1, 1.1
- Obernberger, Ingwald; Brunner, Thomas; y Bärnthaler, Georg (2006). Chemical properties of solid bio-fuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30(11). 2.2.5.5, 2.2.5.6
- Parker, W.J. (1984). Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications. *Journal of Fire Sciences*, 2. 2.4.2, 2.4.2
- Perez-Ramirez, Yolanda; Santoni, P; Darabiha, Nasser; Leroy-Cancellieri, V; y Leoni, Eric (2012). A global kinetic model for the combustion of the evolved gases in wildland fires. *Combustion Science and Technology*, 184(9), 1380–1394. 1.1.2
- Rivera, Juan de Dios; Davies, G Matt; y Jahn, Wolfram (2012). Flammability and the heat of combustion of natural fuels: a review. *Combustion Science and Technology*, 184(2). 2.2.8
- Sanderson, Matt A; Agblevor, Foster; Collins, Michael; y Johnson, David K (1996). Compositional analysis of biomass feedstocks by near infrared reflectance spectroscopy. *Biomass and bioenergy*, 11(5), 365–370. 1.1.1
- Santoni, Paul Antoine; Romagnoli, Elodie; Chiaramonti, Nathalie; y Barboni, Toussaint (2015). Scale effects on the heat release rate, smoke production rate, and species yields for a vegetation bed. *Journal of Fire Sciences*. 2.2.5.2, 3.2.2
- Sjostrom, Eero (2013). *Wood chemistry: fundamentals and applications*. Elsevier. 2.2.4.2, 2.2.5.5
- Thornton, WM (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. 2.4.2
- ToolBox, TE (2016). The engineering toolbox. *Google Scholar*. 3.1.1
- Torero, José (2016). Flaming ignition of solid fuels. In *SFPE handbook of fire protection engineering* (pp. 633–661). Springer. 2.2.7
- Van Dyken, Silke; Bakken, Bjorn H; y Skjelbred, Hans I (2010). Linear mixed-integer models for biomass supply chains with transport, storage and processing. *Energy*, 35(3). 2.2.8
- Volkwein, Christopher Hannie (2016). Calorimetric study of renewable fuels with the sensible heat calorimetry apparatus. (document), 2.2.8, 2.4, 2.4.1, 2.4.1, 2.4.1, 2.5.1.1, 2.5.1.1, 2.5.1.1, 2.3, 2.5.1.2, 2.4, 2.5, 2.5.1.2, 2.6, 2.5.1.2, 2.5.1.2, 2.5.2.1, 2.5.2.2, 3.1.1, 3.1.1, 4.1.4, 4.1.6
- Weber, RO (1991). Modelling fire spread through fuel beds. *Progress in Energy and Combustion Science*, 17(1), 67–82. 1.1.2
- Weston, Cristobal (2017). Estudio experimental del tiempo de ignición para un lecho poroso representativo de un combustible forestal. 1.1.2