



Evaluación experimental del potencial energético de residuos sólidos provenientes del sector comercial e industrial

Maximiliano Sebastián Mosquera Inostroza

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:
Dr.- Ing. Oscar Farias F.

Diciembre 2025
Concepción, Chile

Agradecimientos

Dedico este logro a quienes creyeron en mi incluso en los momentos más difíciles.

Resumen

El incremento sostenido en la generación de residuos sólidos en la Región del Biobío y las limitaciones operativas de los rellenos sanitarios intensifican la necesidad de alternativas sostenibles para su gestión. En este contexto, el presente estudio evalúa la viabilidad de valorizar energéticamente residuos sólidos del sector comercial e industrial del Gran Concepción, con el objetivo de determinar su potencial energético como combustibles en sistemas de combustión de pequeña escala. Adicionalmente, se estimó el potencial energético asociado a los flujos reales de generación de residuos, permitiendo contextualizar los resultados experimentales a escala territorial. El propósito general es cuantificar experimentalmente el comportamiento térmico y la eficiencia energética de residuos seleccionados mediante su caracterización fisicoquímica y su combustión controlada en un reactor de tiro natural construido para este trabajo.

La metodología se estructura en cuatro etapas principales. Primero, se identifican y seleccionan residuos representativos, tales como cáscaras de cítricos, de palta y de papa, mediante encuestas a establecimientos locales. Luego, se caracterizan a través de un análisis de humedad y la determinación del poder calorífico utilizando un calorímetro. En la tercera etapa, se diseña y construye un reactor de combustión vertical de tiro natural empleando materiales reciclados, equipo que permite realizar ensayos controlados bajo condiciones reproducibles. Finalmente, se llevan a cabo experimentos de combustión en tres configuraciones que incluyen biomasa pura y mezclas con 10 g y 20 g de polímero PET. Cada ensayo consiste en alimentar el reactor con una masa constante de residuo, encenderlo bajo un protocolo estandarizado y registrar variables clave, entre las que se encuentran la temperatura superficial del reactor, la temperatura del fluido de trabajo, el tiempo de combustión y cenizas. A partir de estos datos se determinan la potencia térmica instantánea, la tasa de quemado y la eficiencia global del sistema.

Los resultados muestran diferencias marcadas entre las fracciones evaluadas. Las cáscaras de cítricos y de palta alcanzan las mayores eficiencias térmicas, con valores de 13,75 % y 13,17 %, respectivamente, además de potencias promedio de 6,1 kW y 4,7 kW, asociadas a su elevado contenido de volátiles y lípidos. En contraste, las cáscaras de papa exhiben un bajo rendimiento energético debido a su alta humedad, la cual limita el aumento de temperatura y genera una combustión incompleta. Un hallazgo relevante es que la incorporación de PET no produce la sinergia esperada, ya que el polímero fundido encapsula la biomasa y restringe la difusión de oxígeno, reduciendo la potencia máxima desde los 17,3 kW obtenidos con biomasa pura hasta 4,2 kW en la configuración con 20 g de PET.

En conclusión, la combustión de residuos orgánicos en un reactor de tiro natural constituye una alternativa técnicamente viable para fracciones con alto contenido de volátiles y lípidos, mientras que los residuos con humedades del orden del 70 % o superiores requieren pretratamientos para mejorar su desempeño energético. Asimismo, la co-combustión con PET no resulta recomendable sin un control del flujo de aire o modificaciones al diseño del sistema. En conjunto, este estudio aporta fundamentos experimentales y metodológicos para el desarrollo de tecnologías de valorización energética, adaptadas a la realidad local y orientadas a la gestión sostenible de residuos.

Abstract

The sustained increase in solid waste generation in the Biobío Region, together with the operational limitations of sanitary landfills, intensifies the need for sustainable waste management alternatives. In this context, the present study evaluates the feasibility of energy valorization of solid waste from the commercial and industrial sectors of Greater Concepción, with the aim of determining its energy potential as a fuel for small-scale combustion systems. Additionally, the energy potential associated with real waste generation flows was estimated, allowing the experimental results to be contextualized at a territorial scale. The main objective is to experimentally quantify the thermal behavior and energy efficiency of selected residues through physicochemical characterization and controlled combustion in a natural draft reactor built for this purpose.

The methodology is structured in four main stages. First, representative residues such as citrus peels, avocado peels, and potato peels are identified and selected through surveys of local establishments. Subsequently, the residues are characterized by moisture content analysis and the determination of their calorific value using a calorimeter. In the third stage, a vertical natural draft combustion reactor is designed and constructed using recycled materials, enabling controlled experiments under reproducible conditions. Finally, combustion experiments are conducted under three configurations, including pure biomass and mixtures with 10 g and 20 g of PET polymer. Each test consists of feeding the reactor with a constant mass of residue, igniting it under a standardized protocol, and recording key variables such as reactor surface temperature, working fluid temperature, combustion time, and ash generation. From these data, the instantaneous thermal power, burn rate, and overall system efficiency are determined.

The results show marked differences among the evaluated fractions. Citrus and avocado peels achieve the highest thermal efficiencies, with values of 13.75% and 13.17%, respectively, as well as average thermal powers of 6.1 kW and 4.7 kW, associated with their high content of volatile compounds and lipids. In contrast, potato peels exhibit low energy performance due to their high moisture content, which limits temperature rise and leads to incomplete combustion. A relevant finding is that the incorporation of PET does not produce the expected energetic synergy, as the molten polymer encapsulates the biomass and restricts oxygen diffusion, reducing the maximum thermal power from 17.3 kW obtained with pure biomass to 4.2 kW in the configuration with 20 g of PET.

In conclusion, the combustion of organic residues in a natural draft reactor constitutes a technically viable alternative for fractions with high volatile and lipid content, whereas residues with moisture contents of approximately 70% or higher require pretreatments to improve their energy performance. Likewise, co-combustion with PET is not recommended without active airflow control or design modifications. Overall, this study provides experimental and methodological foundations for the development of energy valorization technologies adapted to local conditions and oriented toward sustainable waste management.

Contenidos

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas.....	3
1 Introducción	4
1.1 Contexto general.....	4
1.2 Hipótesis.....	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Alcances del proyecto	5
1.4.1 Alcances	5
1.4.2 Limitaciones.....	5
1.5 Metodología utilizada	6
2 Selección de condiciones para el estudio.....	7
2.1 Tecnologías de valorización energética de residuos sólidos	7
2.1.1 Condiciones y tecnologías de incineración	8
2.1.2 Fundamentos de la combustión de RSU	10
2.2 Identificación y selección de residuos del Gran Concepción	11
2.3 Recolección y caracterización de los residuos seleccionados	11
2.3.1 Recolección de información mediante encuestas	11
2.3.2 Recolección de muestras representativas y preparación para estudio	13
2.3.3 Caracterización fisicoquímica y energética de los residuos seleccionados	13
3 Fabricación del reactor.....	19
3.1 Evaluación comparativa y selección del reactor	19
3.1.1 Criterio de selección del reactor	19
3.1.2 Alternativas de reactor	21
3.1.3 Selección de reactor	22
3.2 Diseño y construcción del reactor	23
3.2.1 Geometría y dimensiones.....	23
3.2.2 Selección de materiales	24
3.2.3 Sistema de alimentación y evacuación de gases	24
3.2.4 Sistema de encendido.....	25
3.2.5 Instrumentación y control.....	26
4 Análisis experimental.....	27
4.1 Descripción general de los ensayos	27
4.1.1 Estandarización de la carga energética del combustible.....	27

4.1.2	Diseño experimental	28
4.1.3	Procedimiento experimental.....	29
4.2	Evaluación del desempeño térmico del sistema	29
4.2.1	Energía útil entregada	29
4.2.2	Eficiencia térmica del sistema	30
4.2.3	Tasa de Quemado	30
4.3	Análisis de resultados	31
4.3.1	Ensayo cascaras de palta	31
4.3.2	Ensayos cascaras de cítricos	38
4.3.3	Ensayos cascaras de papa.....	44
4.4	Análisis comparativo	49
4.4.1	Variación de masa y tasa de quemado.....	50
4.4.2	Potencia de combustión.....	50
4.4.3	Perfil de variación de temperaturas superficiales en el tiempo	52
4.4.4	Perfil de temperatura de agua en el tiempo	53
4.4.5	Potencia útil al agua	54
4.5	Evaluación del potencial energético de residuos seleccionados.....	55
4.5.1	Balance de masa y energía para secado de los residuos	55
4.5.2	Potencial energético de la fracción seca	57
4.5.3	Calor útil recuperable en escenarios de conversión energética	57
4.5.4	Discusión técnica del calor útil recuperable	58
5	Conclusiones.....	60
	Referencias.....	61
	Anexo.....	63

Lista de Figuras

Figura 1:Esquema metodológico de proyecto	6
Figura 2: Grafico de frecuencia de aparición de residuos mencionados por cada establecimiento.....	12
Figura 3: Balanza de precisión.....	14
Figura 4: Recipiente de secado de residuos.	14
Figura 5: Calorímetro isotérmico CAL2K ECO.	15
Figura 6: Sistema de suministro y conexión de oxígeno al calorímetro CAL2K ECO.	16
Figura 7: Balanza de precisión utilizada para el pesaje de las muestras antes del ensayo calorimétrico.	17
Figura 8: Componentes internos del tubo de combustión y disposición del crisol en el calorímetro.....	17
Figura 9: Vistas del reactor ensamblado.	23
Figura 10: Reactor ensamblado en laboratorio.	23
Figura 11: Anafe eléctrico en espiral recubierto seleccionado.	25
Figura 12: Termómetro digital Dwyer 472A.	26
Figura 13: Cámara termográfica Testo 872.	26
Figura 14:Cinética de degradación másica y tasa de quemado para cáscaras de palta...	33
Figura 15: Potencia térmica del combustible en función del tiempo para cascaras de palta.	34
Figura 16: Ejemplo de imagen termográfica realizada durante los ensayos.	34
Figura 17: Foto realizada por cámara termográfica durante ensayos.....	35
Figura 18: Perfil de decaimiento térmico en la cámara de combustión para cáscaras de palta.....	36
Figura 19: Curvas de calentamiento de agua en el tiempo para cáscaras de palta.....	37
Figura 20: Potencial útil a fluido de trabajo en el tiempo por cascaras de palta.....	38
Figura 21: Cinética de degradación másica y tasa de quemado para cáscaras de cítricos.	40
Figura 22: Potencia térmica del combustible en función del tiempo para cascaras de cítricos.	41
Figura 23: Perfil de decaimiento térmico en la cámara de combustión para cáscaras de cítricos.	42
Figura 24: Curvas de calentamiento de agua en el tiempo para cáscaras de cítricos.	43
Figura 25: Potencia útil transferida de cítricos al fluido de trabajo en función del tiempo.	44
Figura 26: Cinética de degradación másica y tasa de quemado para cáscaras de papa.	46
Figura 27: Potencia térmica del combustible en función del tiempo para cascaras de papa.	46
Figura 28: Perfil de decaimiento térmico en la cámara de combustión para cáscaras de papa.	47
Figura 29: Curvas de calentamiento de agua en el tiempo para cáscaras de papa.....	48
Figura 30: Potencia útil transferida de papas al fluido de trabajo en función del tiempo... ..	49
Figura 31: Variación de masa del combustible y tasa de quemado para Experiencia 1....	50

Figura 32: Evolución de la potencia térmica liberada por la combustión de biomasa.	51
Figura 33: Perfil de temperaturas superficiales promedio en el tiempo para Experiencia 1.	52
Figura 34: Perfil de temperatura del agua en el tiempo para Experiencia 1.	53
Figura 35: Potencia útil transferida al agua para Experiencia 1.....	54
Figura 36: Sistema de secado e incineración.....	56

Lista de Tablas

Tabla 1. Tabla comparativa de tecnologías de valorización energética de residuos sólidos.	8
Tabla 2. Tabla comparativa de tecnologías de incineración de residuos sólidos.	10
Tabla 3: Tabla de resultados agrupados obtenidos por encuesta.	12
Tabla 4: Análisis elemental e inmediato de residuos seleccionados.	19
Tabla 5: Tabla comparativa de tipos de reactores para valorización energética.	21
Tabla 6: Ajuste de masas de residuos orgánicos según cantidad de PET añadido.	28
Tabla 7: Resumen de parámetros energéticos y eficiencia térmica de combustión de cascaras de palta.	32
Tabla 8: Parámetros cinéticos y funciones para las experiencias de cascaras de palta.	32
Tabla 9: Resumen de parámetros energéticos y eficiencia térmica en la combustión de cáscaras de cítricos.	38
Tabla 10: Parámetros cinéticos y funciones para las experiencias de cascaras de citricos.	39
Tabla 11: Resumen de parámetros energéticos y eficiencia térmica en la combustión de cáscaras de papa.	44
Tabla 12: Parámetros cinéticos y funciones para las experiencias de cascaras de papa.	45
Tabla 13: Generación de residuos sólidos a disposición final y contenido de humedad.	55
Tabla 14: Valores de energía de secado para masa de residuos mensual.	57
Tabla 15: Potencial energético de las fracciones seleccionadas.	57
Tabla 16: Energía útil recuperable para aprovechamiento energético.	58

1 Introducción

1.1 Contexto general

El crecimiento poblacional, la actividad económica y la expansión urbana han generado un aumento sostenido en la producción de residuos sólidos urbanos (RSU), presionando los sistemas de disposición final. En Chile, y especialmente en la Región del Biobío, la generación per cápita pasó de 0,88 kg/hab·día en 2015 a 1,1 kg/hab·día en años recientes (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

En Latinoamérica, el problema se agrava por las bajas tasas de reciclaje que son menores al 15 % y la predominancia del vertido en rellenos sanitarios. Chile produce cerca de 17 millones de toneladas anuales, de las cuales solo una fracción mínima se valoriza, lo que convierte al país en uno de los más contaminantes de la región (Kaza et al., 2018).

Los rellenos sanitarios enfrentan limitaciones de capacidad y vida útil, generando un desafío ambiental y logístico creciente. Frente a ello, las tecnologías de valorización energética, como la incineración se ofrecen como una alternativa viable, capaz de reducir hasta un 90 % del volumen de residuos y un 75 % de su masa, mientras generan energía térmica aprovechable. Aunque existen emisiones asociadas, los sistemas modernos incorporan equipos de control que minimizan el impacto ambiental y evitan la liberación de metano proveniente de la descomposición anaerobia.

En este contexto, el presente trabajo se orienta a la valorización energética de fracciones específicas de RSU del sector comercial del Gran Concepción, mediante combustión en un reactor experimental. El sistema será construido con materiales reciclados y de bajo costo, priorizando un enfoque sustentable y replicable en entornos educativos o de recursos limitados.

El objetivo es evaluar el potencial energético de los residuos, caracterizando su poder calorífico, comportamiento térmico y propiedades termoquímicas en condiciones de combustión controlada. Con ello se busca establecer parámetros de operación óptimos y aportar una base técnica para soluciones descentralizadas de valorización energética, adaptadas a la realidad local y replicables en otras comunas del país.

1.2 Hipótesis

La implementación de un reactor de combustión de tiro natural, diseñado con materiales reciclados, permite la valorización energética efectiva de fracciones orgánicas de residuos sólidos comerciales, logrando eficiencias térmicas comparables a sistemas de biomasa de pequeña escala. Asimismo, se postula que la adición controlada de polímeros de alto poder calorífico (PET) genera un efecto sinérgico en la mezcla combustible, incrementando la densidad energética y estabilizando la tasa de liberación de calor durante el proceso de incineración.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar experimentalmente el potencial energético de residuos sólidos provenientes del sector comercial e industrial del Gran Concepción, mediante análisis de poder calorífico y caracterización fisicoquímica.

1.3.2 Objetivos específicos

- 1) Seleccionar residuos sólidos representativos del sector comercial mediante criterios técnicos (composición, volumen) y ambientales (impacto potencial), recolectando al menos tres tipos distintos en un plazo de dos semanas.
- 2) Caracterizar desde el punto de vista energético los residuos seleccionados.
- 3) Diseñar y construir un reactor experimental de escala laboratorio para evaluar el comportamiento térmico de los residuos.
- 4) Determinar el potencial energético y la viabilidad técnica para combustionar los residuos seleccionados.

1.4 Alcances del proyecto

El presente proyecto se enfoca en el diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor experimental destinado a la valorización energética de fracciones seleccionadas de residuos sólidos urbanos. Estas fracciones serán incineradas de forma independiente con el fin de evaluar su desempeño térmico, generación de subproductos y potencial energético, bajo un enfoque sustentable, de bajo costo y alta replicabilidad.

1.4.1 Alcances

- Estudio y análisis de tecnologías de combustión y reactores utilizados en valorización energética de residuos a nivel nacional e internacional.
- Preselección y caracterización fisicoquímica de fracciones de RSU aptas para combustión directa.
- Diseño conceptual y dimensionamiento del reactor, incluyendo cámara de combustión, sistemas de alimentación y evacuación de gases.
- Estimación del potencial energético y análisis comparativo del rendimiento por tipo de residuo.
- Elaboración de propuestas técnicas para la integración futura de sistemas de recuperación de energía térmica.

1.4.2 Limitaciones

- El estudio se limita a un prototipo a escala, por lo que los resultados no representan de forma directa el rendimiento a escala industrial.
- Se limita a residuos sólidos urbanos no peligrosos, excluyendo residuos industriales, hospitalarios o con alto contenido de metales pesados.
- No se realiza un análisis ambiental exhaustivo, aunque se incluyen consideraciones generales sobre emisiones y tratamiento de gases.
- No se contempla el diseño detallado de sistemas de control de emisiones, enfoque limitado al reactor y su desempeño térmico.

1.5 Metodología utilizada

A continuación, en la siguiente figura está el esquema metodológico de la formulación y confección del proyecto:

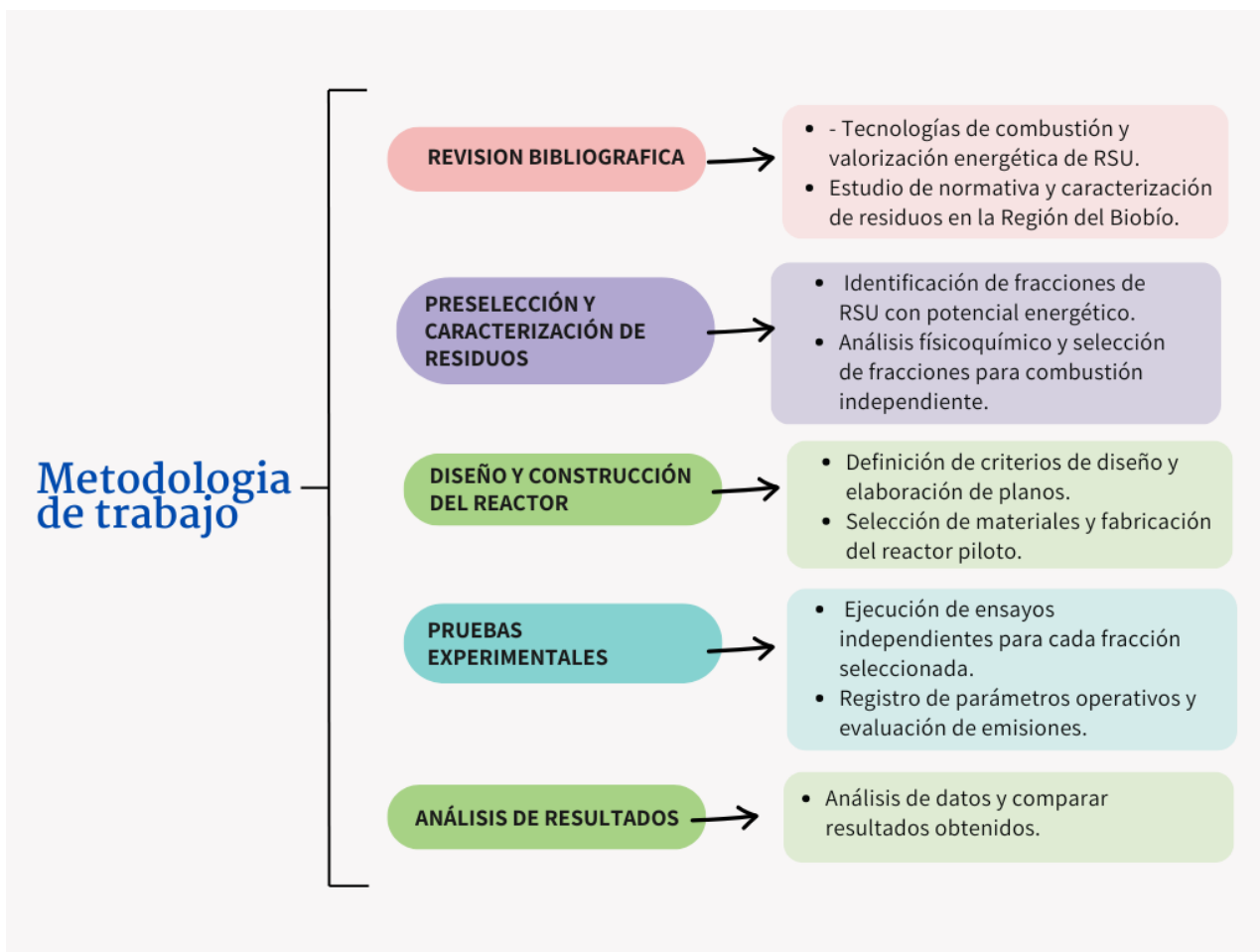


Figura 1:Esquema metodológico de proyecto

Fuente: Elaboración propia.

La metodología se estructuró en cinco etapas principales, orientadas al diseño, construcción y evaluación de un reactor piloto de incineración de residuos sólidos del sector comercial e industrial.

En la primera etapa, se realizó una revisión de antecedentes técnicos y normativos, recopilando información sobre tecnologías de incineración, valorización energética y sus aplicaciones en diferentes contextos, con énfasis en experiencias internacionales adaptables al marco regulatorio y ambiental chileno.

La segunda etapa correspondió a la preselección y caracterización de residuos, identificando las fracciones con mayor representatividad y potencial energético en la Región del Biobío. Para esta caracterización se determinó experimentalmente el contenido de humedad mediante secado controlado hasta alcanzar masa constante, y el poder calorífico empleando un calorímetro isotérmico CAL2K ECO, de acuerdo con los estándares

internacionales ISO, DIN y ASTM. Complementariamente, se obtuvieron valores de composición elemental e inmediata a partir de fuentes bibliográficas.

En la tercera etapa, se efectuó el diseño y construcción del reactor experimental, definiendo el tipo de combustión, capacidad, suministro de aire, sistemas de control y registro de datos. Se elaboraron planos y se seleccionaron materiales reciclados capaces de resistir altas temperaturas y condiciones corrosivas. Asimismo, se implementaron termocuplas y una cámara termográfica para el registro de temperaturas en distintos puntos del sistema.

La cuarta etapa comprendió la ejecución de ensayos de combustión independientes para cada fracción seleccionada. Se utilizó un volumen definido de agua como carga térmica para estimar la eficiencia del proceso, registrando la temperatura alcanzada, el tiempo de calentamiento, la tasa de quemado y la cantidad de cenizas generadas.

Finalmente, en la quinta etapa, se analizaron los resultados experimentales para comparar la eficiencia energética de cada fracción y determinar los factores que influyen en el desempeño térmico del reactor. Con base en estos hallazgos, se formularon recomendaciones técnicas orientadas a la optimización del diseño y al posible escalamiento del sistema hacia aplicaciones de mayor capacidad.

2 Selección de condiciones para el estudio

La caracterización de los residuos constituye una etapa esencial en el proceso de valorización energética, ya que determina las propiedades que condicionan su comportamiento durante la combustión y eficiencia. En este capítulo se aborda la selección y análisis de las fracciones residuales más representativas del sector comercial e industrial del Gran Concepción, con el objetivo de identificar aquellas con mayor potencial energético y viabilidad técnica para su tratamiento térmico.

El proceso de selección se desarrolló en función de criterios técnicos, ambientales y logísticos, asegurando la coherencia con los objetivos de sostenibilidad y la factibilidad operativa del proyecto. Posteriormente, se describen los procedimientos experimentales empleados para la determinación del contenido de humedad, el poder calorífico y la composición elemental e inmediata de los residuos seleccionados. Estos resultados constituyen la base para el diseño y evaluación del sistema de combustión a escala piloto, permitiendo establecer relaciones entre las propiedades del combustible y el desempeño térmico global del reactor.

2.1 Tecnologías de valorización energética de residuos sólidos

La valorización energética de residuos sólidos constituye una alternativa viable para reducir la cantidad de materiales destinados a disposición final, al mismo tiempo que se obtiene energía útil en forma de calor o electricidad. Entre las principales tecnologías utilizadas se encuentran la combustión directa, la gasificación, la pirolisis y la digestión anaerobia, cuya selección depende de la naturaleza de los residuos y de los objetivos del proceso.

La combustión es el método más consolidado y ampliamente utilizado, consiste en la oxidación completa del material combustible a altas temperaturas (850–1100 °C) en

presencia de oxígeno. Este proceso permite recuperar energía térmica, reducir el volumen de residuos y disminuir el impacto ambiental asociado al vertido. Su eficiencia depende del contenido de humedad, poder calorífico y fracción inerte del material.

Por otro lado, la gasificación y la pirolisis operan en condiciones de oxígeno limitado o ausencia de este, produciendo gases combustibles y aceites con potencial energético. Sin embargo, requieren un mayor control de temperatura y composición del material alimentado. En el caso de residuos con alto contenido orgánico húmedo, la digestión anaerobia representa una alternativa más adecuada, ya que permite la obtención de biogás mediante procesos biológicos controlados.

En la Tabla 1 se presenta una comparación general de las principales tecnologías de valorización energética aplicables a residuos sólidos urbanos.

Tabla 1. Tabla comparativa de tecnologías de valorización energética de residuos sólidos.

Tecnología	Temperatura típica (°C)	Requiere oxígeno	Producto principal	Aplicabilidad
<i>Combustión</i>	850-1100	Si	Calor / vapor	RSU secos y heterogéneos
<i>Gasificación</i>	700-1000	Parcial	Gas de síntesis	Residuos con bajo contenido de humedad
<i>Pirolisis</i>	400-800	No	Aceites y gases combustibles	Plástico y biomasa seca
<i>Digestión anaeróbica</i>	35-55	No	Biogás	Residuos orgánicos húmedos

2.1.1 Condiciones y tecnologías de incineración

La incineración es la tecnología más madura y probada, especialmente en contextos urbanos, donde se requiere alta confiabilidad operativa y control de emisiones, pero existen inconvenientes debido al uso de residuos sólidos como combustible. Por ello se requiere ciertas consideraciones en su funcionamiento, para poder tener un proceso de incineración estable y que sea más eficientes, las cuales son:

- Área de contacto entre los residuos y el aire circundante, corresponde al área necesaria para alcanzar la temperatura de combustión óptima para poder transformar los productos de la combustión en su totalidad.
- El tiempo de incineración en condiciones de temperatura y presión de oxígeno debe ser superior a la de conversión completa; para poder tener una transformación adecuada de los comburentes.
- Eliminación de cenizas y escorias constantes, para poder tener una mejor transferencia de calor durante el proceso de incineración.
- Distribución de temperaturas en el incinerador.

Para realizar el proceso de incineración se utilizan hornos de incineración, los cuales pueden ser de diferentes tipos como son los siguientes:

- Hornos de parrilla: Son los más comunes debido a su versatilidad y capacidad de tratamiento térmico. El desplazamiento de los residuos se realiza por gravedad, gracias al ángulo inclinado de la parrilla, o mediante sistemas hidráulicos que los mueven sobre rodillos, planos inclinados o parrillas móviles.

Por otro lado, una ventaja es que no requieren trituración previa; sin embargo, pueden producir acumulaciones que dificultan la transferencia de calor por radiación. El suministro de aire es esencial para la combustión, aunque su elevado caudal puede arrastrar material y, si se introduce a temperaturas cercanas a 160 °C, enfriar los residuos e impedir su gasificación. Según la dirección del flujo, se distinguen hornos de parrilla de flujo paralelo, contraflujo y flujo central.

- Hornos rotatorios: Permiten incinerar prácticamente cualquier tipo de residuo, incluidos industriales y mezclas de RSU con poder calorífico variable. Consisten en un tambor rotatorio apoyado en ruedas y accionado por un motor eléctrico con variador de frecuencia, lo que permite controlar la velocidad angular. El interior está recubierto con material refractario y aislante térmico para maximizar la transferencia de calor. Operan entre 850 °C y 1100 °C, y el tiempo de residencia depende de la velocidad de rotación y la inclinación del tambor. Tras la combustión primaria, se requiere un horno de postcombustión para asegurar la destrucción de compuestos tóxicos.
- Horno de lecho fluidizado: Se utilizan para residuos de bajo poder calorífico o con tamaños heterogéneos, que dificultan una combustión estable. La fluidización se logra al hacer pasar un flujo de gas a través de partículas sólidas, que se comportan como un fluido. Este sistema ofrece una rápida transferencia de calor y una distribución uniforme de temperatura y oxígeno, garantizando un funcionamiento estable y controlado. Existen dos variantes principales: el lecho estacionario o burbujeante, y el lecho circulante.

Tabla 2. Tabla comparativa de tecnologías de incineración de residuos sólidos.

Tecnología	Tipo de residuos	Temperatura típica	Eficiencia térmica	Ventajas	Desventajas
Horno de parrilla fija	Cualquier tipo de RSU	850–1100 °C	15–25%	Robusto, bajo mantenimiento, adecuado para residuos sin clasificar	Baja eficiencia térmica, gran volumen de escoria
Horno rotatorio	Residuos peligrosos, biomasa, RSU húmedos	850–1200 °C	20–30%	Excelente mezcla y combustión uniforme, adaptable a variabilidad	Alto costo y mantenimiento, requiere control de emisiones
Lecho fluidizado	RSU homogéneos, biomasa	800–950 °C	25–35%	Alta eficiencia, buena transferencia térmica, menor escoria	Necesita pretratamiento de residuos, riesgo de erosión
Plasma térmico	RSU especiales, peligrosos	2.000–5.000 °C	>40%	Volatilización total, bajo volumen de residuos finales	Muy alto consumo energético, alto costo de inversión y operación
Pirólisis / Gasificación	RSU secos, plásticos, biomasa	400–900 °C	10–20%	Bajo contenido de cenizas, menor formación de dioxinas	Requiere residuos secos y homogéneos, control complejo del proceso

2.1.2 Fundamentos de la combustión de RSU

La combustión es una reacción de oxidación rápida entre un combustible y un oxidante (generalmente aire), que libera energía térmica. En el caso de los residuos sólidos, el proceso involucra una serie de etapas: secado, desvolatilización, combustión de volátiles y combustión del carbono fijo. La eficiencia de estas etapas depende de la composición química y física del material, así como de las condiciones de operación del sistema.

Un suministro adecuado de aire resulta fundamental para asegurar la oxidación completa de los compuestos orgánicos. Un déficit de oxígeno conduce a la formación de monóxido de carbono y compuestos orgánicos no quemados, mientras que un exceso disminuye la

eficiencia térmica debido a las pérdidas de calor en los gases de combustión. Por ello, el control de la relación aire-combustible, la temperatura y el tiempo de residencia son factores determinantes en la estabilidad y rendimiento del proceso.

2.2 Identificación y selección de residuos del Gran Concepción

La identificación de las fuentes generadoras de residuos en la zona del Gran Concepción se realizó considerando establecimientos del sector comercial e industrial, debido a su alta tasa de generación y composición heterogénea, con fracciones orgánicas y plásticas susceptibles de valorización energética. Entre los principales generadores se encuentran ferias libres, locales gastronómicos, supermercados, mercados mayoristas y pequeñas industrias alimentarias.

Con base en la información recopilada, se definieron criterios de selección orientados a garantizar la viabilidad técnica del estudio y la coherencia con los objetivos de sostenibilidad del proyecto.

La selección de los residuos a estudiar se realizó en función de criterios técnicos, ambientales y logísticos, con el objetivo de asegurar la viabilidad del proceso y la coherencia con los objetivos de valorización energética del proyecto.

Desde el enfoque técnico, se consideraron parámetros como el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior, así como la composición inmediata y elemental. También se evaluó la disponibilidad y volumen de generación de cada tipo de residuo, buscando garantizar un suministro representativo y estable para los ensayos.

En cuanto a los criterios ambientales, se priorizaron los residuos que contribuyen a reducir la disposición final y las emisiones contaminantes, excluyendo materiales peligrosos o con alto contenido de cloro, como el PVC. Asimismo, se consideró su potencial para disminuir la huella de carbono mediante la sustitución parcial de combustibles fósiles.

Finalmente, los criterios logísticos se enfocaron en la factibilidad de recolección, transporte y almacenamiento, privilegiando materiales accesibles, de bajo costo y con disponibilidad continua.

2.3 Recolección y caracterización de los residuos seleccionados

2.3.1 Recolección de información mediante encuestas

Con el fin de obtener información directa y actualizada sobre la generación de residuos, se diseñó y aplicó un cuestionario estructurado a una muestra representativa de establecimientos del Gran Concepción. El objetivo fue caracterizar la tipología, cantidad y manejo actual de los residuos.

El cuestionario incluyó preguntas relativas a:

- Tipos de residuos generados y volúmenes.
- Disposición final
- Prácticas de reciclaje o valorización.

Las encuestas fueron aplicadas de manera presencial, en 50 establecimientos gastronómicos variados debido a su relevancia como fuente de residuos orgánicos con alto contenido de humedad y potencial energético. Ver Anexo 1.



Figura 2: Grafico de frecuencia de aparición de residuos mencionados por cada establecimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos que pueden visualizarse en la figura 2, permiten identificar las fracciones más recurrentes, tales como las que se observan a continuación:

Tabla 3: Tabla de resultados agrupados obtenidos por encuesta.

Residuo	Cantidad repetida
Cáscaras de limón y naranja	31
Cáscaras de papa	29
Restos de café	18
Restos de frutas y verduras variadas	18
Restos de pan y masas	15
Cáscaras de cebolla	11
Servilletas y papel absorbente contaminado	11
Cáscaras de palta	9
Restos de té	8

Estas fracciones presentan alta humedad, bajo contenido de cenizas y composición mayoritariamente orgánica, lo que las convierte en materiales de interés para combustión controlada.

2.3.2 Recolección de muestras representativas y preparación para estudio

Con base en los criterios técnicos y ambientales previamente definidos, así como en los resultados obtenidos de las encuestas aplicadas, se procedió a la recolección directa de muestras representativas de residuos sólidos con potencial de valorización energética. Esta etapa tuvo como objetivo disponer de material real para su posterior estudio energético y ensayos de combustión controlada.

La recolección de residuos se realizó de forma propia e independiente. Los residuos fueron seleccionados considerando su frecuencia de aparición, composición fisicoquímica y su impacto futuro dentro del flujo total de residuos producidos.

En particular, se recopilaron los siguientes residuos:

- Cáscaras de papa,
- Cáscaras de limón y naranja,
- Cáscaras de palta,
- Botellas plásticas tipo PET

Estas fracciones fueron recolectadas de manera separada, procurando evitar la mezcla entre tipos de residuos para facilitar el análisis individual posterior.

2.3.3 Caracterización fisicoquímica y energética de los residuos seleccionados

Con el propósito de evaluar el potencial energético de los residuos seleccionados, se llevó a cabo su caracterización fisicoquímica y energética. Esta etapa permitió determinar las propiedades más relevantes para su aprovechamiento térmico mediante ensayos experimentales y la consulta de fuentes bibliográficas especializadas. En particular, se determinó experimentalmente el contenido de humedad y el poder calorífico, mientras que los parámetros correspondientes al análisis elemental e inmediato se obtuvieron a partir de valores representativos reportados para residuos de composición similar.

Determinación del contenido de humedad

El contenido de humedad corresponde a la cantidad de agua presente en los residuos, expresada como un porcentaje de la masa total. Para su determinación, se registró la masa inicial de cada muestra utilizando una balanza de precisión (± 20 g), como se observa en la Figura 3.



Figura 3: Balanza de precisión.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un proceso de secado en un dispositivo artesanal, mostrado en la Figura 4, diseñado para permitir la exposición directa a la radiación solar y una adecuada ventilación. Este proceso se extendió durante varios días, hasta que la masa de los residuos se mantuvo constante, indicando la eliminación de la humedad libre.



Figura 4: Recipiente de secado de residuos.

Fuente: Elaboración propia.

Este método resultó apropiado por su bajo costo y coherencia con los principios de sostenibilidad del proyecto, asegurando además la conservación de la integridad física de las muestras.

El porcentaje de humedad se calculó mediante la siguiente expresión:

$$H(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

- m_i : masa inicial de la muestra (kg)
- m_f : masa final después de secado (kg).

Una vez alcanzada la masa constante, los residuos fueron almacenados para su posterior análisis del poder calorífico y ensayos de combustión controlada.

Determinación poder calorífico:

El poder calorífico de los residuos fue determinado mediante un calorímetro isotérmico CAL2K ECO, como se muestra en la figura 5, diseñado para la medición precisa del poder calorífico de combustibles sólidos y líquidos. Este equipo cumple con los estándares ISO, DIN y ASTM International, la cual establece el procedimiento para la determinación del poder calorífico de combustibles sólidos mediante combustión controlada en una atmósfera de oxígeno.



Figura 5: Calorímetro isotérmico CAL2K ECO.

Fuente: Elaboración propia.

El CAL2K ECO realiza la combustión completa de la muestra en una cámara sellada, presurizada con oxígeno puro a 3 MPa (30 bar), como se observa en la figura 6. A diferencia de los calorímetros convencionales, este modelo no utiliza agua como medio de transferencia térmica, sino un sistema isotérmico con un vaso inteligente patentado, que permite obtener una precisión de hasta cinco decimales en °C. Cada ensayo tiene una duración aproximada de 40 minutos por muestra, incluyendo el tiempo de enfriamiento natural del recipiente.



Figura 6: Sistema de suministro y conexión de oxígeno al calorímetro CAL2K ECO.

Fuente: Elaboración propia.

Las muestras, previamente secadas hasta alcanzar masa constante, fueron cortadas en fragmentos representativos de tamaño adecuado para el crisol de combustión, procurando mantener su estructura original. La masa de cada fragmento se determinó utilizando una balanza de precisión, que se observa en la figura 7, con el fin de obtener una medición exacta de la energía liberada por unidad de masa.



Figura 7: Balanza de precisión utilizada para el pesaje de las muestras antes del ensayo calorimétrico.

Fuente: Elaboración propia.

Cada muestra se colocó directamente en el crisol del calorímetro, que posteriormente se introdujo en la cámara de combustión del equipo. Ver figura 8.

La ignición se efectuó eléctricamente mediante un filamento conductor, lo que permitió iniciar la combustión completa bajo condiciones controladas y reproducibles.



Figura 8: Componentes internos del tubo de combustión y disposición del crisol en el calorímetro.

Fuente: Elaboración propia.

El calor liberado durante la combustión fue determinado a partir de la variación de temperatura registrada por el sistema, considerando la capacidad calorífica efectiva del conjunto, verificada mediante la calibración interna del equipo. A partir de los datos obtenidos, el poder calorífico superior se calculó mediante la siguiente relación:

$$PCS = \frac{C_p \Delta T - Q_c}{m_m} \quad (2)$$

Donde:

- C_p : capacidad calorífica efectiva del sistema (kJ/°C),
- ΔT : variación de temperatura registrada (°C),
- Q_c : corrección por la formación de ácidos (kJ),
- m_m : masa de la muestra (kg).

Posteriormente, el poder calorífico inferior (PCI) se obtuvo corrigiendo el PCS por la energía asociada a la condensación del vapor de agua, según la expresión:

$$PCI = PCS - L_v \times (9H + W) \quad (3)$$

Donde:

- H: contenido de hidrogeno en la muestra (% en masa),
- W: contenido de humedad (% en masa),
- L_v : calor latente de vaporización del agua. (MJ/kg).

El PCI representa la energía netamente aprovechable en procesos de combustión o valorización térmica, constituyendo un parámetro fundamental para la evaluación energética de los residuos analizados.

Análisis inmediato y elemental

Para complementar la caracterización experimental, se consideraron los parámetros del análisis inmediato, que incluyen la fracción de materia volátil, cenizas y carbono fijo, y del análisis elemental, compuesto por los porcentajes de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno.

Estos datos no fueron determinados experimentalmente, sino que se obtuvieron a partir de referencias bibliográficas de materiales con composición análoga. Esta información permitió disponer de una base de datos representativa del comportamiento térmico de los residuos y de las emisiones potenciales esperadas durante su combustión.

En la Tabla 4 se presenta el resumen general de los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica y energética de los residuos analizados.

Tabla 4: Análisis elemental e inmediato de residuos seleccionados.

Parámetro	Cáscaras de naranja y limón	Cáscaras de papa	Cáscaras de palta	Plástico PET
<i>Humedad [%, seco]</i>	77.45	75.76	71.14	0.61
<i>Ceniza [%, seco]</i>	3	9.5	5.48	0.01
<i>Poder calorífico [MJ/kg]</i>	22.26	19.05	24.15	30.2
<i>Materia volátil [%, seco]</i>	50.9	9.69	71.93	89.29
<i>Carbón fijo [%, seco]</i>	34.8	70.1	22.59	10.47
<i>Carbono [%, seco]</i>	42.5	79.8	52.29	62.51
<i>Hidrogeno [%, seco]</i>	6	6.9	6.19	4.19
<i>Oxigeno [%, seco]</i>	51	10.5	39.6	33.3
<i>Nitrógeno [%, seco]</i>	1	2.9	1.3	0
<i>Azufre [%, seco]</i>	0	-	0.1	0

3 Fabricación del reactor

3.1 Evaluación comparativa y selección del reactor

3.1.1 Criterio de selección del reactor

La selección del reactor experimental para la valorización energética de residuos sólidos se basó en criterios técnicos, operacionales y constructivos, orientados a garantizar la eficiencia térmica del sistema, la compatibilidad con los residuos seleccionados y la factibilidad de fabricación en condiciones de laboratorio. Estos criterios fueron definidos en función de los objetivos del proyecto y las capacidades disponibles en el entorno universitario.

Los criterios se agrupan en cuatro categorías principales:

a) Compatibilidad con el tipo de residuo

- El reactor debía permitir la combustión directa de fracciones orgánicas y plásticas con variabilidad en humedad, densidad y poder calorífico.
- Se priorizó un diseño que admitiera cargas discretas y combustión por lote, facilitando el análisis comparativo entre residuos.
- Se descartaron tecnologías que requieren pretratamiento complejo (tritución, homogeneización), privilegiando la simplicidad operativa.

b) Control térmico y eficiencia energética

- Se buscó un diseño capaz de alcanzar temperaturas de incineración, necesarias para una combustión completa de residuos orgánicos y plásticos.
- La geometría interna fue optimizada para favorecer la mezcla aire-combustible y la distribución homogénea de temperatura.

c) Instrumentación y monitoreo

- El reactor debía permitir la instalación de termocuplas y flujo de aire con el fin de registrar parámetros clave durante la combustión.
- Se contempló la posibilidad de integrar puertos de acceso para observación directa y toma de muestras.

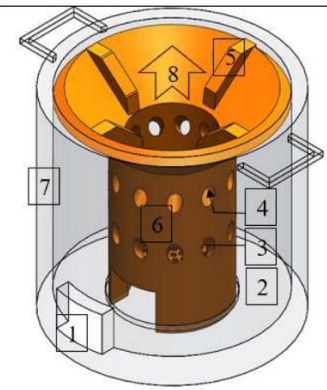
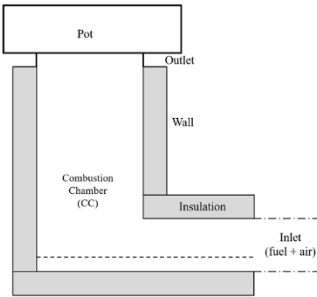
d) Factibilidad constructiva y económica

- Se seleccionaron materiales disponibles en el entorno de escasos recursos, como envases de pinturas, anafes eléctricos y herramientas.
- El diseño modular permitió una fabricación progresiva, facilitando ajustes durante la etapa de construcción.
- Se evaluó el costo total del prototipo, manteniéndolo dentro de los márgenes presupuestarios del proyecto, sin comprometer la funcionalidad técnica.

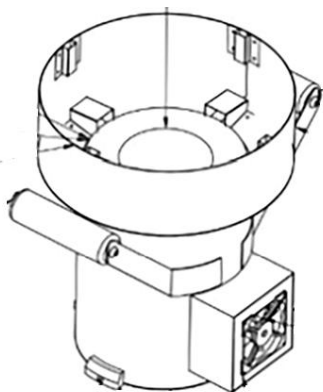
En conjunto, estos criterios permitieron definir un reactor de combustión directa, de tipo vertical, con cámara cerrada y alimentación por gravedad, capaz de operar en condiciones controladas y reproducibles. Su diseño responde a los requerimientos de caracterización energética de residuos sólidos urbanos en contextos académicos, y constituye una base técnica para futuras adaptaciones a escala piloto o industrial.

3.1.2 Alternativas de reactor

Tabla 5: Tabla comparativa de tipos de reactores para valorización energética.

Tipo de Reactor	Ventajas	Desventajas	Rendimiento
Gasificador de tiro natural 3 (Cansee et al., 2025) 	•Alta eficiencia térmica (hasta 39%) y de combustión (hasta 98%). •Baja pérdida de calor (930 kJ con briquetas). •Emisiones reducidas (CO/CO₂ hasta 0.22). •Alta resistencia estructural (16.25 kN). •Compatible con múltiples biocombustibles.	•Diseño más complejo. •Requiere ajuste de orificios según combustible. •Menor eficiencia con chips de eucalipto (16%).	•Eficiencia térmica:34-39%. •Eficiencia de combustión: 91–98%. •Reducción de emisiones: hasta 760 kg CO₂/año por hogar.
Rocket stove optimizada por CFD (Dalbehera et al., 2022) 	•Mejora en temperatura de llama y reducción de CO con baffle. •Diseño optimizado con entrada multidireccional. •Promueve mezcla turbulenta para mejor combustión.	•Menor impacto cuando se combinan ambas modificaciones. •No se alcanzan niveles óptimos de CO₂ como en el gasificador. •No se reporta durabilidad estructural.	•Mejora térmica con BCF = 0.5. •Reducción de CO significativa. •Sin datos cuantitativos de eficiencia térmica o combustión.

Rocket stove con generador termoeléctrico (TEG)
(Haile & Adem, 2024)



• Genera electricidad (3.5–5 W) para cargar dispositivos. • Mejora eficiencia térmica (hasta 29%). • Bajo costo estimado (92 USD). • Fabricación local con materiales disponibles.	• Eficiencia térmica promedio menor (25%). • Requiere integración de TEG y convertidor DC-DC. • Menor eficiencia de conversión eléctrica (máx. 4.3%).	• Eficiencia térmica: 25–29%. • Potencia eléctrica: 3.5–5 W. • Eficiencia de conversión TEG: hasta 4.3%.
---	---	--

3.1.3 Selección de reactor

La elección del reactor es clave para garantizar condiciones térmicas estables y una combustión controlada de residuos sólidos heterogéneos. Dado que el estudio busca evaluar el potencial energético de fracciones comerciales e industriales con variaciones en tamaño, humedad y poder calorífico, se requiere un sistema adaptable y eficiente.

Se seleccionó un reactor tipo gasificador de tiro natural por su capacidad de operar sin pretratamientos intensivos, su diseño simple y su eficiencia comprobada. Este reactor permite una combustión continua mediante convección natural, sin necesidad de sopladores ni controles electrónicos, lo que reduce la complejidad operativa.

Según Impa et al. (2025), alcanza eficiencias térmicas de hasta 39% y de combustión cercanas al 98%, con emisiones reducidas ($CO/CO_2 = 0.22$). Su estructura mejora la durabilidad y minimiza pérdidas térmicas. Además, su configuración de orificios puede ajustarse según el tipo de residuo, lo que lo hace ideal para pruebas comparativas y reproducibles.

En función de los resultados comparativos y criterios de diseño establecidos, se seleccionó el gasificador de tiro natural con 18 orificios de 10 mm de diámetro, como reactor para el desarrollo experimental. Esta configuración demostró un mejor desempeño térmico y menores emisiones frente a otras variantes, alcanzando eficiencias de evaporación de agua superiores al 98 % con briquetas de carbón y eficiencias de combustión cercanas al 90 %. Su diseño optimiza el flujo de aire y la mezcla de gases, lo que permite una combustión estable incluso con combustibles heterogéneos, cumpliendo con los requerimientos técnicos y metodológicos del proyecto.

En resumen, el gasificador de tiro natural cumple con los requisitos experimentales del proyecto, ofreciendo eficiencia, estabilidad y versatilidad frente a combustibles sólidos diversos.

3.2 Diseño y construcción del reactor

3.2.1 Geometría y dimensiones

El reactor presenta una configuración cilíndrica vertical, con un diámetro interno aproximado de 117 mm y una altura de 184 mm, dimensiones que permiten realizar ensayos controlados sin comprometer la seguridad ni el comportamiento térmico.

En la base se dispone una parrilla metálica perforada tipo cenicero, que posibilita el paso del aire atmosférico hacia la zona de combustión y la caída de cenizas hacia la bandeja inferior.

Los planos constructivos elaborados incluyen vistas isométricas del reactor ensamblado, como se observan en las figuras 9 y 10, con el detalle de los principales componentes: cámara de combustión, parrilla de soporte, base estructural y tapa superior.

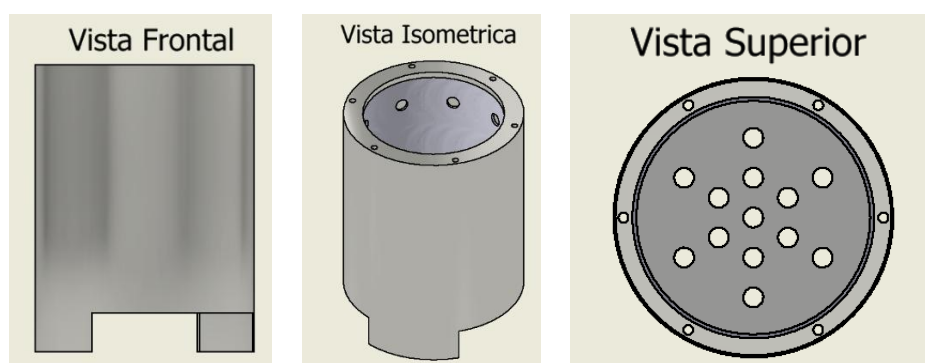


Figura 9: Vistas del reactor ensamblado.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 10: Reactor ensamblado en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Estos planos permiten visualizar la configuración general del sistema y servirán como referencia para la fabricación del prototipo. Los planos técnicos completos con cotas, espesores de material y especificaciones se incluyen en la sección de anexo. Para más detalles revisar Anexo 2.

3.2.2 Selección de materiales

La selección de materiales para la construcción del reactor se realizó bajo un enfoque sustentable y de reducción de costos, privilegiando el uso de elementos reciclados y de fácil acceso. Se optó por componentes que pudieran encontrarse comúnmente en el entorno doméstico o en talleres, lo que permitió asegurar la replicabilidad del diseño en contextos de recursos limitados.

En particular, se emplearon latas de pintura desocupadas como base estructural del reactor, aprovechando sus propiedades metálicas de resistencia mecánica y tolerancia térmica. Este material reciclado ofreció una solución práctica y económica, al mismo tiempo que contribuyó a la disminución de residuos metálicos y fomentó la reutilización de recursos disponibles.

Adicionalmente, se incorporó un anafe eléctrico portátil de espiral visible, con resistencia recubierta y potencia nominal de 1000 W, como fuente auxiliar de calor y apoyo en el encendido de los residuos. Este tipo de anafe, ampliamente disponible en el mercado y de bajo costo, permitió garantizar condiciones iniciales de combustión estables y reproducibles. Su resistencia metálica recubierta asegura una transferencia de calor uniforme y una mayor durabilidad frente al uso continuo, lo que lo convierte en un componente adecuado para experimentos de laboratorio.

La elección de materiales reciclados y accesibles, junto con la integración del anafe eléctrico, no solo redujo significativamente los costos de fabricación, sino que también se alineó con los principios de sostenibilidad del proyecto. De esta manera, se demostró que es posible desarrollar equipos funcionales y confiables a partir de insumos comunes, sin comprometer la calidad técnica ni la seguridad operativa del sistema.

3.2.3 Sistema de alimentación y evacuación de gases

El sistema de alimentación será manual, acorde con la operación por lotes planificada. En cada ensayo, la muestra previamente pesada será depositada directamente en la cámara de combustión sobre la parrilla interna, permitiendo su encendido y posterior combustión en condiciones controladas.

A diferencia de los sistemas convencionales de incineración, este reactor no posee una chimenea ni un conducto dirigido de evacuación de gases. La salida de los productos gaseosos de combustión se realizará de manera libre hacia el ambiente, a través de aberturas superiores y rendijas de la tapa del reactor.

Esta configuración permite mantener una combustión natural, sin inducir tiro forzado, reproduciendo condiciones similares a una combustión abierta o semiabierta, como las observadas en aplicaciones de pequeña escala. Además, esta simplicidad estructural reduce la pérdida de carga interna y facilita el diseño y la operación experimental.

3.2.4 Sistema de encendido

El sistema de encendido del reactor se implementó mediante la incorporación de un anafe eléctrico portátil de espiral visible, utilizado como fuente auxiliar de calor para iniciar la combustión de los residuos. Este dispositivo fue seleccionado por su bajo costo, amplia disponibilidad en el mercado y facilidad de integración al prototipo experimental, lo que permitió contar con un mecanismo confiable y reproducible para el arranque del sistema.



Figura 11: Anafe eléctrico en espiral recubierto seleccionado.

Fuente: Elaboración propia.

El anafe presenta una potencia nominal de 1000 W, suficiente para alcanzar temperaturas iniciales que favorecen la ignición de fracciones con bajo poder calorífico o elevado contenido de humedad. Su resistencia metálica en forma de espiral, recubierta para aumentar la durabilidad y resistencia frente a la oxidación, asegura una transferencia de calor uniforme y estable. La geometría en espiral facilita una distribución homogénea de la energía térmica, lo que contribuye a un encendido controlado y eficiente.

El equipo funciona con alimentación eléctrica estándar de 220 V, lo que simplifica su operación en entornos de laboratorio sin necesidad de sistemas adicionales de suministro energético. Su diseño compacto y portátil, con carcasa aislante de color blanco, permitió una instalación sencilla en la base del reactor, integrándose de manera práctica al conjunto experimental. El control de operación se realiza mediante un interruptor manual de encendido y apagado, lo que otorga simplicidad en la manipulación y seguridad durante las pruebas.

La incorporación de este anafe eléctrico como sistema de encendido garantizó condiciones iniciales de combustión estables, reduciendo la dependencia de métodos tradicionales como el uso de combustibles auxiliares líquidos o sólidos. De esta manera, se logró un arranque confiable del reactor, especialmente en pruebas con fracciones de residuos de alta humedad, asegurando la continuidad del proceso experimental y reforzando la sustentabilidad del diseño.

3.2.5 Instrumentación y control

El sistema experimental se apoyó en tres instrumentos principales. La temperatura del agua se midió con un termómetro digital Dwyer 472A, utilizando sondas tipo K ubicadas en el centro del recipiente para evitar sesgos por conducción. Este equipo permitió registrar lecturas estables y, cuando fue necesario, comparar gradientes mediante sus dos canales de entrada.



Figura 12: Termómetro digital Dwyer 472A.

Fuente: Dwyer Instruments.

La caracterización superficial se realizó con una cámara termográfica Testo 872, configurada con emisividad adecuada al material y empleando su marcador láser para asegurar puntos de referencia. Su alta sensibilidad térmica y resolución permitieron obtener mapas precisos de la distribución de temperatura, documentados con metadatos para garantizar trazabilidad.



Figura 13: Cámara termográfica Testo 872.

Fuente: Testo SE & Co.

Finalmente, la balanza digital de 5000 g de capacidad y resolución de 0,1 g se utilizó para registrar variaciones de masa en muestras y recipientes, con procedimientos de tarado y verificación mediante pesas patrón. Su precisión resultó suficiente para detectar cambios subgramo relevantes en los ensayos.

La integración de estas mediciones permitió controlar la evolución térmica y de masa de manera coherente, asegurando la calidad de los datos y la confiabilidad de los resultados experimentales.

4 Análisis experimental

El objetivo principal de esta etapa consistió en evaluar el potencial energético de los residuos seleccionados y analizar el comportamiento térmico del reactor diseñado. Se buscó determinar la capacidad de distintas fracciones de residuos sólidos para generar energía aprovechable mediante un proceso de combustión controlada.

Para ello, se llevaron a cabo una serie de ensayos experimentales en los que se introdujo una masa determinada de residuos en la cámara de combustión. El protocolo incluyó la activación del sistema de encendido mediante una resistencia eléctrica durante un periodo inicial de 3 minutos (o hasta alcanzar una llama autosostenida), seguido de la colocación de un recipiente con agua en la parte superior del reactor para actuar como estudio térmico. El monitoreo del sistema se extendió por un periodo total de 15 minutos desde el inicio de la ignición.

4.1 Descripción general de los ensayos

Para garantizar la comparación correcta del potencial energético de las distintas pruebas de combustión, fue necesario establecer un protocolo de normalización que permitiera evaluar las muestras bajo condiciones energéticas equivalentes, independientemente de la naturaleza fisicoquímica del residuo.

4.1.1 Estandarización de la carga energética del combustible

Se estableció como base de diseño una energía de combustión estandarizada de 1 MJ para cada experiencia. Esta normalización de la carga energética introducida permitió realizar un análisis comparativo riguroso entre las distintas fracciones y mezclas de residuos, independientemente de sus densidades o poderes caloríficos específicos.

La cantidad de masa requerida para alcanzar dicha energía se determinó mediante la siguiente expresión 3 (Cansee et al., 2025):

$$Q_{comb} = m_{comb} \cdot PCI \quad (11)$$

Donde:

- Q_{comb} : Energía total de combustión (kW)
- m_{comb} : Masa de residuo utilizada (kg)
- PCI : Poder calorífico inferior de la mezcla (kJ/kg)

4.1.2 Diseño experimental

Este contempló tres condiciones operativas distintas, configuradas para evaluar la influencia de aditivos energéticos (PET) en el desempeño termodinámico del reactor. Las configuraciones definidas fueron:

- **Experiencia 1 – Solo materia orgánica:** combustión de biomasa residual seca (cáscaras de papa, cítricos y palta), ajustada para entregar 1 MJ de energía.
- **Experiencia 2 – Mezcla con 10 g de PET:** se incorporó plástico PET como aditivo energético, reduciendo proporcionalmente la masa de residuos orgánicos para mantener constante la energía de combustión.
- **Experiencia 3 – Mezcla con 20 g de PET:** se aumentó la proporción de PET, ajustando nuevamente la masa orgánica para conservar los 1 MJ de energía.

Las masas específicas utilizadas para cada configuración se detallan en la Tabla 6, calculadas para mantener el aporte energético constante considerando la contribución del polímero añadido.

Tabla 6: Ajuste de masas de residuos orgánicos según cantidad de PET añadido.

PET añadido (g)	Papa (g)	Cítricos (g)	Palta (g)
0	52.5	44.9	41.4
10	36.6	31.4	28.9
20	20.8	17.8	16.4

Para la cuantificación del flujo de calor transferido, se implementó un arreglo experimental consistente en un recipiente metálico estandarizado posicionado concéntricamente sobre la salida de gases del reactor, el cual contenía una masa de control de 1 kg de agua. La instrumentación incluyó:

1. Termometría del fluido: Inserción de una termocupla en el fluido de trabajo, acoplada a un sistema de adquisición de datos en tiempo real para registrar la evolución temporal de la temperatura.
2. Termografía superficial: Uso de una cámara termográfica para caracterizar el campo térmico superficial del reactor de manera no intrusiva, permitiendo identificar gradientes en la carcasa y evaluar cualitativamente las pérdidas térmicas.

El protocolo contempló el registro sistemático de las siguientes variables: temperatura del fluido de trabajo, perfil térmico superficial, cinética de degradación másica y tasa de quemado.

El protocolo experimental contempló el registro sistemático de las siguientes variables de respuesta, fundamentales para el balance de energía y masa:

- Temperatura del fluido de trabajo: Evolución del calentamiento del agua en función del tiempo.

- Perfil térmico superficial: Mapeo de temperaturas en la superficie superior del reactor.
- Cinética de degradación másica: Registro continuo de la variación de masa del combustible.
- Tasa de quemado: Velocidad de consumo del residuo expresada en g/s.

4.1.3 Procedimiento experimental

Para asegurar la repetibilidad y validez de los resultados, se implementó un protocolo experimental estandarizado. Previo a cada ensayo, las muestras de residuo fueron sometidas a un proceso de secado ambiental prolongado hasta alcanzar masa constante, garantizando así una combustión sobre material con humedad mínima y controlada.

La secuencia operativa de cada ensayo consistió en las siguientes etapas:

1. Preparación y Carga: Se registro la masa de residuo calculada utilizando una balanza digital de precisión y se introdujo en la cámara de combustión, asegurando una distribución homogénea en el interior.
2. Ignición: El sistema de encendido, constituido por un anafe eléctrico situado bajo la parrilla del reactor, se activó durante un periodo de 3 minutos o hasta lograr una llama autosostenida, momento en el cual se desconectó la fuente externa.
3. Adquisición de Datos: Una vez establecida la combustión autosostenida, se posicionó una tetera metálica con 1 kg de agua sobre el reactor y se inició el registro simultáneo de variables. Se empleó una termocupla conectada a un sistema de adquisición de datos para monitorear la temperatura del agua y una cámara termográfica para registrar el perfil térmico superficial del reactor.
4. Operación y Término: Los ensayos se llevaron a cabo bajo condiciones de ventilación natural. El registro de datos se mantuvo por un periodo de 15 minutos desde el encendido. Finalmente, se procedió al enfriamiento del equipo y retiro de cenizas para el cálculo de la tasa de quemado.

4.2 Evaluación del desempeño térmico del sistema

Con el propósito de caracterizar cuantitativamente el rendimiento energético del reactor y los combustibles, se definieron métricas de evaluación térmica que permiten determinar la eficiencia de conversión, la potencia de transferencia y la cinética de reacción.

4.2.1 Energía útil entregada

La energía útil entregada al sistema corresponde al calor transferido efectivamente al agua contenida en el recipiente de ensayo. Se determina mediante la ecuación 3 (Cansee et al., 2025):

$$Q_{util} = c_p \cdot m_1 \cdot (T_2 - T_1) \quad (12)$$

Donde:

- Q_{util} : energía útil entregada (kJ)
- c_p : capacidad calorífica específica del agua (4,18 kJ/kg·K)
- m_1 : masa inicial de agua (kg)
- m_2 : masa final de agua (kg)
- T_1 : temperatura inicial del agua (°C)
- T_2 : temperatura máxima alcanzada del agua (°C)

Este parámetro permite estimar el aprovechamiento térmico directo del sistema, considerando tanto el calentamiento como la evaporación del agua.

Adicionalmente, para caracterizar la dinámica de la transferencia de calor en función del tiempo, se determinó la potencia térmica instantánea absorbida por el agua. A diferencia de la energía útil, esta variable permite identificar los momentos de máxima transferencia de calor y evaluar cómo decae la intensidad del proceso a medida que se consume el combustible. Se expresa mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$\dot{Q}_w = m_1 \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (13)$$

Donde:

- $\dot{Q}_w$: Flujo de calor transferido al agua (W).
- $\frac{dT}{dt}$: Tasa de calentamiento instantánea. (°C/s)

El análisis de esta variable es fundamental para comprender la combustión en el tiempo, diferenciando entre combustibles que entregan una potencia alta pero breve (picos de intensidad) y aquellos que mantienen una entrega de calor moderada pero sostenida.

4.2.2 Eficiencia térmica del sistema

La eficiencia térmica global del sistema se define como la razón entre la energía útil entregada y la energía potencial del combustible consumido 6 (Haile & Adem, 2024):

$$\eta_c = \frac{Q_{util}}{m_{comb} \cdot PCI} \cdot 100 \quad (14)$$

Donde:

- η_c : eficiencia térmica (%).

Este parámetro permite evaluar el grado de aprovechamiento energético de los residuos incinerados.

4.2.3 Tasa de Quemado

La tasa de quemado constituye un indicador cinético que representa la velocidad de consumo másico del residuo durante el proceso de combustión. Esta variable permite

comprender la rapidez de liberación de energía térmica y su relación con la composición fisicoquímica del residuo. Se determina experimentalmente a partir de la expresión:

$$R_b = \frac{m_{comb} - m_{ceniza}}{t_{comb}} \quad (15)$$

Donde:

- R_b : Tasa de quemado (g/s).
- t_{comb} : Duración total de la combustión (s)

Para cuantificar la tasa de quemado, se utilizó una balanza digital durante todo el transcurso de las experiencias para cada tipo de residuo, con ello se llevó las gráficas que están expresadas en la subsección 4.4.

4.3 Análisis de resultados

En esta sección se exponen y discuten los resultados experimentales derivados de la combustión controlada de las tres fracciones de biomasa seleccionadas: cáscaras de palta, cáscaras de cítricos y cáscaras de papa. El análisis integra la evaluación cuantitativa de los indicadores de desempeño térmico definidos previamente en la sección 4.2, con el estudio detallado de los perfiles térmicos superficiales, la evolución en el tiempo de la temperatura del fluido de trabajo y la cinética de degradación másica del combustible. El objetivo central es caracterizar comparativamente el comportamiento energético de cada residuo, identificando los mecanismos de transferencia de calor y las limitaciones cinéticas que gobiernan su desempeño en un reactor de pequeña escala.

4.3.1 Ensayo cascaras de palta

Los ensayos realizados con cáscaras de palta demostraron un alto potencial energético, atribuible principalmente al contenido significativo de lípidos y sustancias orgánicas con alto poder calorífico.

Como se observa en la Tabla 11, existe una alta consistencia operativa entre las Experiencias 1 y 2, donde se lograron transferencias de energía útil de 131.67 kJ y 128.33 kJ, respectivamente, resultando en eficiencias térmicas cercanas al 13%. Estos valores indican un régimen de combustión estable, donde la tasa de liberación de calor fue suficiente para superar la inercia térmica del sistema y las pérdidas al entorno.

Por el contrario, la Experiencia 3 presentó una caída abrupta en el rendimiento, alcanzando una temperatura final de solo 41.8 °C. Esta diferencia sugiere la influencia crítica de factores químicos en la conformación del polímero, tales como la dificultad de incineración de PET, el cambio de fase solido-liquido, que restringen la difusión de oxígeno y limitan la intensidad de la oxidación.

Tabla 7: Resumen de parámetros energéticos y eficiencia térmica de combustión de cascara de palta

Experiencia	m_1 (kg)	m_2 (kg)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	Q_{util} (kJ)	η_c (%)
Experiencia 1	1	1	21.5	53	131.67	13.17
Experiencia 2	1	1	21.3	52	128.33	12.83
Experiencia 3	1	1	20.6	41.8	88.62	8.86

A continuación, nos centramos en el estudio de la variación de masa en el tiempo y la tasa de quemado. Para caracterizar este comportamiento, se modelaron los datos experimentales mediante funciones exponenciales decrecientes de la forma:

$$M(t) = A \cdot e^{-Bt} + C \quad (16)$$

A partir de la derivada temporal de estas funciones, se obtuvieron las expresiones teóricas para la tasa de quemado:

$$\dot{m}(t) = \left| \frac{dM}{dt} \right| \quad (17)$$

Los coeficientes obtenidos y las funciones resultantes para cada experiencia se detallan en la tabla 8:

Tabla 8: Parámetros cinéticos y funciones para las experiencias de cascara de palta.

<i>Experiencia</i>	Función de Masa Tasa de Quemado, $\dot{m}(t)$	R^2	
	Remanente, $M(t)$ (g)	(g/s)	
<i>Experiencia 1</i>	$98.08 \cdot e^{-0.0083t} - 7.74$	$0.809 \cdot e^{-0.0083t}$	0.988
<i>Experiencia 2</i>	$71.02 \cdot e^{-0.0076t} + 0.73$	$0.539 \cdot e^{-0.0076t}$	0.971
<i>Experiencia 3</i>	$55.18 \cdot e^{-0.0096t} + 11.8$	$0.528 \cdot e^{-0.0096t}$	0.986

Respecto a la cinética de reacción, la figura 14 muestra las curvas de degradación másica generadas por estas funciones. La Experiencia 1 presenta la pendiente más pronunciada (reflejada en el mayor coeficiente exponencial) lo que se correlaciona con una rápida volatilización de la materia orgánica.

Al analizar las tasas de quemado, se evidencia que la velocidad de reacción no es constante, sino que sigue una curva de tipo decreciente exponencial. El pico inicial de la Experiencia 1 es el más alto, indicando una alta reactividad química inicial de las cáscaras de palta. A medida que avanza el tiempo, el proceso transiciona hacia una etapa dominada por la oxidación del carbono fijo, caracterizada por una tasa de quemado mucho más lenta y controlada por la difusión de oxígeno a través de la capa de cenizas, convergiendo hacia valores inferiores a 0.1 g/s.

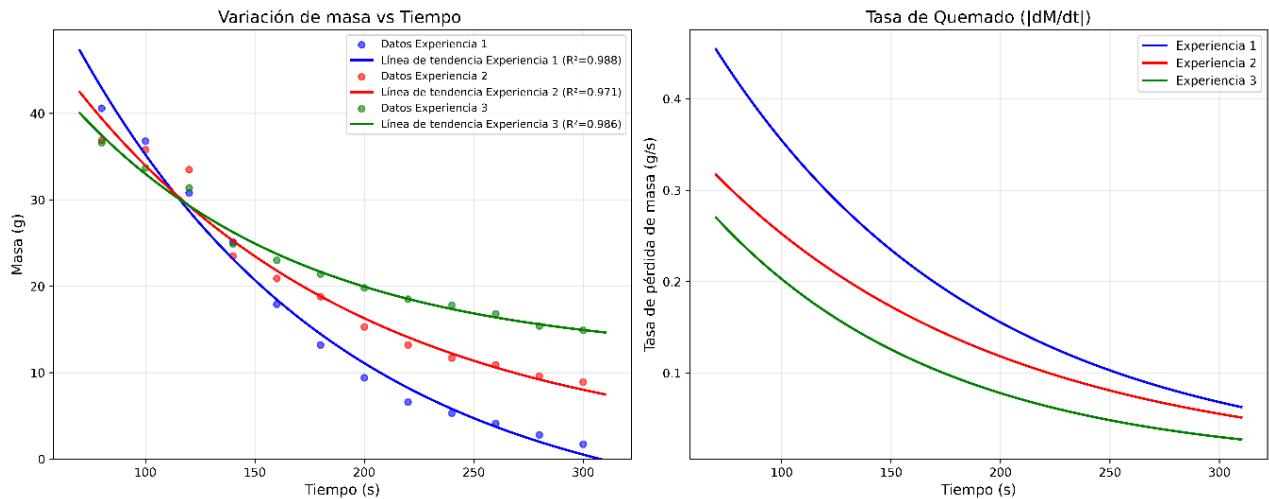


Figura 14: Cinética de degradación másica y tasa de quemado para cáscaras de palta.

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la potencia térmica liberada evidencia la naturaleza transitoria del proceso de combustión por lotes, caracterizado por un decaimiento exponencial en todas las curvas. Este comportamiento es consecuencia directa del agotamiento progresivo del combustible y la reducción de la fracción de volátiles disponibles para la reacción a medida que avanza el tiempo.

Al comparar los ensayos, la Experiencia 1 exhibe el mayor desempeño energético, alcanzando una potencia pico inicial cercana a los 10 kW, lo que denota una alta reactividad de la muestra. Por su parte, la Experiencia 2 muestra una cinética de degradación muy similar a la primera, describiendo una trayectoria casi paralela pero de menor intensidad, iniciando en aproximadamente 8.4 kW. En contraste, la Experiencia 3 presenta el rendimiento más bajo del conjunto, comenzando con una potencia de alrededor 6.5 kW y manteniéndose consistentemente por debajo de las otras dos curvas.

Finalmente, hacia el término del periodo evaluado, se observa una convergencia de las tres tendencias en un rango de 1 a 2 kW. Este comportamiento señala la transición del proceso hacia una etapa final dominada por la combustión lenta del carbono fijo presente en el combustible, una vez que la mayor parte de la materia volátil ha sido consumida.

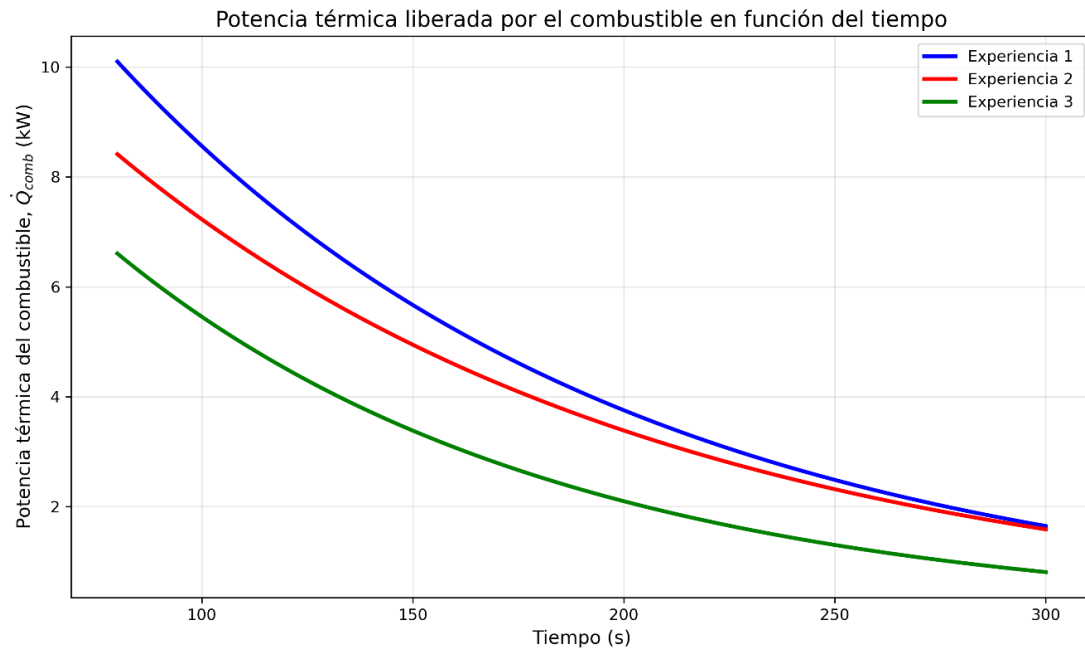


Figura 15: Potencia térmica del combustible en función del tiempo para cascaras de palta.

Fuente: Elaboración propia

Con el propósito de caracterizar el comportamiento térmico superficial del reactor, se llevó a cabo un monitoreo mediante termografía infrarroja, controlando rigurosamente la ubicación de la cámara y los tiempos de exposición para garantizar la comparabilidad entre ensayos. Las Figuras 16 y 17 ilustran la disposición experimental y un ejemplo de las capturas realizadas durante las pruebas.

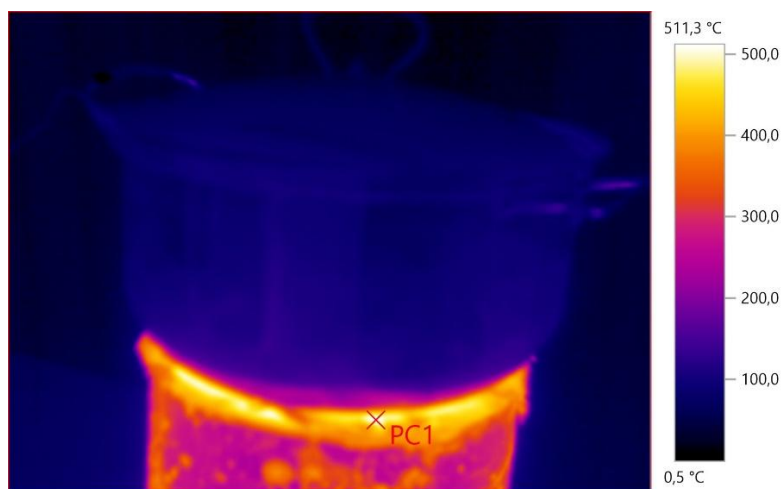


Figura 16: Ejemplo de imagen termográfica realizada durante los ensayos.

Fuente: Elaboración propia



Figura 17: Foto realizada por cámara termográfica durante ensayos.

Fuente: Elaboración propia

En relación con el procedimiento descrito, la figura 18 presenta la evolución de la temperatura superficial promedio del reactor.

Al analizar las curvas, se destacan tres comportamientos diferenciados:

1. Experiencia 2: Al inicio del ensayo, esta experiencia registra las temperaturas promedio más elevadas. Este fenómeno se atribuye a la rápida ignición facilitada por el alto contenido de volátiles y lípidos propios de la cáscara, los cuales aceleran la combustión inicial de la mezcla polimérica. Sin embargo, se observa una intersección con la curva de la Experiencia 1 alrededor del minuto 6, momento en el cual su temperatura comienza a decaer más rápidamente en comparación con la curva de la Experiencia 1.
2. Experiencia 1: Esta curva exhibe la menor pendiente de descenso, lo que indica una mayor inercia térmica. La diferencia de temperatura entre el inicio y el final del periodo estudiado es inferior a 20°C. Esta estabilidad es consecuencia de una liberación de calor más sostenida en el tiempo, producto de una llama prolongada y una combustión más eficiente de la fase sólida.
3. Experiencia 3: Presenta el perfil térmico más deficiente del conjunto. Se observa un descenso lineal pronunciado hasta el minuto 10, seguido de una disminución en la tasa de enfriamiento. Este comportamiento se debe a la alta fracción másica de PET en la mezcla; los procesos físicos de fusión (cambio de fase) y la oxidación compleja de este polímero limitan el aumento de la temperatura global del reactor, resultando en una menor valorización energética en comparación con las otras experiencias.

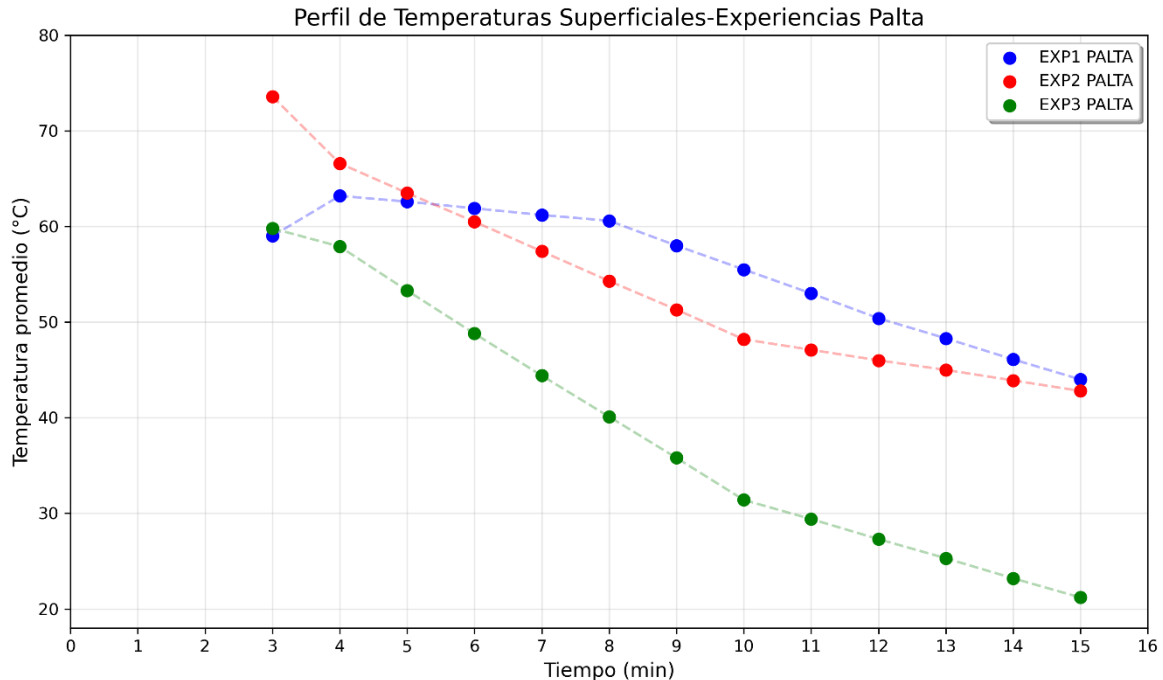


Figura 18: Perfil de decaimiento térmico en la cámara de combustión para cáscaras de palta.

Fuente: Elaboración propia

La figura 19 presenta las curvas de calentamiento del agua, revelando dos comportamientos termodinámicos claramente diferenciados en función de la mezcla combustible utilizada. Las curvas correspondientes a las Experiencias 1 y 2 exhiben una pendiente positiva casi constante durante la mayor parte del intervalo, alcanzando temperaturas finales en el rango de 52°C a 53°C. Esta linealidad denota una tasa de transferencia de calor sostenida, capaz de superar ampliamente las pérdidas convectivas del recipiente. Es relevante notar que, aunque ambas experiencias finalizan con temperaturas similares, sus trayectorias presentan sutiles diferencias asociadas a la cinética de liberación de energía explicada anteriormente.

En contraste, la curva de la Experiencia 3 muestra un punto de inflexión prematuro alrededor del minuto 7. A partir de este momento, se observa un decaimiento progresivo de la pendiente (aplanamiento de la curva), finalizando en apenas 42°C. Este comportamiento asintótico indica que el sistema tiende rápidamente hacia un equilibrio térmico indeseado, donde la potencia generada por la combustión apenas logra igualar las pérdidas térmicas hacia el ambiente, impidiendo un calentamiento efectivo del fluido.

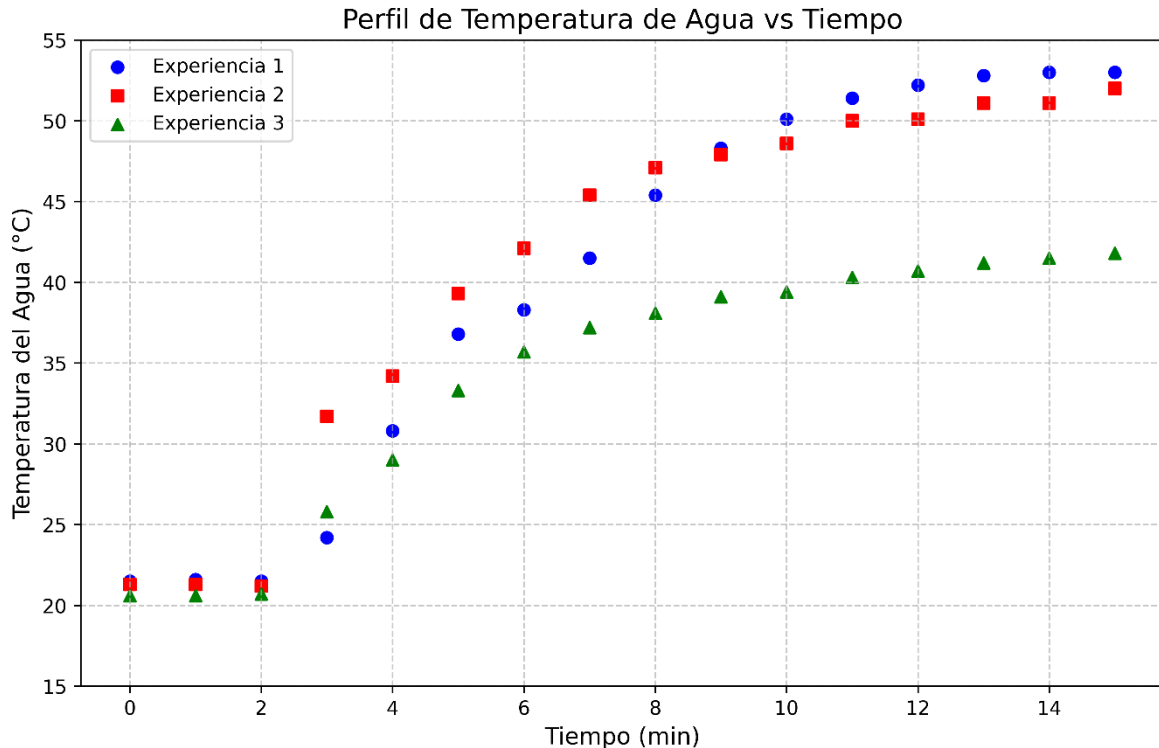


Figura 19: Curvas de calentamiento de agua en el tiempo para cáscaras de palta.

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento dinámico de la transferencia de energía hacia el fluido de trabajo se detalla en la figura 20, el cual ilustra la evolución temporal de la potencia útil instantánea. A diferencia del perfil de temperatura acumulada, esta variable permite visualizar la intensidad del calentamiento momento a momento, revelando diferencias críticas en la cinética de liberación de calor de cada mezcla. Al examinar las curvas, se destaca inicialmente la Experiencia 2 con un comportamiento de alta reactividad transitoria, alcanzando un pico máximo cercano a los 600 W al minuto 2, atribuible a la volatilización violenta de los componentes lipídicos de la cáscara. No obstante, esta intensidad disminuye drásticamente, pues su curva presenta una pendiente de decaimiento pronunciada que evidencia la incapacidad del combustible para sostener dicha densidad de potencia en el tiempo.

En contraposición, la Experiencia 1 demuestra una mayor estabilidad térmica sostenida. Aunque su potencia inicial es inferior, su curva es notablemente más suave, lo que denota una mayor inercia térmica. El hallazgo más significativo de este análisis ocurre alrededor del minuto 4, momento en el cual se produce el cruce de las curvas: la potencia de la Experiencia 2 cae por debajo de la Experiencia 1. Esto confirma que, para efectos de calentamiento de agua, la Experiencia 1 resulta superior a largo plazo, ya que logra mantener tasas de transferencia de calor por encima de los 200 W durante un periodo más prolongado, compensando su menor explosividad inicial con una entrega de energía más consistente.

Por último, para la Experiencia 3 su curva inicia con una potencia mayor a 400 W pero se desploma, cayendo por debajo del umbral crítico de los 100 W antes del minuto 8. Este nivel de potencia es apenas suficiente para superar las pérdidas del sistema hacia el ambiente, lo que explica su incapacidad para elevar la temperatura del agua de manera competitiva frente a los otros dos ensayos y confirma la baja densidad energética efectiva de esta configuración.

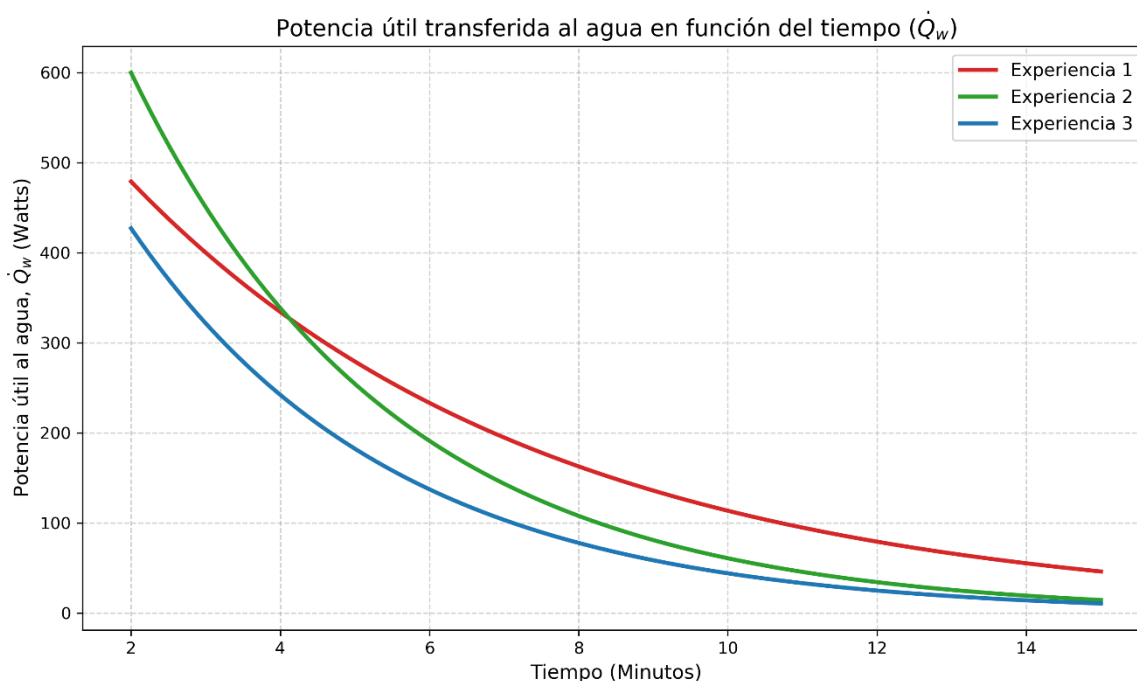


Figura 20: Potencial útil a fluido de trabajo en el tiempo por cascaras de palta.

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Ensayos cascaras de cítricos

Las cáscaras de cítricos (mezcla de naranja y limón) presentaron el mejor desempeño global del estudio. La presencia de compuestos volátiles inflamables facilitó una ignición rápida y una fase de combustión intensa, reflejándose en los indicadores de eficiencia presentados en la Tabla 9.

Tabla 9: Resumen de parámetros energéticos y eficiencia térmica en la combustión de cáscaras de cítricos.

Experiencia	m_1 (kg)	m_2 (kg)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	Q_{util} (kJ)	η_c (%)
Experiencia 1	1	1	21.8	54.7	137.52	13.75
Experiencia 2	1	1	21.2	53.1	133.34	13.33
Experiencia 3	1	1	20	44.1	100.74	10.07

La Tabla 10 corrobora la alta valorización energética de este residuo. La Experiencia 1 registró el máximo rendimiento de todo el proyecto, con una energía útil de 137.52 kJ y una

eficiencia térmica del 13.75%. Es destacable la eficiencia presentada por este combustible: incluso bajo las condiciones menos favorables de la Experiencia 3, se obtuvo una eficiencia del 10.07%, cifra que supera a los mejores resultados obtenidos con las cáscaras de papa.

Para el estudio de la variación másica del combustible y su tasa de quemado se requiere de funciones matemáticas para poder modelarlo, por ello utilizando las ecuaciones 16 y 17 se obtienen las siguientes funciones exponenciales:

Tabla 10: Parámetros cinéticos y funciones para las experiencias de cáscaras de cítricos.

<i>Experiencia</i>	Función de Masa Tasa de Quemado, $\dot{m}(t)$ Remanente, $M(t)$ (g) (g/s)	R^2	
<i>Experiencia 1</i>	$220.87 \cdot e^{-0.0132t} - 0.31$	$2.919 \cdot e^{-0.0132t}$	0.981
<i>Experiencia 2</i>	$95.04 \cdot e^{-0.0108t} + 6.94$	$1.026 \cdot e^{-0.0108t}$	0.997
<i>Experiencia 3</i>	$44.67 \cdot e^{-0.0083t} + 17.39$	$0.37 \cdot e^{-0.0083t}$	0.985

A partir de la información presente en los gráficos siguientes de variación de masa y tasa de quemado, permite establecer una distinción fundamental en los mecanismos de reacción de las distintas mezclas de combustible. Al observar el perfil de pérdida de masa a la izquierda, se evidencia que la Experiencia 1 exhibe una curva de decaimiento exponencial pronunciada, lo que indica una volatilización rápida y eficiente de la materia orgánica; en un lapso de 300 segundos, la muestra se reduce drásticamente desde su masa inicial hasta un residuo mínimo, comportamiento característico de una combustión controlada por la cinética química de los volátiles propios de la biomasa sin inhibidores.

En contraste, la Experiencia 3 presenta una resistencia notable a la degradación másica, manifestada en una curva con pendiente suave y casi lineal que resulta en un alto remanente de material al final del ensayo. Este fenómeno se corrobora al examinar el gráfico de tasa de quemado a la derecha, donde se observa una disparidad crítica en la reactividad inicial: mientras que la Experiencia 1 alcanza una velocidad de reacción máxima cercana a 0.6 g/s, indicando una ignición vigorosa, la Experiencia 3 apenas logra superar los 0.16 g/s. Esta diferencia de magnitud, siendo la tasa de la primera experiencia casi cuatro veces superior a la tercera, confirma que la adición de PET altera el régimen de combustión, transformándolo de un proceso activo a uno pasivo.

La interpretación de estos datos sugiere que el polímero presente en la Experiencia 3 actúa como una barrera física difusiva. Al alcanzar su temperatura de fusión, el plástico probablemente encapsula las partículas de biomasa, reduciendo drásticamente el área superficial expuesta al comburente. En consecuencia, el proceso deja de estar limitado por la reactividad del combustible para pasar a depender de la lenta difusión del oxígeno a través de la fase líquida del polímero fundido, lo que explica tanto la baja tasa de liberación de calor como la incapacidad del sistema para sostener una reducción de masa eficiente en el tiempo.

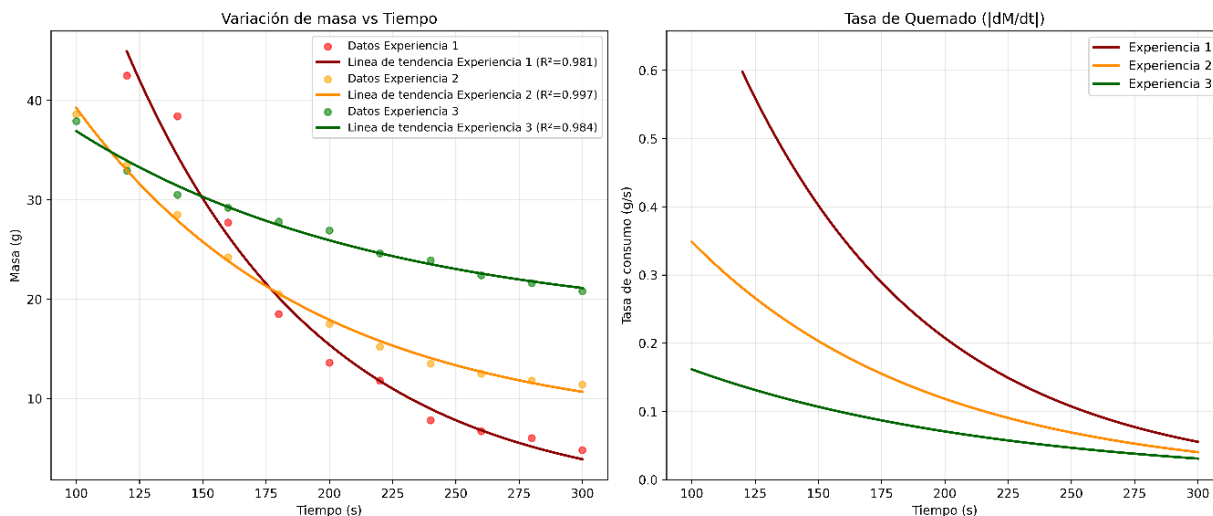


Figura 21: Cinética de degradación másica y tasa de quemado para cáscaras de cítricos.

Fuente: Elaboración propia

Al integrar la tasa de quemado con el poder calorífico de la mezcla, el gráfico de Potencia térmica liberada por el combustible revela las consecuencias energéticas de esta cinética. La Experiencia 1 alcanza un pico de potencia instantánea de 17.3 kW en los primeros 100 segundos. Esta liberación masiva de energía genera un efecto de flash térmico que satura rápidamente la inercia térmica de las paredes del reactor, forzando un gradiente de temperatura elevado que favorece la transferencia de calor hacia el agua desde el primer minuto.

Por el contrario, la adición de mayor cantidad de polímero en la Experiencia 3 reduce drásticamente esta potencia pico a apenas 4.2 kW. Este comportamiento confirma la hipótesis de que un exceso de PET provoca un 'ahogamiento' de la reacción inicial: al fundirse, el plástico bloquea los poros necesarios para la difusión del comburente, transformando lo que debería ser una combustión activa en un proceso pasivo y limitado por transferencia de masa, insuficiente para generar un calentamiento vigoroso en el sistema.

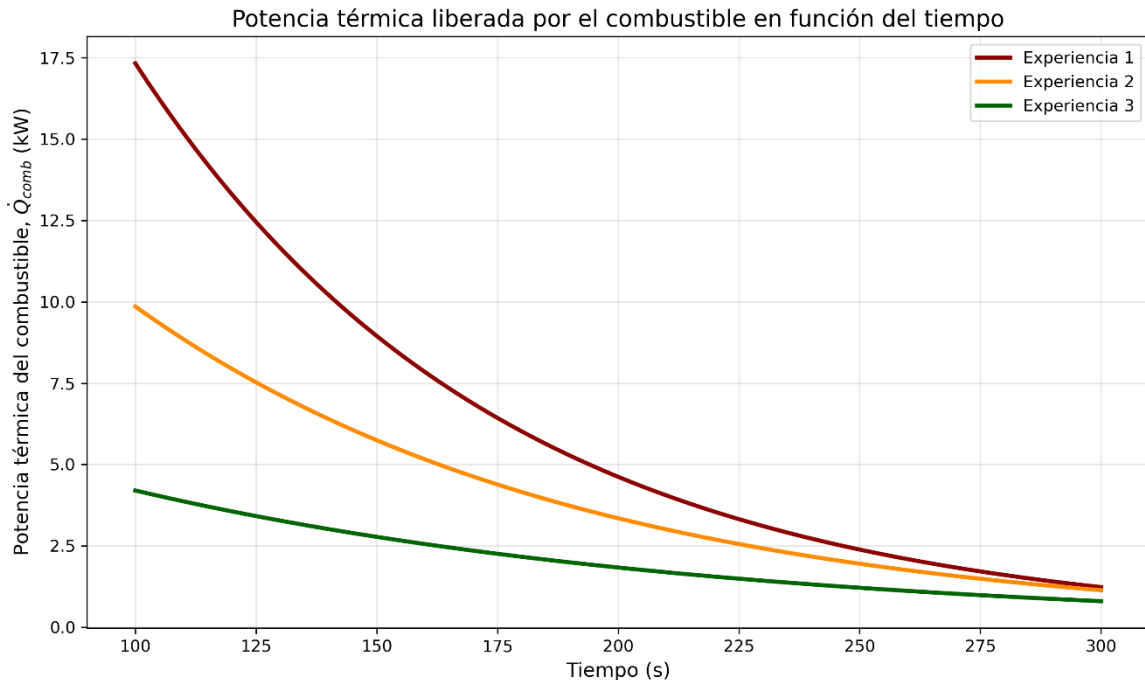


Figura 22: Potencia térmica del combustible en función del tiempo para cascaras de cítricos.

Fuente: Elaboración propia

El perfil de temperaturas superficiales promedio del reactor revela el comportamiento térmico externo durante los ensayos. Se observa una tendencia general decreciente en todas las curvas a partir del minuto 3, lo que confirma que el sistema opera bajo un régimen transitorio donde la tasa de generación de calor por la combustión ya no es suficiente para compensar las pérdidas térmicas hacia el entorno y la transferencia de energía hacia el fluido de trabajo.

Al comparar el desempeño de las mezclas, se destaca una distinción crítica entre la Experiencia 1 y la Experiencia 2. Ambas inician el periodo de medición con temperaturas máximas similares, cercanas a los 62°C - 63°C, lo que sugiere una liberación de energía inicial comparable durante la fase de ignición. Sin embargo, los perfiles de temperatura divergen drásticamente a medida que avanza el tiempo. La Experiencia 2 exhibe una pendiente de descenso pronunciada, perdiendo casi 28°C en el intervalo de 12 minutos. Esta disminución de temperatura indica que, el lecho de combustible se agota rápidamente o pierde la capacidad de sostener una temperatura elevada.

Por el contrario, la Experiencia 1 demuestra una mayor estabilidad térmica. Su curva presenta una pendiente, mucho más suave, logrando mantener una temperatura superior a los 44°C hacia el final de la prueba. Esta mayor inercia térmica sugiere que la combustión de la mezcla en la Experiencia 1 es más sostenida en el tiempo, permitiendo que las paredes del reactor presenten una temperatura mayor y mas sostenida en el tiempo, prolongando el gradiente térmico necesario para la transferencia de calor hacia el agua.

Finalmente, la Experiencia 3 corrobora el efecto negativo del exceso de polímero en la mezcla. Su curva se sitúa sistemáticamente por debajo de las demás, iniciando apenas en

49°C y descendiendo hasta los 25°C, un valor cercano a la temperatura ambiente. Este perfil térmico deficiente es consistente con la hipótesis de bloqueo físico por fusión del PET; al no generarse una temperatura de cámara lo suficientemente alta, la conducción de calor a través de las paredes del reactor se ve severamente limitada, resultando en la superficie con menor temperatura promedio del conjunto experimental.

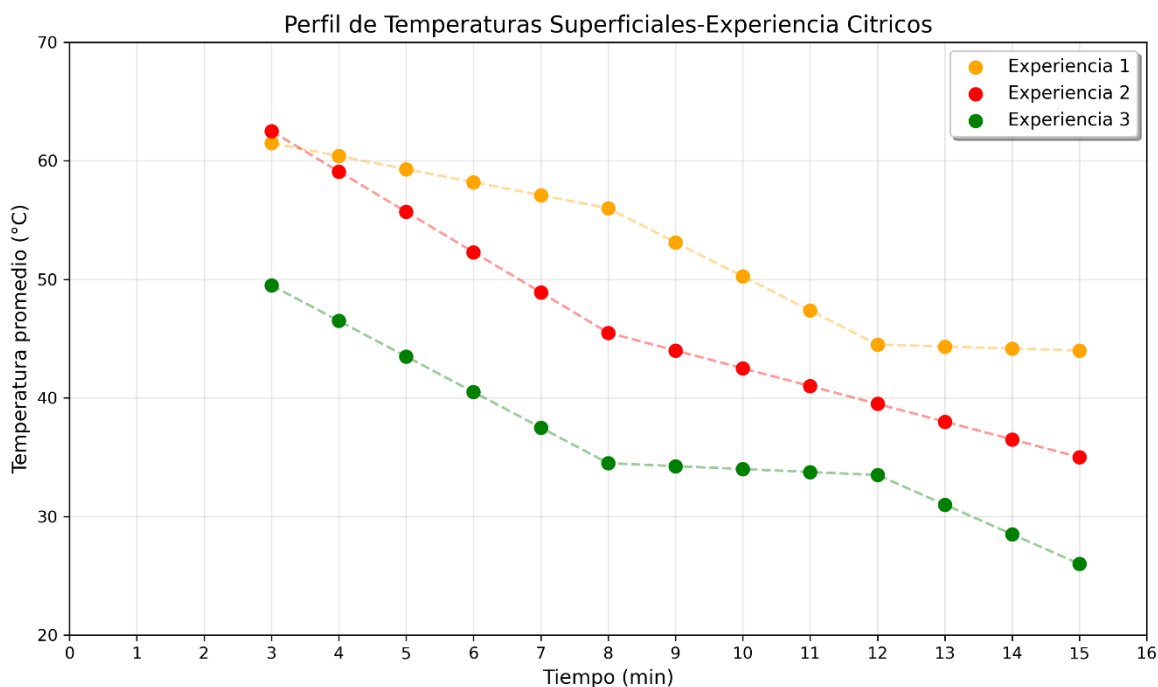


Figura 23: Perfil de decaimiento térmico en la cámara de combustión para cáscaras de cítricos.

Fuente: Elaboración propia

El análisis del perfil térmico del agua, presentado en la figura 24, revela que el sistema opera bajo un régimen de alta densidad de potencia, impulsado por la naturaleza química de la biomasa cítrica. Las curvas correspondientes a las Experiencias 1 y 2 exhiben una pendiente positiva pronunciada y casi idéntica durante la primera mitad del ensayo, logrando elevar la temperatura del fluido hasta un máximo de 54.7 °C. Termodinámicamente, este comportamiento implica que el flujo de calor suministrado desde la cámara de combustión superó ampliamente las pérdidas convectivas y radiativas de la carcasa hacia el ambiente. Es notable que, incluso la Experiencia 3, que representa la condición teórica menos favorable por su mayor carga de PET, mantuvo un ascenso significativo inicial. Sin embargo, se observa una bifurcación en su tendencia alrededor del minuto 8, donde la pendiente se atenúa, demostrando que, si bien la matriz de cítricos posee una alta capacidad para sostener la llama, el exceso de polímero termina por limitar el potencial calorífico total del sistema

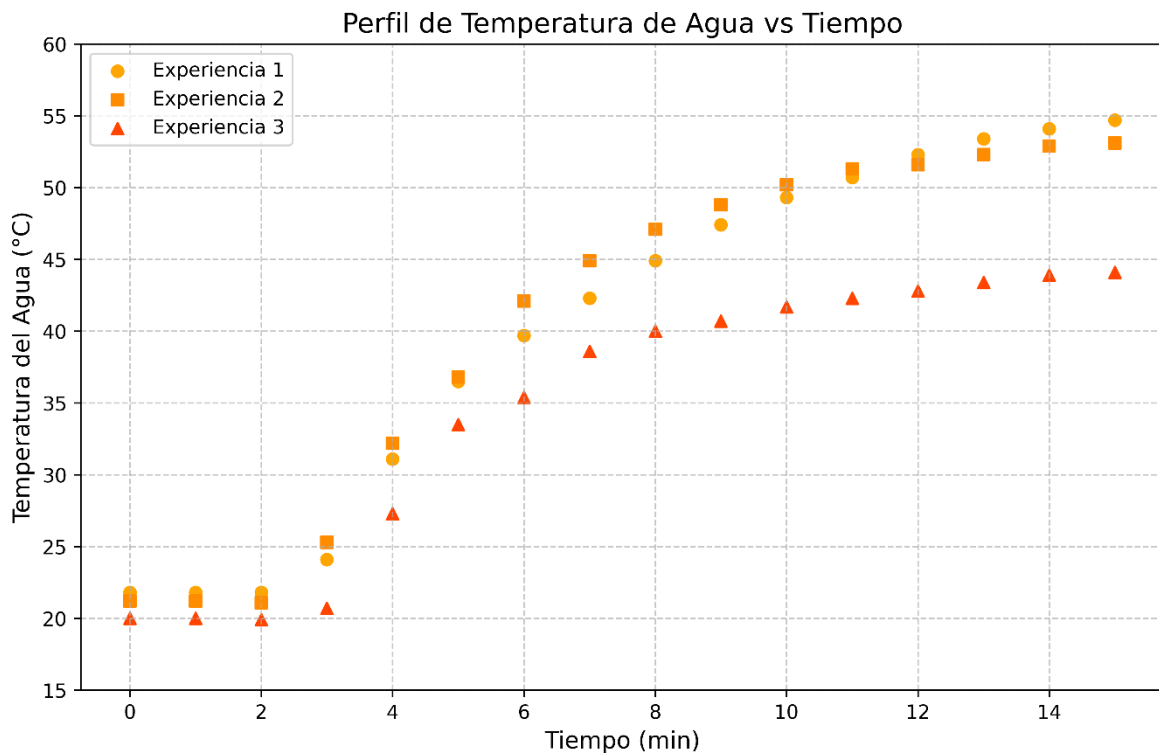


Figura 24: Curvas de calentamiento de agua en el tiempo para cáscaras de cítricos.

Fuente: Elaboración propia

Para comprender la dinámica instantánea de este calentamiento, el gráfico de potencia útil desglosa el flujo energético en el tiempo. Se observa un régimen inicial extremadamente vigoroso, donde las tres experiencias alcanzan máximos de entre 450 y 580 Watts. Este gran aumento de potencia es atribuible a la combustión violenta de los aceites esenciales presentes en las cáscaras, lo que permite vencer rápidamente la inercia térmica del acero y el agua.

Sin embargo, el análisis detallado de las curvas de potencia revela diferencias críticas en la estabilidad del proceso. La Experiencia 2 muestra el arranque más agresivo, pero sufre una caída significativamente. En contraste, la Experiencia 1, aunque inicia con una potencia menor de 450 W aproximadamente, presenta una curva con pendiente más suave, logrando cruzar y superar a la Experiencia 2 alrededor del minuto 6. Este fenómeno explica por qué la Experiencia 1 logra la temperatura final más alta: su entrega de energía es más sostenida en el tiempo. Finalmente, la Experiencia 3 confirma el efecto inhibitorio del plástico; a pesar de un inicio con potencia alta impulsado por los volátiles cítricos, su potencia cae drásticamente por debajo de las otras dos curvas antes del minuto 4, sugiriendo que la fusión del polímero actúa rápidamente como una barrera térmica que amortigua la transferencia de calor efectiva hacia el fluido.

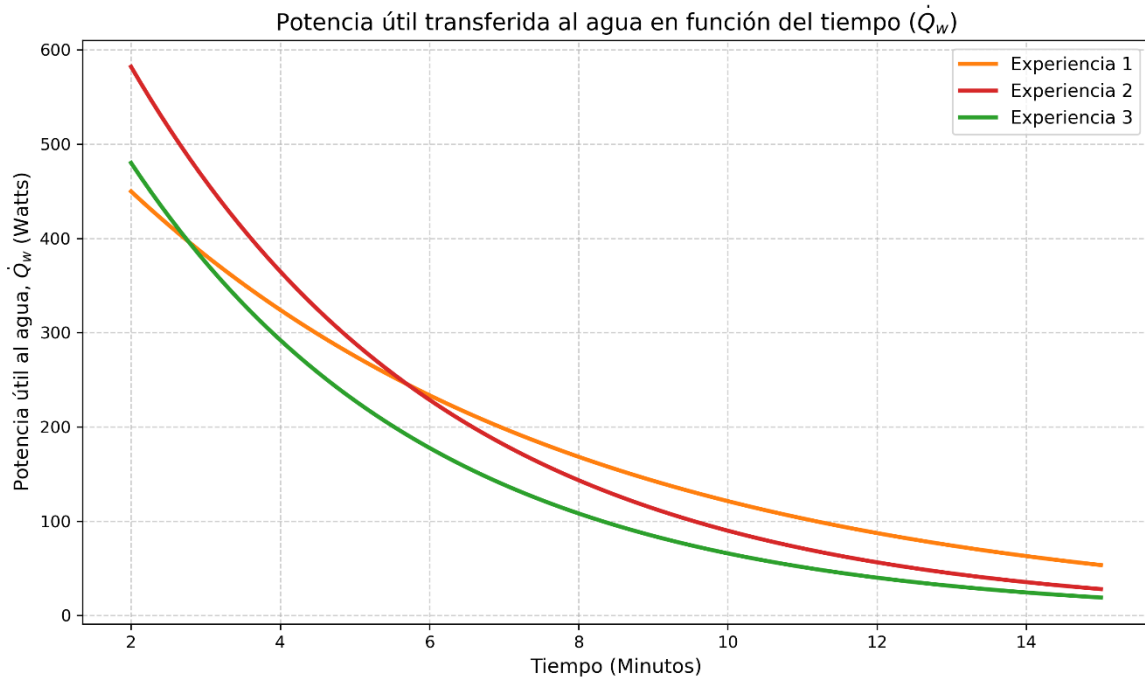


Figura 25: Potencia útil transferida de cítricos al fluido de trabajo en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Ensayos cascaras de papa

En contraste con los residuos anteriores, las cáscaras de papa mostraron el comportamiento más moderado. Debido a su naturaleza rica en almidón y su estructura celular que retiene humedad, este residuo presentó dificultades para sostener una llama de alta intensidad, como se detalla en la Tabla 11.

Tabla 11: Resumen de parámetros energéticos y eficiencia térmica en la combustión de cáscaras de papa.

Experiencia	m_1 (kg)	m_2 (kg)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	$Q_{util}(kJ)$	η_c (%)
Experiencia 1	1	1	21.2	41.8	86.11	8.61
Experiencia 2	1	1	21	44.6	96.65	9.67
Experiencia 3	1	1	19.7	39.8	84.02	8.4

Mencionado anteriormente en los dos ensayos previos, el estudio de la variación másica del combustible y su tasa de quemado requiere de funciones matemáticas para poder modelarlo, por ello utilizando las ecuaciones 16 y 17 se obtienen las siguientes funciones exponenciales:

Tabla 12: Parámetros cinéticos y funciones para las experiencias de cáscaras de papa.

Experiencia	Función de Masa Remanente, $M(t)$ (g)	Tasa de Quemado, $\dot{m}(t)$ (g/s)	R^2
Experiencia 1	$115.72 \cdot e^{-0.0116t} - 2.01$	$1.343 \cdot e^{-0.0116t}$	0.983
Experiencia 2	$71.49 \cdot e^{-0.0124t} + 13.24$	$0.885 \cdot e^{-0.0124t}$	0.988
Experiencia 3	$51.38 \cdot e^{-0.00126t} + 17.05$	$0.648 \cdot e^{-0.00126t}$	0.986

El comportamiento masico en el tiempo de las cáscaras de papa, ilustrado en los gráficos de variación de masa y tasa de quemado, presenta particularidades distintivas atribuidas al alto contenido de humedad y almidón característico de este tubérculo, en contraste con la matriz fibrosa y aceitosa de los cítricos analizados previamente.

Al examinar la curva de degradación másica, la Experiencia 1 exhibe la reducción de masa más drástica y eficiente de todo el estudio experimental. Iniciando con una carga de 52.2 g, el sistema logra degradar el material hasta un residuo final de apenas 3.0 g. Esta pérdida del ~94% de la masa inicial indica una combustión casi completa, facilitada probablemente por una estructura porosa que, tras la evaporación del agua, permite una oxidación profunda de la materia orgánica.

Por el contrario, las mezclas con adicción de polímero muestran una resistencia significativa a la degradación. La Experiencia 3, a pesar de iniciar con menor masa total (39.9 g), finaliza el ensayo con un remanente de 17.9 g. Esto implica que casi el 45% de la masa cargada no se convirtió en gases de combustión. La curva tiende a una asíntota horizontal mucho antes que, en el caso de biomasa solamente, lo que sugiere que el residuo final está compuesto mayoritariamente por plástico fundido y carbonizado que encapsuló la materia orgánica remanente, impidiendo su oxidación.

Esta disparidad se confirma al analizar el gráfico de Tasa de Quemado, donde la Experiencia 1 muestra una tasa inicial extremadamente alta, superando los valores observados en otros residuos. Este comportamiento denota una liberación voraz de volátiles tras el secado rápido del material. Por el contrario, la Experiencia 3 mantiene sistemáticamente valores bajos de tasa de consumo, sin presentar la reactividad característica de la biomasa pura. Físicamente, esto evidencia que el PET, al fundirse sobre las cáscaras de papa húmedas, actúa como una barrera térmica y difusiva que retrasa la evaporación del agua interna y limita el acceso del oxígeno, transformando una combustión en un proceso lento e ineficiente de pirólisis incompleta.

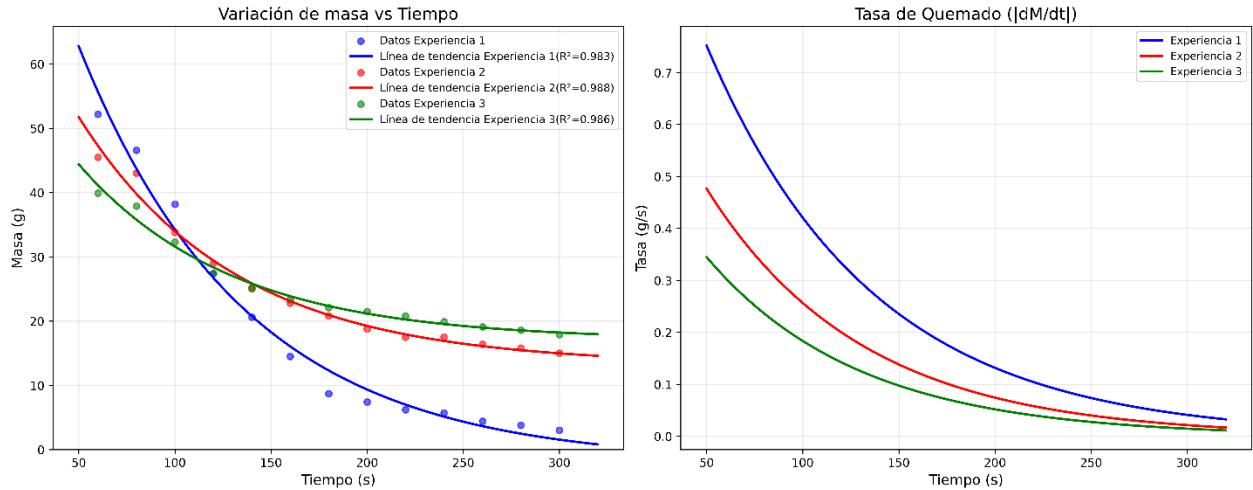


Figura 26: Cinética de degradación másica y tasa de quemado para cáscaras de papa.

Fuente: Elaboración propia

A partir de la figura 27, la Experiencia 1 alcanzó un pico de 12.75 kW, seguida de 11.9 kW para la Experiencia 2 y 7.52 kW para la Experiencia 3. Como se mencionó anteriormente, la Experiencia 3 registró el peor desempeño de potencia de todo el estudio. Esto sugiere un fenómeno de interferencia de fases: el PET fundido, en lugar de aportar energía, probablemente encapsuló la materia orgánica, impidiendo el paso correcto de oxígeno en la cámara de combustión. Esto creó una barrera imposibilitando la oxidación correcta del combustible, demostrando que la adición de polímeros no siempre es beneficiosa, sino que requiere de ciertas condiciones para poder aprovechar de mejor manera su uso.

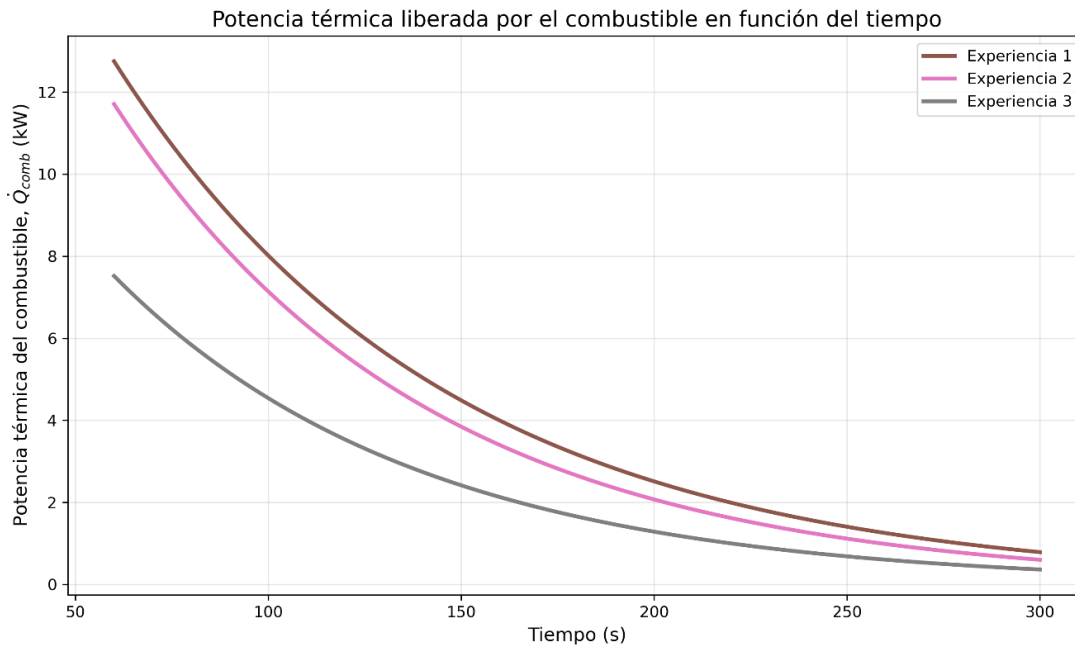


Figura 27: Potencia térmica del combustible en función del tiempo para cascarras de papa.

Fuente: Elaboración propia

El perfil de temperaturas superficiales para las cáscaras de papa revela una dinámica de combustión retardada y térmicamente pobre, diferenciándose drásticamente de los residuos oleosos estudiados con anterioridad.

La Experiencia 1 logra superar esta barrera energética con mayor eficacia, alcanzando un máximo cercano a los 59°C al minuto 6. Sin embargo, la incapacidad de la biomasa para sostener la reacción se hace evidente de inmediato, sufriendo una caída térmica abrupta de más de 30°C en los siguientes 9 minutos, finalizando el ensayo por debajo de los 30°C. Esto indica que, una vez consumida la fracción seca superficial, la reacción se extingue rápidamente por falta de alimentación continua.

Por su parte, el efecto de la adición de PET en las Experiencias 2 y 3 resulta perjudicial presentando una baja temperatura. El polímero parece actuar como un sumidero de calor o una barrera aislante. La Experiencia 2 apenas logra un pico de 43°C, mientras que la Experiencia 3 muestra el desempeño más deficiente del conjunto, con un máximo que no supera los 40°C y un descenso final drástico hasta los 13.9°C. Este valor final, cercano o incluso inferior a la temperatura ambiente operativa, confirma que la combustión en la Experiencia 3 se detuvo casi por completo mucho antes de terminar el tiempo de medición.

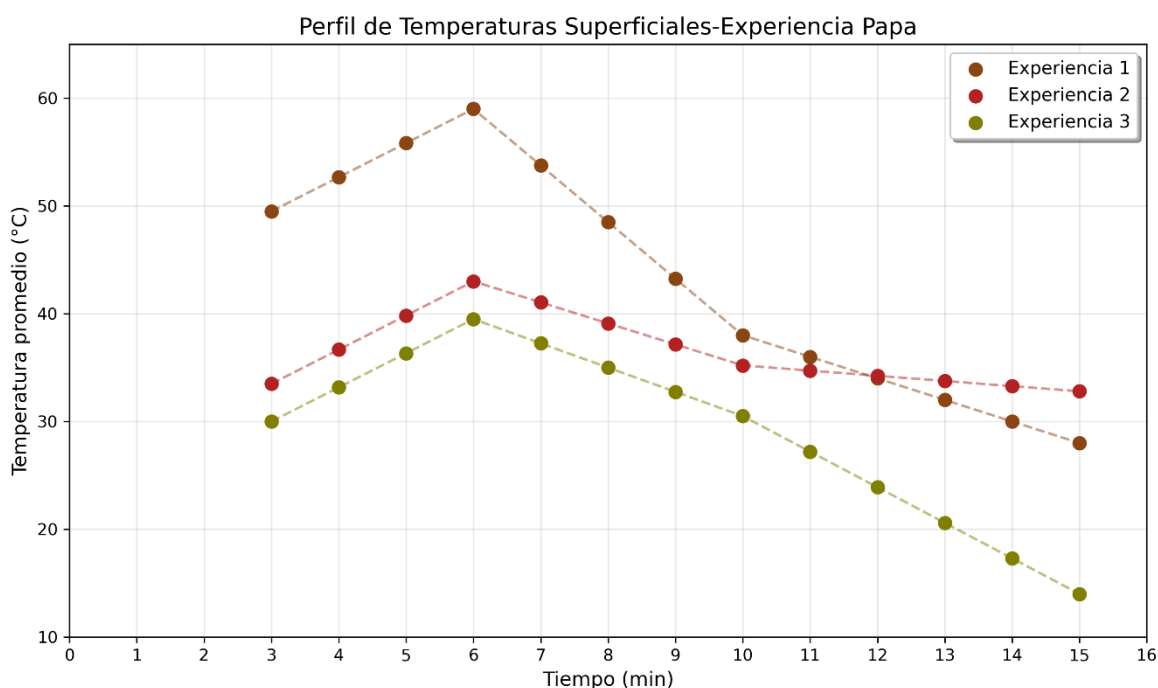


Figura 28: Perfil de decaimiento térmico en la cámara de combustión para cáscaras de papa.

Fuente: Elaboración propia

El gráfico del perfil de temperatura de agua describe una variación importante de las curvas para cada una de las Experiencias. La curva de solamente la materia orgánica presenta una pendiente ascendente pronunciada en el rango de 3 a 9 minutos, luego de ello esta se reduce casi por completo quedando una pendiente cercana a 0 y permitiendo llegar a temperaturas del agua de 41.8°C. Para la Experiencia 2 presentó un pendiente constante con leve decaimiento con el transcurso del tiempo llegando a una temperatura de 44.6°C.

La Experiencia 3 presento el menor ascenso de temperatura, alcanzando temperaturas cercanas a los 40°C y presentando un declive en el ascenso cercano a los 10 minutos de transcurrido el ensayo.

Desde el punto de vista térmico, esto indica que el reactor alcanzó rápidamente un punto de equilibrio donde la tasa de generación de calor fue igualada por las pérdidas al ambiente. El gráfico de Potencia Útil confirma esta premisa, mostrando una caída exponencial rápida, donde la potencia transferida al agua desciende por debajo de los 200 Watts en los primeros minutos, volviéndose insuficiente para impulsar un cambio de fase o ebullición.

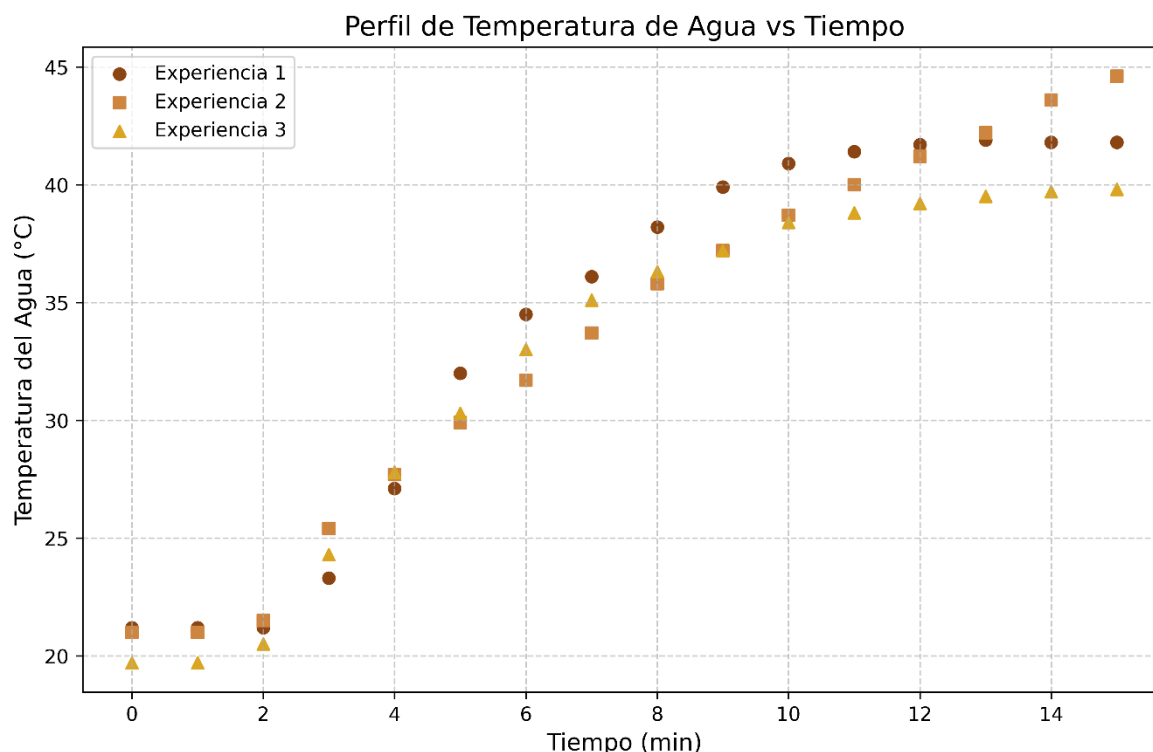


Figura 29: Curvas de calentamiento de agua en el tiempo para cáscaras de papa.

Fuente: Elaboración propia

El perfil de potencia transferida presenta las curvas de potencia útil entregada por cada estudio, la Experiencia 1 exhibe el desempeño inicial más eficiente, alcanzando un pico máximo cercano a los 385 W. Esto demuestra que la estructura porosa de la cáscara permite una liberación más expedita de la humedad y una oxidación directa de la materia orgánica, logrando el mayor flujo de calor instantáneo de las pruebas.

Por el contrario, la incorporación de PET genera un efecto inhibitorio inmediato y evidente en la potencia entregada durante los primeros minutos. La Experiencia 3 inicia con una potencia ligeramente inferior a la muestra pura, pero es la Experiencia 2 la que presenta el arranque más deficiente del grupo, situándose apenas sobre los 205 W. Esto refleja que al no alcanzarse temperaturas en la cámara de combustión suficientes para la ignición del plástico, este se funde sobre el residuo, creando una película impermeable que dificulta drásticamente la evaporación del agua y bloquea el paso del oxígeno.

Sin embargo, el comportamiento tardío de la Experiencia 2 revela una dinámica singular de combustión lenta. A partir del minuto 6, su curva de decaimiento se torna mucho más plana que las demás, logrando cruzar y mantenerse por encima de la Experiencia 1 y 3 hacia el final del ensayo, terminando con una potencia residual cercano a los 60 W frente a los 20 W de las otras. Esto sugiere que la barrera polimérica, si bien redujo drásticamente la potencia inicial, también ralentizó la cinética de consumo, transformando la combustión en un proceso de carbonización sostenido que libera la energía de forma gradual, aunque insuficiente para contrarrestar las pérdidas iniciales.

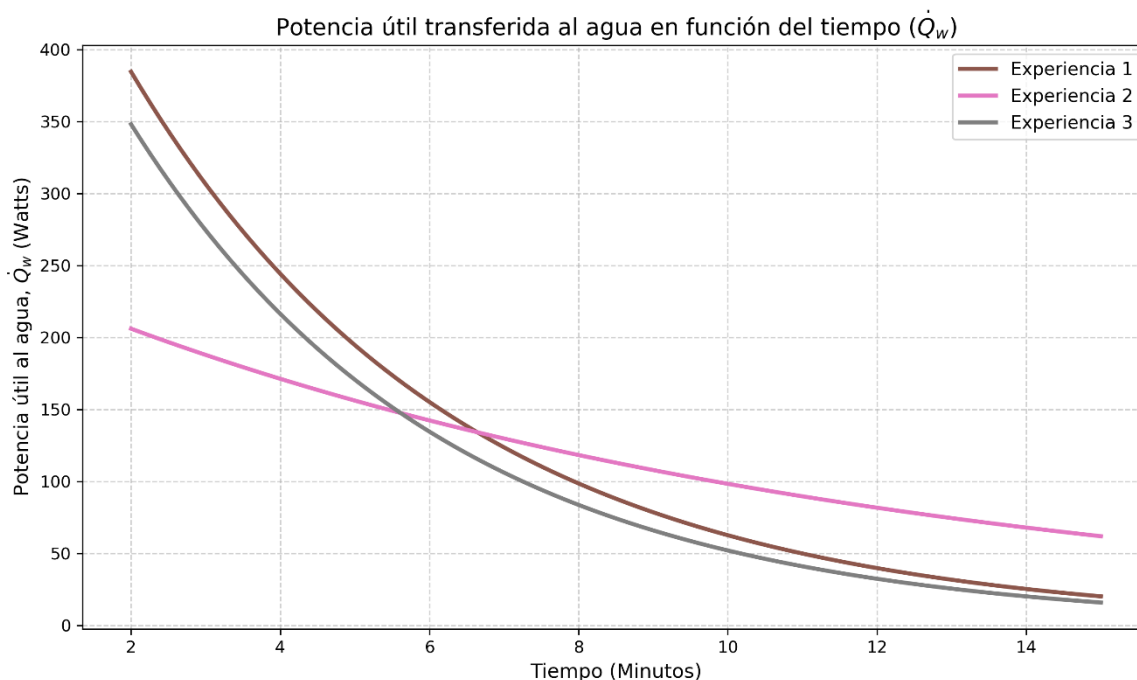


Figura 30: Potencia útil transferida de papas al fluido de trabajo en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia

4.4 Análisis comparativo

En esta sección se realiza un análisis comparativo de la Experiencia 1 para los tres combustibles orgánicos. Dado que en esta etapa los residuos se incineraron sin adición de PET, los resultados permiten caracterizar el comportamiento térmico y cinético de la fracción orgánica, aislando los efectos de mezclas con materiales poliméricos. Para cada combustible se examinan las curvas de variación de masa, la tasa de quemado, la potencia útil liberada por la combustión, los perfiles de temperatura superficial y las variaciones de temperatura del agua, junto con la potencia transferida a este medio. Este conjunto de indicadores permite evaluar de manera integral la intensidad de combustión, la estabilidad térmica y la capacidad real de transferencia de energía de cada residuo.

4.4.1 Variación de masa y tasa de quemado

Los gráficos comparativos siguientes evidencian diferencias en la cinética de combustión de los tres residuos orgánicos. Las cáscaras de cítricos presentan tanto la mayor masa inicial como la pendiente de pérdida de masa más pronunciada, reflejando una combustión más intensa debido a su elevado contenido de volátiles.

Las cáscaras de palta muestran el comportamiento opuesto: una pérdida de masa más lenta y progresiva, atribuible a su mayor contenido lipídico, que modera la disponibilidad inmediata de material combustible. La cinética resulta más suave y regular, lo cual se refleja en una tasa de quemado más baja del conjunto.

Las cáscaras de papa exhiben un desempeño intermedio. Su pendiente de pérdida de masa es menor que la de los cítricos, pero mayor que la de la palta, coherente con su mayor humedad y menor fracción volátil. Su tasa de quemado mantiene un comportamiento también intermedio.

En conjunto, los resultados indican que los cítricos poseen la combustión más vigorosa e intensa, las papas representan un comportamiento moderado y las paltas una combustión más extendida y de menor intensidad. Estas diferencias iniciales en la cinética son determinantes para explicar variaciones posteriores en potencia útil liberada y transferencia térmica hacia el agua.

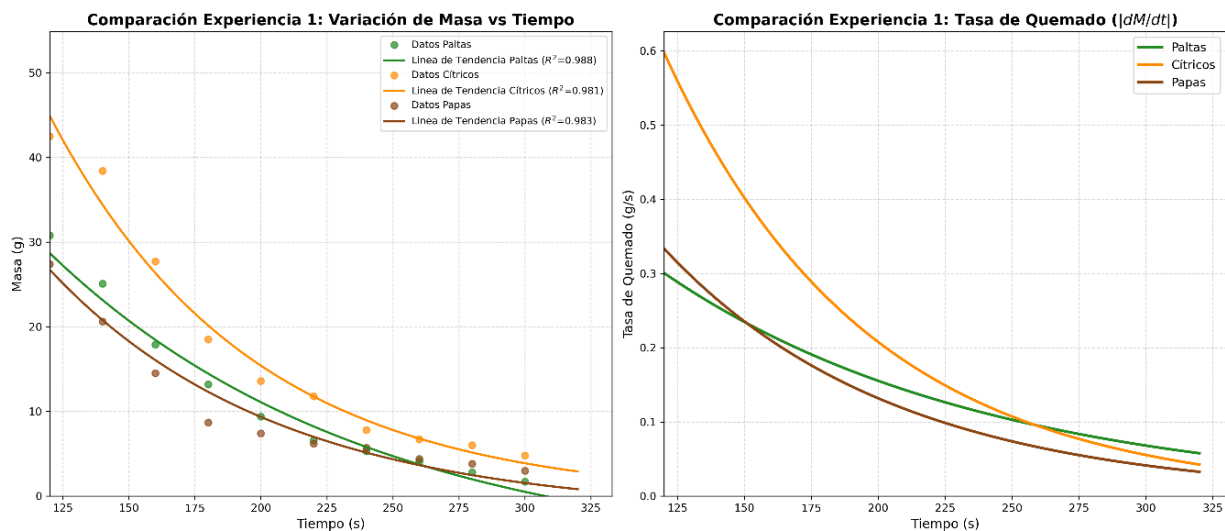


Figura 31: Variación de masa del combustible y tasa de quemado para Experiencia 1.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 Potencia de combustión

La figura 32 muestra la evolución temporal de la potencia térmica instantánea generada por los residuos durante la combustión. En los tres casos, la potencia decrece de forma continua, lo que es característico de combustibles sólidos donde la masa disminuye

progresivamente y la superficie efectiva de combustión se reduce conforme avanza el proceso.

Los cítricos presentan las mayores potencias iniciales, alcanzando valores superiores a 17 kW. Esto se explica por su elevado PCI, que permite una liberación energética instantánea más alta. No obstante, su curva exhibe el descenso más pronunciado, reflejando un comportamiento altamente volátil: su estructura promueve una combustión rápida, pero menos sostenible en el tiempo.

Las paltas muestran un desempeño intermedio. Aunque su PCI es el más alto, la potencia inicial no supera a la de los cítricos, lo que indica que factores como densidad, humedad y estructura influyen en la tasa efectiva de combustión. Su pendiente es más moderada, evidenciando un proceso más estable y sostenido que el de los cítricos.

Por otro lado, las papas registran las menores potencias térmicas durante toda la prueba, lo cual es coherente con su bajo PCI y su alto contenido de humedad. Su combustión es lenta y homogénea, con una caída gradual de la potencia sin variaciones abruptas, condicionada principalmente por la necesidad de evaporar agua antes de sostener una combustión más intensa.

Hacia tiempos superiores a 250 s, las curvas tienden a converger en valores cercanos a 1–2 kW, indicando que en etapas avanzadas la energía liberada queda dominada por la menor masa remanente y por el quemado del carbón fijo, más que por las diferencias iniciales de PCI.

En conjunto, el análisis evidencia que los cítricos ofrecen la mayor potencia inicial, pero con menor estabilidad; las paltas proporcionan un equilibrio entre energía liberada y sostenibilidad del proceso; y las papas presentan un comportamiento más limitado energéticamente, pero regular.

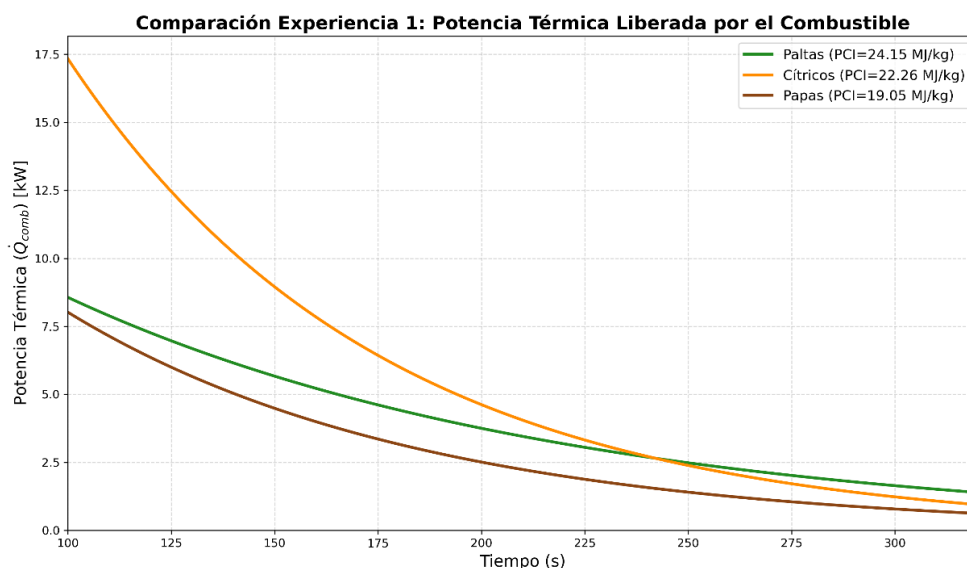


Figura 32: Evolución de la potencia térmica liberada por la combustión de biomasa.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 Perfil de variación de temperaturas superficiales en el tiempo

El gráfico siguiente muestra la evolución de la temperatura superficial promedio del sistema para los tres combustibles orgánicos evaluados. En todos los casos se observa un comportamiento descendente con el tiempo, coherente con la disminución progresiva de la tasa de combustión y de la potencia térmica liberada a medida que la masa de combustible se reduce.

Las cáscaras de palta mantienen las temperaturas superficiales más elevadas durante prácticamente toda la experiencia, iniciando sobre los 63 °C y descendiendo de manera gradual. Este comportamiento sugiere una combustión más sostenida y estable, asociada a su mayor contenido energético y a la presencia de compuestos lipídicos que prolongan la liberación térmica.

Los cítricos presentan temperaturas iniciales ligeramente inferiores, pero siguen una tendencia similar, con una caída más pronunciada. Esto es consistente con su combustión inicialmente más intensa pero menos persistente en comparación con las paltas.

Por su parte, las papas exhiben los valores más bajos del conjunto y el descenso más marcado después de su punto máximo. Su elevado contenido de humedad limita la transferencia térmica hacia la superficie, generando un enfriamiento acelerado conforme avanza la combustión.

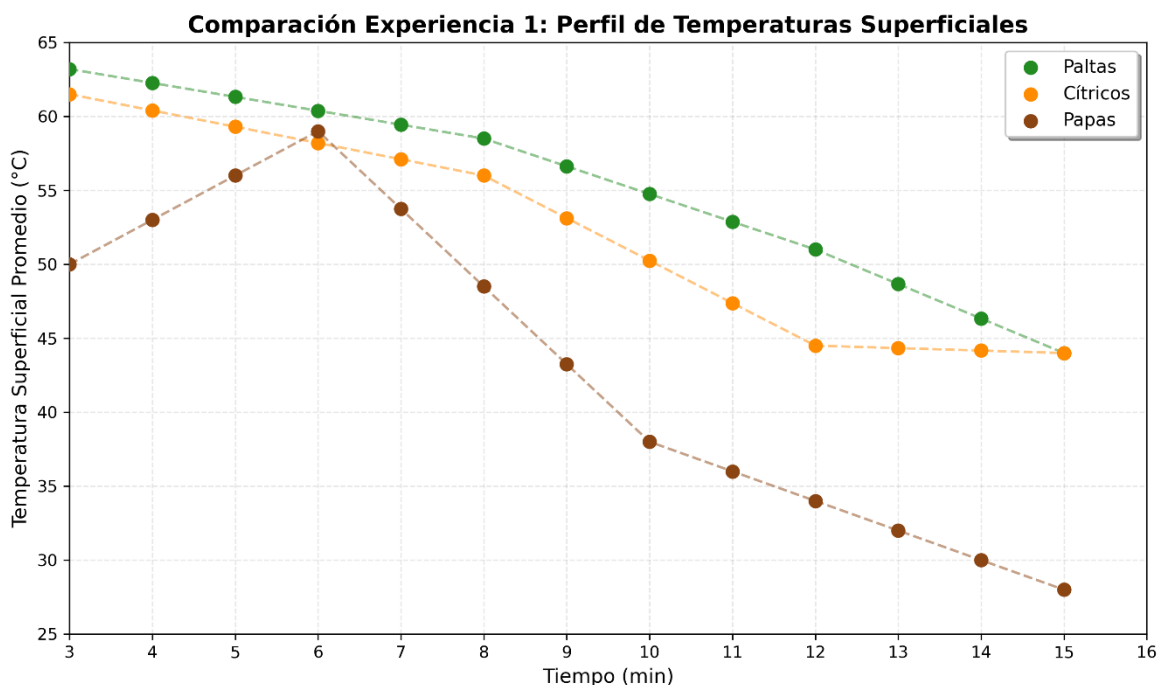


Figura 33: Perfil de temperaturas superficiales promedio en el tiempo para Experiencia 1.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.4 Perfil de temperatura de agua en el tiempo

La figura a continuación muestra la evolución de la temperatura del agua sometida al calentamiento producido por la combustión de paltas, cítricos y papas. En los tres casos, la temperatura aumenta de forma continua hasta alcanzar un régimen cuasi estacionario, lo que refleja la disminución progresiva de la potencia térmica disponible conforme avanza la combustión.

Los cítricos presentan el mayor incremento de temperatura, alcanzando aproximadamente 55 °C hacia los 13 minutos. Este comportamiento se alinea con la elevada potencia térmica inicial observada en este combustible, lo que permite una transferencia de calor más rápida y eficiente durante la primera mitad del proceso.

Las paltas muestran un calentamiento sostenido y ligeramente inferior al de los cítricos, llegando a valores cercanos a 54 °C. El ascenso más gradual indica una entrega térmica menos intensa pero estable, coherente con su curva de potencia más moderada y persistente.

Por otro lado, las papas exhiben el menor desempeño térmico, estabilizándose alrededor de 41–42 °C. Su elevada humedad y menor PCI limitan la energía disponible para la transferencia al agua, generando un aumento notablemente más lento y una meseta temprana en el perfil térmico.

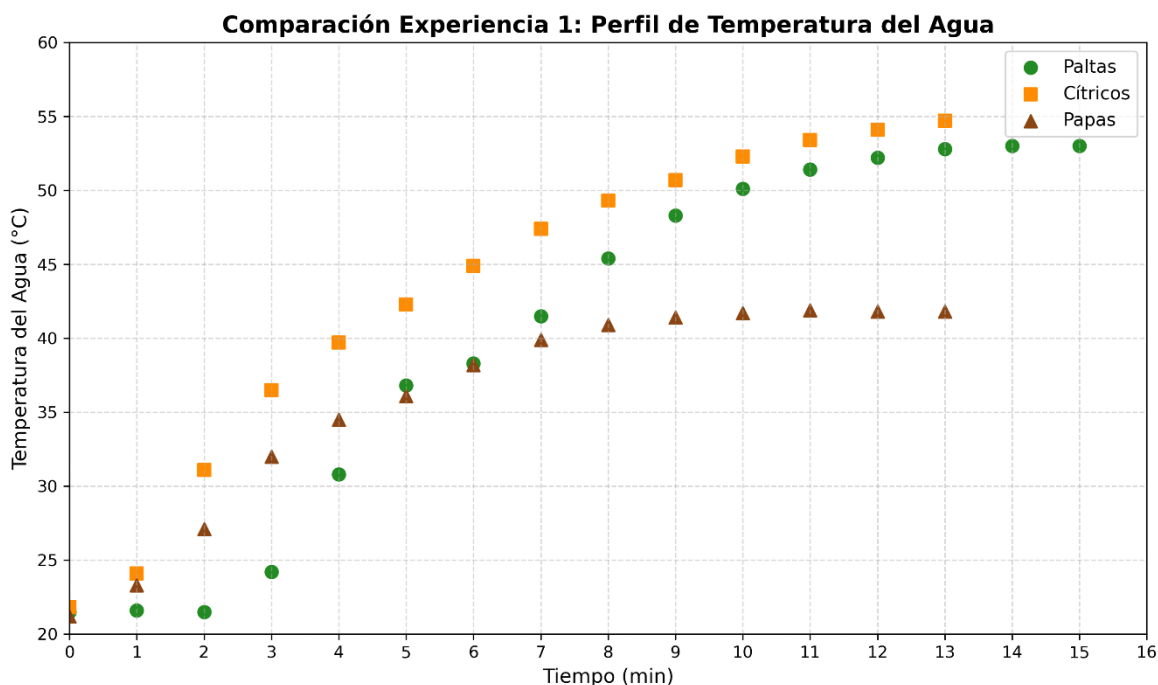


Figura 34: Perfil de temperatura del agua en el tiempo para Experiencia 1.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.5 Potencia útil al agua

A continuación, el gráfico muestra la evolución temporal de la potencia útil transferida al agua para los tres combustibles orgánicos evaluados. En todos los casos, la potencia disminuye de manera continua a medida que la combustión pierde intensidad.

Las cáscaras de palta presentan la mayor potencia útil inicial, cercana a 480 W, lo que evidencia una transferencia de calor particularmente eficiente en los primeros minutos. Este comportamiento se asocia a una combustión sostenida, coherente con el perfil de temperaturas superficiales previamente analizado.

Los cítricos muestran un desempeño térmico próximo al de las paltas, aunque con valores iniciales ligeramente inferiores. Su curva mantiene una pendiente similar, lo que indica una buena capacidad de entrega térmica, aunque menos estable en el tramo final debido a la rápida caída de la tasa de combustión.

Por otro lado, las papas exhiben los menores valores y una disminución más acelerada. Este comportamiento está directamente relacionado con su menor PCI y elevado contenido de humedad, factores que limitan la fracción de energía aprovechable para calentar el agua.

En términos comparativos, las tendencias reflejan de manera consistente el rendimiento térmico global observado en todos los parámetros analizados: la naturaleza fisicoquímica del residuo determina la calidad de la combustión, la potencia liberada y, finalmente, la eficacia de transferencia al fluido. Por lo tanto, las cáscaras de palta y cítricos se posicionan como los residuos con mayor potencial energético útil en aplicaciones de calentamiento indirecto.

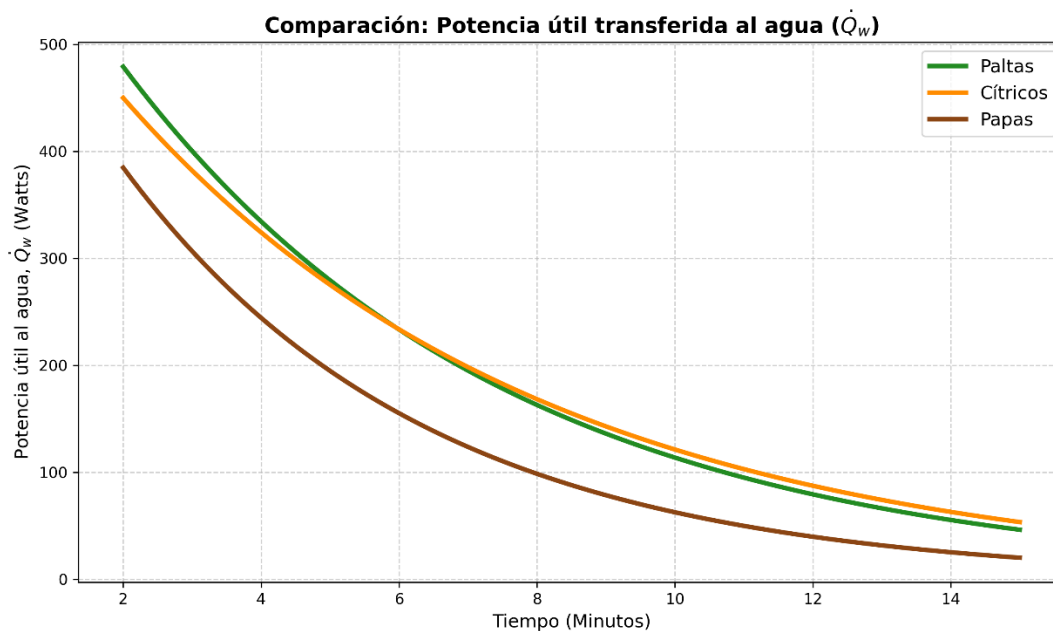


Figura 35: Potencia útil transferida al agua para Experiencia 1.

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Evaluación del potencial energético de residuos seleccionados

La estimación de la generación de residuos orgánicos asociados al consumo de cítricos, palta y papa en el Gran Concepción se realizó a partir de información oficial proveniente del Boletín diario de precios y volúmenes de frutas y hortalizas en mercados mayoristas, complementada con antecedentes estadísticos de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Este enfoque permite cuantificar flujos reales de ingreso de productos hortofrutícolas a los principales centros de distribución de la zona, particularmente la Vega Monumental, otorgando mayor trazabilidad y solidez metodológica a los balances de masa y energía desarrollados posteriormente.

De acuerdo con estas fuentes, el ingreso mensual promedio de cítricos al sistema de distribución del Gran Concepción alcanza aproximadamente 468.5 toneladas, mientras que el de palta y papa se estima en 172 toneladas y 525 toneladas, respectivamente. La generación de residuos se asoció principalmente a la fracción no comestible de cada producto, considerando antecedentes técnicos de la industria agroalimentaria.

En el caso de los cítricos, la cáscara representa entre un 40% y 50% del peso del fruto, adoptándose valores conservadores dentro de dicho rango. Para la palta, el residuo sólido se compone principalmente de la cáscara, la cual representa aproximadamente un 12% de la masa total del fruto. En la papa, la generación de cáscara depende del método de pelado, por lo que se adoptó un valor promedio conservador del 12%.

A partir de estos supuestos, se obtiene un flujo mensual aproximado de residuos orgánicos dispuestos a rellenos sanitarios o vertederos y dado que la conversión térmica eficiente requiere una fracción sólida combustible, se evaluó el contenido de humedad de los residuos y la energía necesaria para su secado. A partir de la caracterización experimental y antecedentes bibliográficos, se determinaron los porcentajes de humedad promedio mostrados en la Tabla 13.

Tabla 13: Generación de residuos sólidos a disposición final y contenido de humedad.

Residuo	Masa total (ton/mes)	Humedad (%)	Masa de agua contenida (ton/mes)
<i>Papa</i>	262.5	75.76	198.9
<i>Cítricos</i>	234.3	77.45	181.5
<i>Palta</i>	86	71.14	61.2

4.5.1 Balance de masa y energía para secado de los residuos

Previo a la valorización térmica de los residuos orgánicos, resulta necesario cuantificar la energía requerida para eliminar la fracción de humedad, dado que esta no contribuye a la combustión y representa una carga térmica adicional para el sistema. En este análisis, el

secado se modeló considerando únicamente la energía necesaria para la evaporación del agua contenida en cada residuo, por lo que los resultados obtenidos corresponden a un mínimo teórico.

La energía requerida para el secado se estimó mediante la siguiente expresión general:

$$Q_{sec} = m_{w,i} [c_p (T_{eb} - T_0) + h_{fg}] \quad (16)$$

Donde:

- Q_{sec} : Energía de secado (GJ)
- $m_{w,i}$: Masa de agua contenida en el residuo (kg).
- T_{eb} : Temperatura de ebullición del agua.
- T_0 : Temperatura inicial del residuo.
- h_{fg} : Calor latente de vaporización (kJ/kg).

El proceso de secado e incineración se logra observar el balance de energía de manera visual, en la siguiente figura:

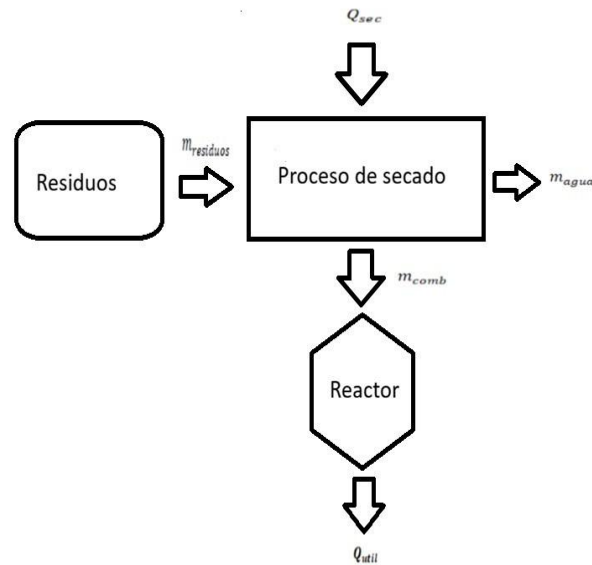


Figura 36: Sistema de secado e incineración.

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando la ecuación 15 se pueden obtener los siguientes resultados de energía de secado:

Tabla 14: Valores de energía de secado para masa de residuos mensual.

Residuo	Masa de agua (kg/mes)	Energía de secado (GJ/mes)
<i>Cítricos</i>	181430	466
<i>Palta</i>	61180	157
<i>Papa</i>	198870	511

La expresión utilizada considera únicamente el calentamiento del agua hasta su punto de ebullición y su posterior vaporización, despreciando el calentamiento del sólido seco y las pérdidas térmicas del sistema, por lo que representa un mínimo energético teórico.

4.5.2 Potencial energético de la fracción seca

La masa seca disponible para combustión se determinó restando la fracción de humedad a la masa total de residuos. El potencial energético teórico se calculó multiplicando dicha masa seca por el poder calorífico inferior (PCI) específico de cada residuo y utilizando la ecuación 11, se obtienen los siguientes resultados expuestos en la tabla 15.

Tabla 15: Potencial energético de las fracciones seleccionadas.

Residuo	Masa seca (kg/mes)	PCI (MJ/kg)	Q_{comb} (GJ/mes)
<i>Cítricos</i>	52823	22.26	1176
<i>Palta</i>	24819	24.15	599
<i>Papa</i>	63630	19.05	1212

Se observa que, a pesar de su menor masa, el residuo de palta presenta una contribución energética significativa debido a su mayor PCI, lo que favorece la estabilidad térmica del proceso cuando se trabaja con mezclas de residuos.

4.5.3 Calor útil recuperable en escenarios de conversión energética

El calor útil recuperable corresponde a la fracción del potencial energético teórico del residuo que puede ser efectivamente aprovechada, una vez consideradas las pérdidas inherentes al proceso de incineración. Dichas pérdidas se asocian principalmente al contenido de humedad del residuo, al exceso de aire requerido para la combustión, a las pérdidas térmicas por los gases de escape y a la disipación de calor a través de las paredes del reactor.

Para cuantificar este parámetro, se evaluaron dos escenarios de conversión energética representativos de distintas escalas tecnológicas:

- Reactor experimental de tiro natural, característico de sistemas de pequeña escala o prototipos, con una eficiencia global de conversión térmica del 10,5%.

- Reactor industrial de valorización energética, representativo de plantas Waste-to-Energy (WtE) convencionales, con una eficiencia térmica global del 25%, valor ampliamente reportado en la literatura técnica para incineradores de residuos sólidos.

El calor útil se determinó utilizando la ecuación 15, y con ello los resultados para el calor útil mensual recuperable se representan en la siguiente tabla:

Tabla 16: Energía útil recuperable para aprovechamiento energético.

Fracción	Q_{comb} (GJ/mes)	Q_{util} Experimental (GJ/mes)	Q_{util} Industrial (GJ/mes)
<i>Cítricos</i>	1176	123.5	294
<i>Palta</i>	599	62.9	149.8
<i>Papa</i>	1212	127.3	303

A partir de los resultados obtenidos, se observa que:

- En el escenario experimental, el sistema permite recuperar aproximadamente 314 GJ/mes de energía térmica útil, equivalente a 87,1 MWh/mes.
- En el escenario industrial, la energía térmica recuperable aumenta a 747 GJ/mes, lo que corresponde a 207,5 MWh/mes.

Se demuestra que la papa y los cítricos son los principales contribuyentes al calor útil total, debido a la mayor masa seca disponible, mientras que el residuo de palta, pese a su menor flujo másico, presenta un aporte energético significativo asociado a su mayor poder calorífico inferior.

4.5.4 Discusión técnica del calor útil recuperable

Los resultados obtenidos para el calor útil recuperable evidencian las limitaciones inherentes a la valorización energética por incineración de residuos orgánicos con alto contenido de humedad, como los analizados en este estudio. Aun cuando el potencial energético teórico total alcanza aproximadamente 2.987 GJ/mes, la fracción efectivamente recuperable se ve significativamente reducida por factores termodinámicos y operacionales propios del proceso.

En primer lugar, el contenido de humedad, superior al 70% en todos los residuos considerados, constituye el principal factor limitante del rendimiento térmico. Antes de que la combustión de la materia seca pueda aportar energía útil, es necesario suministrar una cantidad considerable de calor para evaporar el agua contenida en el residuo. Este consumo interno de energía reduce de forma directa la fracción del poder calorífico inferior disponible para recuperación externa, lo que explica que incluso en el escenario industrial la eficiencia global se mantenga en valores del orden del 25%, coherentes con los reportados para incineradores de plantas waste-to-energy alrededor del mundo.

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, una fracción relevante de la energía liberada se pierde a través de los gases de combustión, los cuales deben evacuarse a temperaturas suficientemente elevadas para garantizar una combustión completa y evitar la formación de compuestos indeseables. Adicionalmente, las pérdidas térmicas por radiación y convección a través de las paredes del reactor experimental, así como la energía asociada a las cenizas calientes, contribuyen a disminuir el calor útil recuperable.

El análisis por tipo de residuo muestra que las cáscaras de papa y los residuos cítricos concentran la mayor contribución al calor útil total, aportando conjuntamente cerca del 80% de la energía recuperable en ambos escenarios. Este comportamiento se explica principalmente por la mayor masa disponible, más que por diferencias significativas en el poder calorífico inferior. En contraste, el residuo de palta, si bien presenta un PCI superior, aporta una fracción menor al balance global debido a su menor flujo másico mensual.

La comparación entre escenarios pone en evidencia el impacto de las condiciones de los sistemas sobre el desempeño energético. El reactor experimental de tiro natural, con una eficiencia del 10,5%, representa un sistema limitado por una menor recuperación de calor, ausencia de sistemas avanzados de intercambio térmico y mayores pérdidas debido a falta de aislación térmica y recirculación de gases de escape. En este contexto, el calor útil recuperado (≈ 314 GJ/mes) resulta insuficiente para sostener procesos auxiliares energéticamente intensivos, como la generación eléctrica mediante un ciclo Rankine convencional u orgánico, restringiendo su aplicación a usos térmicos directos de baja temperatura.

Por el contrario, el escenario industrial, con una eficiencia del 25%, permite recuperar del orden de 747 GJ/mes de energía térmica útil. Si bien este valor continúa siendo inferior a la energía teórica requerida para un secado completo del residuo, su magnitud resulta relevante al compararse con esquemas de secado parcial o pretratamiento térmico, donde la reducción de humedad hasta valores intermedios (30–40%) disminuye considerablemente la demanda energética. Esto sugiere que la incineración, más que un proceso aislado, debe concebirse como parte de un sistema integrado de gestión y valorización de residuos.

Desde una perspectiva de diseño de proceso, los resultados indican que la viabilidad energética del sistema no depende exclusivamente del poder calorífico del residuo, sino de la correcta articulación entre pretratamientos, recuperación de calor y estrategia de operación. En este sentido, el uso del calor recuperado para alimentar etapas de secado, precalentamiento del aire de combustión o calefacción de baja temperatura permite mejorar el balance energético global y acercar el sistema a un régimen de autosuficiencia térmica.

Finalmente, el análisis confirma que la incineración de residuos orgánicos húmedos no debe evaluarse únicamente en función de la generación neta de energía, sino también considerando beneficios operacionales y ambientales, tales como la reducción de masa y volumen destinado a disposición final, la estabilización del residuo y la mitigación de emisiones asociadas a la degradación anaerobia en rellenos sanitarios. Bajo este enfoque, el calor útil recuperable constituye un parámetro clave para la optimización del sistema, más que un indicador aislado de desempeño energético.

5 Conclusiones

El presente estudio permitió evaluar experimentalmente y a escala de sistema el potencial energético de residuos sólidos provenientes del sector comercial e industrial del Gran Concepción, validando la factibilidad técnica de su valorización energética mediante combustión directa. Se comprobó que el desempeño térmico de los residuos depende estrechamente de su composición fisicoquímica, particularmente del contenido de compuestos volátiles, fracciones lipídicas y humedad, variables que condicionan la cinética de combustión y la eficiencia global del proceso.

La caracterización energética de residuos representativos evidenció que las cáscaras de cítricos y palta presentan una mayor aptitud para la conversión térmica directa, alcanzando potencias máximas de liberación de calor cercanas a 17,3 kW y eficiencias térmicas del orden de 13,75 % y 13,17 %, respectivamente, comportamiento asociado a la volatilización de aceites esenciales y lípidos. En contraste, las cáscaras de papa resultaron inviables para combustión directa sin pretratamiento, debido a su elevado contenido de humedad y al alto requerimiento energético para la evaporación del agua contenida, lo que limita la eficiencia global del proceso a valores inferiores al **10 %**.

Desde una perspectiva de potencial energético territorial, el análisis de flujos reales de residuos permitió estimar que las fracciones de cítricos, palta y papa generan en conjunto un potencial energético teórico cercano a 3.000 GJ/mes, asociado a la fracción seca combustible. No obstante, al considerar eficiencias de conversión representativas, el calor útil efectivamente recuperable se reduce a aproximadamente 314 GJ/mes en un reactor experimental de tiro natural y 747 GJ/mes en un sistema industrial de valorización energética, evidenciando la fuerte incidencia de las pérdidas térmicas y del contenido de humedad sobre el aprovechamiento real de la energía contenida en los residuos.

El reactor experimental de tiro natural diseñado y construido demostró ser una plataforma funcional y de bajo costo para la evaluación comparativa del comportamiento térmico de distintas biomásas, permitiendo identificar regímenes cinéticos diferenciados: explosivo en residuos cítricos, progresivo en residuos de palta y retardado en cáscaras de papa, resultados consistentes con los análisis de composición y poder calorífico realizados.

Finalmente, la evaluación de la co-combustión con PET descartó la existencia de sinergia energética en el sistema experimental, debido a la formación de una fase polimérica fundida que incrementó la resistencia a la difusión de oxígeno y redujo significativamente la potencia térmica y el rendimiento global del proceso. En conjunto, los resultados confirman que la valorización energética de residuos orgánicos debe abordarse como un sistema integrado, donde el potencial energético disponible, las condiciones de operación y los pretratamientos aplicados resultan determinantes para su viabilidad técnica y escalamiento industrial.

Referencias

- [1] Aboagye, D., Banadda, N., Kiggundu, N., & Kabenge, I. (2017). Assessment of orange peel waste availability in Ghana and potential bio-oil yield using fast pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 814–821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.262>
- [2] Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management*, 197, 177–198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.087>
- [3] Cansee, S., Saenkham, S., Kanasri, T., Promtow, W., & Hu, S. (2025). Performance optimization of natural updraft gasifier stoves: Impact of air hole configuration and biomass fuel characteristics on combustion efficiency. *Energy Nexus*, 19, 100480. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100480>
- [4] Dalbehera, S., Ghiwe, S. S., & Kalamkar, V. R. (2022). Numerical analysis of design modifications in a natural draft biomass rocket cookstove. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54, 102858. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102858>
- [5] Dhyani, V., & Bhaskar, T. (2018). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*, 129(Part B), 695–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>
- [6] Haile, T. E., & Adem, K. D. (2024). Experimental evaluation of low-cost thermoelectric integrated rocket stove. *Cleaner Energy Systems*, 7, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100112>
- [7] Lam, S. S., Liew, R. K., Cheng, C. K., Rasit, N., Ooi, C. K., Ma, N. L., Ng, J.-H., Lam, W. H., Chong, C. T., & Chase, H. A. (2018). Pyrolysis production of fruit peel biochar for potential use in treatment of palm oil mill effluent. *Journal of Environmental Management*, 213, 400–408. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.092>
- [8] Ministerio del Medio Ambiente. (s. f.). *Capítulo: C-Residuos by Ministerio del Medio Ambiente - Infogram*. <https://infogram.com/1ppmgeyyzdz5y6urw5p0zqv3vgtrwkp6nw?live>
- [9] Önal, E., Uzun, B. B., & Pütün, A. E. (2012). An experimental study on bio-oil production from co-pyrolysis with potato skin and high-density polyethylene (HDPE). *Fuel Processing Technology*, 104(1), 365–370. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.06.010>
- [10] San José, M. J., Alvarez, S., & López, R. (2023). Conical spouted bed combustor to obtain clean energy from avocado waste. *Fuel Processing Technology*, 239, 107543. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107543>
- [11] Sanahuja-Parejo, O., Veses, A., Navarro, M. V., López, J. M., Murillo, R., Callén, M. S., & García, T. (2018). Catalytic co-pyrolysis of grape seeds and waste tyres for the production of drop-in biofuels. *Energy Conversion and Management*, 171, 1202–1212. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.053>
- [12] Sarker, M., Kabir, A., Rahman, M. M., & Rashid, M. M. (2021). Valorization of municipal wastes using co-pyrolysis for green energy production, energy security, and environmental

sustainability: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125936. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125936>

[13] Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>

Anexo

Anexo 1: Resultados encuesta

Local	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Local 1	Cáscaras de cebolla	Restos de frutas y verduras variadas	Restos de pan y masas
Local 2	Posos de café	Cáscaras de papa	Cáscaras de limón y naranja
Local 3	Servilletas y papel absorbente contaminado	Posos de café	Restos de pan y masas
Local 4	Cáscaras de papa	Restos de frutas y verduras variadas	Servilletas y papel absorbente contaminado
Local 5	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de papa	Posos de café
Local 6	Posos de café	Cáscaras de cebolla	Cáscaras de limón y naranja
Local 7	Posos de café	Cáscaras de papa	Cáscaras de limón y naranja
Local 8	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de palta	Restos de pan y masas
Local 9	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de palta	Posos de café
Local 10	Cáscaras de papa	Posos de café	Cáscaras de limón y naranja
Local 11	Restos de frutas y verduras variadas	Servilletas y papel absorbente contaminado	Cáscaras de limón y naranja
Local 12	Cáscaras de papa	Posos de té	Cáscaras de cebolla
Local 13	Cáscaras de papa	Cáscaras de palta	Restos de frutas y verduras variadas
Local 14	Cáscaras de limón y naranja	Posos de té	Posos de café
Local 15	Posos de café	Cáscaras de papa	Restos de frutas y verduras variadas
Local 16	Restos de pan y masas	Restos de frutas y verduras variadas	Cáscaras de palta
Local 17	Restos de frutas y verduras variadas	Cáscaras de papa	Cáscaras de limón y naranja
Local 18	Cáscaras de papa	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de cebolla
Local 19	Cáscaras de limón y naranja	Servilletas y papel absorbente contaminado	Cáscaras de cebolla
Local 20	Posos de café	Cáscaras de papa	Servilletas y papel absorbente contaminado

Local 21	Cáscaras de papa	Restos de frutas y verduras variadas	Restos de pan y masas
Local 22	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de papa	Servilletas y papel absorbente contaminado
Local 23	Restos de pan y masas	Cáscaras de papa	Cáscaras de limón y naranja
Local 24	Cáscaras de papa	Servilletas y papel absorbente contaminado	Posos de café
Local 25	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de papa	Posos de café
Local 26	Restos de pan y masas	Posos de té	Restos de frutas y verduras variadas
Local 27	Cáscaras de palta	Cáscaras de papa	Restos de pan y masas
Local 28	Restos de pan y masas	Posos de café	Cáscaras de cebolla
Local 29	Posos de café	Cáscaras de cebolla	Cáscaras de papa
Local 30	Cáscaras de papa	Posos de té	Cáscaras de cebolla
Local 31	Cáscaras de palta	Restos de frutas y verduras variadas	Cáscaras de limón y naranja
Local 32	Cáscaras de cebolla	Restos de pan y masas	Cáscaras de limón y naranja
Local 33	Cáscaras de papa	Cáscaras de limón y naranja	Restos de frutas y verduras variadas
Local 34	Servilletas y papel absorbente contaminado	Posos de té	Restos de pan y masas
Local 35	Cáscaras de papa	Restos de frutas y verduras variadas	Posos de café
Local 36	Servilletas y papel absorbente contaminado	Restos de frutas y verduras variadas	Cáscaras de limón y naranja
Local 37	Cáscaras de papa	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de cebolla
Local 38	Servilletas y papel absorbente contaminado	Cáscaras de papa	Posos de café
Local 39	Cáscaras de cebolla	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de papa
Local 40	Cáscaras de limón y naranja	Restos de frutas y verduras variadas	Posos de café
Local 41	Restos de pan y masas	Cáscaras de limón y naranja	Restos de frutas y verduras variadas
Local 42	Restos de frutas y verduras variadas	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de palta

Local 43	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de papa	Restos de pan y masas
Local 44	Cáscaras de palta	Cáscaras de papa	Cáscaras de limón y naranja
Local 45	Restos de frutas y verduras variadas	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de papa
Local 46	Cáscaras de palta	Restos de frutas y verduras variadas	Cáscaras de limón y naranja
Local 47	Posos de té	Restos de pan y masas	Cáscaras de limón y naranja
Local 48	Restos de pan y masas	Cáscaras de limón y naranja	Posos de té
Local 49	Posos de té	Posos de café	Cáscaras de papa
Local 50	Servilletas y papel absorbente contaminado	Cáscaras de limón y naranja	Cáscaras de papa

Anexo 2: Planos de reactor ensamblado.

